



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

**RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DE SANTARÉM:
FUNDAMENTOS PARA USO E PROTEÇÃO**

TESE APRESENTADA POR

**ANTÔNIO CARLOS FELICE NICOLA SAVÉRIO
TANCREDI**

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

Data de Aprovação: **10 / 10 / 1996**

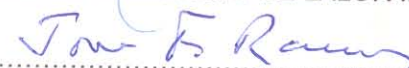
Comitê de Tese:


ALDO DA CUNHA REBOUÇAS (Orientador)


NORBERT FENZL


WALDIR DUARTE COSTA


MIGUEL AGOSTINHO DE LATOR IMBIRIBA


JOSÉ FRANCISCO DA FONSECA RAMOS

BELÉM

À memória
de meus pais.

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os que direta e indiretamente colaboraram para a conclusão deste trabalho. A todos gostaria de demonstrar minha gratidão.

Aos órgãos que contribuíram para a elaboração desta tese registro meu agradecimento, em especial:

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA pela liberação para a realização do curso de doutorado.

À Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM pelo apoio decisivo ao concordar em incluir-me no Projeto Recursos Hídricos de Santarém e Hidrogeoquímica Ambiental do Rio Tapajós e permitir a utilização dos dados obtidos, para a elaboração desta tese.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

À Companhia de Saneamento do Pará - COSANPA, através de seus diretores e técnicos, pelo apoio irrestrito na cessão de dados.

Ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo por ter possibilitado treinamento durante a realização do curso de doutorado.

À Fundação Nacional de Saúde - FNS, em Belém e à Companhia de Saneamento do Amazonas - COSAMA, em Manaus, e à Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, também em Manaus, pela cessão de informações importantes para o enriquecimento desta dissertação.

Merecem um agradecimento especial os seguintes profissionais:

O Eng. Evaldo Martins Cesar, da SUDAM, pelo apoio decisivo nos trabalhos de pesquisa que conduziram à elaboração desta tese, bem como os colegas do Centro de Hidroclimatologia e Sensoriamento Remoto da Amazônia - CHSRA e do Departamento de Recursos Naturais - DRN, da SUDAM que contribuíram sobremaneira na realização de trabalhos de pesquisa utilizado na elaboração da tese.

O Dr. Aldo da Cunha Rebouças e o Dr. Norbert Fenzl respectivos orientador e co-orientador desta tese pelas valiosas sugestões e estímulos durante sua realização.

O Dr. Waldir Duarte da Costa, o Dr. José Francisco da Fonseca Ramos e o Dr. Miguel Agostinho de Lalor Imbiriba pelas importantes sugestões para a melhoria do texto desta tese.

Os Srs. Oldemir de Souza Melo e Afonso Costa, bem como os demais técnicos da empresa Esan Engenharia Limitada que com suas experiências colaboraram ilimitadamente na cessão de informações hidrogeológicas da região de Santarém.

O Eng. Paulo Navegantes e o Eng. Wsnand Ribeiro dos Santos, da COSANPA em Belém e Santarém, respectivamente, bem como os demais técnicos dessa instituição, que colaboraram substancialmente, com informações e apoio aos trabalhos de pesquisa.

O Bibliotecário João Dolzane do Couto, da UFPa, pela pronta colaboração na obtenção de importantes artigos utilizados como fonte de consulta.

O Sr. e amigo Elcio Amaral pelo estímulo e apoio, facilitando o acesso à informações no Município de Santarém.

A colega e amiga Eliene Lopes de Souza pela sua valiosa colaboração, com sugestões sobre a redação do texto e na informatização de figuras.

A Srta. Ana Lourença dos Santos Galúcio pelo incansável apoio na digitação do texto.

Os colegas e amigos do Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará - IDESP, e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA pelo incansável estímulo e colaboração, facilitando a obtenção de dados.

Os funcionários e professores do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará pela sempre prestativa colaboração durante a realização do curso de doutorado.

E finalmente aos demais colegas e amigos que trabalham com recursos hídricos que sempre dispensaram uma palavra de estímulo à concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	5
1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA	8
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. METODOLOGIA	9
2. ELEMENTOS HIDROCLIMÁTICOS	10
2.1. QUADRO CLIMÁTICO	10
2.2. QUADRO HIDROLÓGICO	12
2.2.1. Características Hidrológicas	13
2.2.2. Avaliação do Fluxo de Base	15
2.3. BALANÇO HÍDRICO	22
3. QUADRO GEOLÓGICO	27
3.1. GEOLOGIA REGIONAL	27
3.1.1. Formações Paleozóicas	31
3.1.2. Formações Meso-Cenozóicas	32
3.1.3. Geomorfologia	34
3.2. GEOLOGIA LOCAL	36

4. CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS	41
4.1. INVENTÁRIO HIDROGEOLÓGICO	41
4.2. CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	46
4.2.1. Características Litológicas	51
4.2.2. Características Hidráulicas	55
4.2.3. Sistema de Fluxos	66
4.3. QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	72
4.3.1. Caracterização Hidrogeoquímica	77
4.3.2. Potabilidade	80
4.4. VULNERABILIDADE E PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	82
4.4.1. Caracterização da Vulnerabilidade	84
4.4.2. Mapa de Vulnerabilidade	88
4.4.3. Área de Proteção de Poços	91
4.5. AVALIAÇÃO DAS RESERVAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	95
4.5.1. Reserva Reguladora	96
4.5.2. Reserva Permanente	97
4.5.3. Recurso Explotável	98
5. PERSPECTIVA DE UTILIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	101
5.1. CARACTERÍSTICAS DOS PROJETOS DE POÇOS	103
5.1.1. Dimensionamento de Obras de Captação	104
5.1.2. Condições de Utilização	108
5.1.3. Manutenção de Poços	115
5.2. CUSTO DE EXPLOTAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	117
5.2.1. Custos Fixos	118
5.2.2. Custos Operacionais	123
5.2.3. Custos Totais de Exploração	126

5.3. COMPARAÇÃO DE CUSTO DE EXPLOTAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DA ÁGUA SUPERFICIAL	128
5.3.1. Custo de Exploração da Água Superficial	129
5.3.2. Comparação de Custos	135
5.4. UTILIZAÇÃO PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO	139
6. CONCLUSÕES	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1.1 -	Localização geral e da área pesquisada.....	8
Figura 2.1 -	Distribuição mensal média da temperatura e da precipitação pluviométrica anual, no período de 1967 a 1990, da estação meteorológica de Belterra (baseado em DNMET, 1992).....	12
Figura 2.2 -	Bacias hidrográficas da região de Santarém.....	13
Figura 2.3 -	Seção de medição do igarapé São Brás.....	14
Figura 2.4 -	Esquema de depleção da água subterrânea.....	17
Figura 2.5 -	Hidrograma do igarapé São Brás no ano de 1993.....	19
Figura 3.1 -	Localização da bacia sedimentar do Amazonas (adaptado de CUNHA et al, 1994).....	28
Figura 3.2 -	Sumário da estatigrafia da bacia sedimentar do Amazonas (adaptado de CUNHA et al, 1994).....	30
Figura 3.3 -	Quadro geomorfológico da região de Santarém.....	37
Figura 3.4 -	Seção geológica esquemática da Formação Alter do Chão na região de Santarém.....	38
Figura 3.5 -	Perfis de poços petrolíferos que atravessam toda a Formação Alter do Chão na região de Santarém (adaptado de PETROBRÁS, 1955 e 1985).....	39
Figura 4.1 -	Localização de poços da área urbana de Santarém e suas proximidades.....	42

Figura 4.2 -	Localização de poços mais afastados da área urbana de Santarém.....	43
Figura 4.3 -	Perfil hidrogeológico do poço ST-23.....	48
Figura 4.4 -	Perfil hidrogeológico do poço ST-08.....	49
Figura 4.5 -	Perfil hidrogeológico do poço ST-04.....	50
Figura 4.6 -	Diagrama de análises granulométricas de sedimentos arenosos dos aquíferos da região de Santarém (amostras de calha).....	54
Figura 4.7 -	Poço em bombeamento em um aquífero confinado.....	56
Figura 4.8 -	Perfil hidrogeológico do poço ST-10 (nota: poço artesianos com nível estático de 8,69 m acima da superfície do terreno; adaptado de CPRM, 1978).....	61
Figura 4.9 -	Diagrama de rebaixamento com o tempo, do poço ST-10 tomadas no poço de observação (poço ST-12) distante 400 m do poço bombeado (adaptado de CPRM, 1978).....	62
Figura 4.10 -	Mapa potenciométrico do aquífero livre da Formação Alter do Chão em Santarém.....	71
Figura 4.11 -	Esquema do sistema de fluxo da Formação Alter do Chão na região de Santarém (baseado na Figura 3.4).....	72
Figura 4.12 -	Localização das amostras da água subterrânea para análises físico-química, da região de Santarém.....	73
Figura 4.13 -	Diagrama de barras de amostras selecionadas da água subterrânea da região de Santarém.....	77
Figura 4.14 -	Diagrama trilinear de Piper (HILL, 1940; PIPER, 1944) de amostras da água subterrânea da região de Santarém.....	78

Figura 4.15 -	Diagrama de Schöeller (modificado) (SCHÖELLER, 1962) de amostras de água subterrânea da região de Santarém.....	79
Figura 4.16 -	Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero (adaptado de FOSTER & HIRATA, 1988).....	85
Figura 4.17 -	Mapa de vulnerabilidade da água subterrânea da região de Santarém.....	89
Figura 4.18 -	Vista em perfil e em planta, de um poço em bombeamento, mostrando a zona de influência, a zona de contribuição e isócronas da zona de transporte ou captura (adaptado de USEPA, 1978).....	92
Figura 4.19 -	Zonas de captura de água subterrânea para as isócronas de 1 mês (1 m), 2 meses (2 m) e 6 meses (6 m), com taxa de bombeamento de 720 m ³ /dia e características hidrogeológicas médias do aquífero livre da Formação Alter do Chão em Santarém.....	93
Figura 5.1 -	Diagrama de rebaixamento específico com o tempo de bombeamento, de poços da região de Santarém.....	109
Figura 5.2 -	Evolução teórica do cone de rebaixamento para o aquífero livre.....	110
Figura 5.3 -	Evolução teórica do cone de rebaixamento para o aquífero confinado.....	111
Figura 5.4 -	Representação gráfica da equação dos coeficientes de perdas de carga do poço.....	114
Figura 5.5 -	Curva característica do poço.....	114

Figura 5.6 -	Avaliação do espaçamento ótimo entre poços com interferência para o custo mínimo de bombeamento e adução.....	140
Figura 5.7 -	Esquema de um poço tubular de 300 m de profundidade.....	142

TABELAS

Tabela 2.1 -	Parâmetros climáticos médios mensais e anual da estação meteorológica de Belterra, no período de 1967 a 1990.....	11
Tabela 2.2 -	Características hidrológicas e fisiográficas da bacia do igarapé São Brás.....	15
Tabela 2.3 -	Valores das descargas do período de depleção do igarapé São Brás e os respectivos dias, intervalo de tempo e coeficiente de depleção específica, para o ano de 1993.....	20
Tabela 2.4 -	Precipitação pluviométrica, descarga líquida total e descarga líquida devido ao escoamento de base e suas relações, para a bacia do igarapé São Brás, até o posto fluviométrico, no ano de 1993.....	22
Tabela 2.5 -	Balanço hídrico para uma reserva hídrica de 150 mm de solo (adaptado de THORNTWAITE & MATHER, 1955).....	25
Tabela 2.6 -	Balanço hídrico anual da região de Santarém.....	26
Tabela 4.1 -	Dados técnicos dos poços tubulares da região de Santarém (e das perfurações P-01, P-02, P-03 e P0-04).....	44

Tabela 4.2 -	Valores médios obtidos a partir de curvas granulométricas para o tamanho efetivo e tamanho médio, dos grãos e para o coeficiente de uniformidade, associado aos poços e profundidades da amostra de calha, de areias e cascalhos da região de Santarém.....	53
Tabela 4.3 -	Parâmetros hidráulicos dos aquíferos da Formação Alter do Chão na região de Santarém.....	63
Tabela 4.4 -	Condutividade hidráulica e diâmetro efetivo dos grãos, de areias das camadas aquíferas, associadas aos poços e profundidades das amostras, da região de Santarém (amostras de calha).....	65
Tabela 4.5 -	Análises físico-químicas de amostras da água subterrânea da região de Santarém (As amostras S2, S3, S4, S5, S6 e S7 são dos poços ST-16, ST-08, ST-23, ST-27, ST-22, ST-31 e ST-50, respectivamente. As amostras S12 e S17 são das fontes Emaús e Aramanaí, respectivamente. As demais amostras correspondem, a outros poços tubulares dessa área).....	74
Tabela 4.6 -	Valores mínimo e máximo obtido nos parâmetros analisados da água subterrânea da região de Santarém, valor mínimo desejável e máximo permissível das normas brasileiras de potabilidade, do decreto nº 39.367 e os padrões recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 1984).....	81
Tabela 4.7 -	Índice de vulnerabilidade da água subterrânea na região de Santarém.....	86

Tabela 4.8 - Grau de vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea na região de Santarém.....	87
Tabela 4.9 - Volumes da precipitação pluviométrica, da restituição do aquífero livre para o igarapé São Brás e da reserva reguladora na região de Santarém.....	97
Tabela 4.10 - Espessura dos aquíferos, porosidade efetiva, coeficiente de armazenamento e volume da reserva permanente na região de Santarém.....	98
Tabela 5.1 - Custo de poços tubulares, custo unitário dos poços e valor da amortização anual desses poços associados, às suas profundidades e vazões, na região de Santarém.....	121
Tabela 5.2 - Custo de bombas submersas, valor principal do conjunto de bombas e valor da amortização anual, associado às suas vazões e potências, na região de Santarém.....	122
Tabela 5.3 - Custo completo das instalações eletro-mecânicas, valor da amortização anual, associado à vazão e potência das bombas, na região de Santarém.....	122
Tabela 5.4 - Custo de manutenção, custo anual de energia elétrica e custo operacional anual dos poços tubulares, associado à vazão e potência das bombas, na região de Santarém.....	125
Tabela 5.5 - Custo anual de amortização de poços, de bombas e de instalações eletro-mecânicas, amortização do custo fixo total anual, custo operacional anual e custo total anual, para captação de água subterrânea, na região de Santarém.....	126

Tabela 5.6 -	Volume anual explorado, custo total anual e custo unitário anual de exploração da água subterrânea, associado a profundidade e vazão dos poços, na região de Santarém.....	127
Tabela 5.7 -	Custo anual de amortização da estação, do conjunto de bombas, dos totais anuais, volume da água superficial explorada e custo fixo unitário anual para a estação de captação de Manaus e de Oriximiná.....	132
Tabela 5.8 -	Custo fixo unitário anual, custo operacional unitário anual e custo de exploração unitário anual, da água superficial de Manaus e Oriximiná.....	134
Tabela 5.9 -	Custo de exploração unitário anual das estações de captação da água superficial de Manaus e de Oriximiná, para regimes de bombeamento de 16 horas por dia e 24 horas por dia.....	135
Tabela 5.10 -	Custo unitário de construção de adutoras e poços tubulares em Oriximiná e Santarém.....	136
Tabela 5.11 -	Custo unitário de exploração da água superficial em Manaus e em Oriximiná e da água subterrânea em Santarém, para regimes de bombeamento de 16 horas por dia.....	137

RESUMO

As pesquisas de recursos hídricos subterrâneos na região de Santarém, em uma área de 900 km², delinearam as condições hidrogeológicas e os aspectos técnicos e econômicos para a utilização racional da água subterrânea.

A região situa-se no domínio de clima equatorial úmido, com precipitação pluviométrica anual média de 1.911,2 mm.

A descarga líquida anual média, determinada no igarapé São Brás, em uma área de drenagem de 147,78 km² apresentou 2,17 m³/seg e o componente do fluxo de base, o volume anual de 37,0 x 10⁶ m³.

Os aquíferos são constituídos por areias aluviais quaternárias de pequena representatividade espacial e por areias, arenitos e cascalhos cretácicos da Formação Alter do Chão, com ampla distribuição espacial.

O sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão, nessa área, possui espessuras de 600 m. Em sua parte superior, o aquífero é livre, com 50 m de espessura média e subjacente a este ocorrem aquíferos confinados com espessuras que perfazem 430 m, os quais estão intercalados a aquícludes e/ou aquítardes.

As características hidráulicas foram determinadas a partir de ensaios de bombeamento. Os parâmetros hidrodinâmicos evidenciam que a transmissividade apresenta valores compreendidos entre 130 m²/dia e 790 m²/dia, indicando grande capacidade de produção da água subterrânea.

A qualidade da água subterrânea mostra concentração muito baixa dos constituintes em solução, consistente com os padrões de potabilidade. Em termos de caracterização hidrogeoquímica as águas são dos tipos sódio-cloretadas e mistas, tanto para os cátions como para os ânions. A predominância dos principais constituintes iônicos possui a seguinte relação: rNa>rCa>rMg e rCL>rHCO₃>rSO₄.

A vulnerabilidade da água subterrânea é de maneira geral, de moderada a baixa e sua distribuição espacial apresenta valores menores, na parte sul da área, nos platôs.

As reservas da água subterrânea são expressivas, com volumes de $226 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a reserva reguladora e $86\,550 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a reserva permanente. Além da magnitude das reservas, os recursos exploráveis têm grande potencial de recarga induzida.

Os custos unitários de exploração da água subterrânea decrescem com o aumento da profundidade dos poços nos aquíferos livre e confinados; variando de R\$ 0,0657 / m^3 a R\$ 0,0727 / m^3 , para poços de até 300 m de profundidade.

Os estudos comparativos mostram que os custos de exploração unitário da água subterrânea de Santarém estão compreendidos entre 38,4 % a 42,5 % do custo de exploração unitário da água superficial de Manaus e entre 64,5 % a 71,3 % do custo unitário de exploração da água superficial de Oriximiná.

Os aquíferos confinados encontram-se naturalmente bem protegidos, com excelentes condições para abastecimento público, podendo ser os poços locados no perímetro urbano, sem restrição e não necessitando de grandes áreas de proteção; devem ser esses poços, adequadamente isolados com cimentação do espaço anular na parte superior até a profundidade da camada confinante.

Mesmo considerando as condições favoráveis de captação da água superficial, os custos de captação da água subterrânea são inferiores, com menores investimentos iniciais e com a vantagem de poderem ser escalonados, se ajustando melhor ao aumento da demanda.

ABSTRACT

Investigations carried out in the region of Santarém, in an area of 900 km², outlined the hydrogeological conditions, and the technical and economic aspects for a wise use of groundwater .

The region within equatorial humid climate has a mean annual precipitation of 1,911.2 mm.

The mean annual discharge of São Brás stream in 147.78 km² of drainage area was 2.17 m³/s and the base flow has the annual volume of 37.0 x 10⁶ m³.

The aquifers consist of Quaternary alluvial sands of little areal distribution, and of Cretaceous sands, sandstones, and gravel of the Alter do Chão Formation, which are widely distributed in the whole area.

The thickness of the hydrogeological system of the Alter do Chão Formation is 600 m. In the upper part the aquifer is unconfined, with an average thickness of 50 m, and underlying it, confined aquifers with a total thicknesses of 430 m, interbedded with aquicludes and/or aquitards.

The hydraulic characteristics have been determined through pumping tests. The hydrodynamic parameters reveals that the transmissivity values range from 130 to 790 m²/day, showing large capacity of groundwater yield.

The groundwater quality has shown very low concentrations of chemical constituents in solution, within the standards of potability; whereas the hydrogeochemical characterization classifies the waters into sodium-chloride type, and no dominant type, both for cations and anions. The concentration of the main ionic species in solution show the following relationship: rNa>rCa>rMg and rCl>rHClO₃>rSO₄.

The vulnerability of groundwater range generally from moderate to low, being the lowest values found in the southern part of the area, in the plateau.

The groundwater reserves are significant, $226 \times 10^6 \text{ m}^3$ as renewable reserves, and $86\,500 \times 10^6 \text{ m}^3$ as permanent reserves. Besides the magnitude of the reserves, the exploitable resources bear a high potential for induced recharging.

The unitary cost of groundwater exploitation in the Santarém region indicates that they decrease with the wells depth in the unconfined and confined aquifers, ranging from R\$ 0.0657/m³ to R\$ 0.0727/m³, for wells down to 300 m .

A comparison between exploitation costs shows that the Santarém groundwater cost ranges from 38.4 % to 42.5 % of the cost for Manaus superficial water, and from 64.5 % to 71.3 % for that in Oriximiná.

The confined aquifers are naturally well protected, with excellent conditions for a public water system. There are no restrictions as for the location of wells in urban areas, and no large wellhead protection areas are necessary. The wells must be adequately isolated with upper part of the annular space cemented down to the confining layer.

Even considering the favorable superficial water exploitation conditions, the initial expenditures and time spent for the building of the facilities in groundwater exploitation, are much lower. Another advantage of groundwater use is that as the water demand increases the system can be adjusted accordingly to that demand.

1 - INTRODUÇÃO

A utilização da água subterrânea vem crescendo em todo o globo, tanto para abastecimento público como para abastecimento industrial e irrigação. No Brasil tem-se observado um grande aumento no aproveitamento da água subterrânea, nestas últimas décadas.

Na Região Amazônica observa-se esse crescimento e a perspectiva é de um aumento ainda maior na exploração da água subterrânea. Nesta região, privilegiada em recursos hídricos, tanto superficiais como subterrâneos, a utilização da água subterrânea apresenta vantagens práticas e econômicas em relação à água superficial, a água subterrânea pode ser captada no local onde se faz necessária e dispensa o tratamento.

A pesquisa sistemática dos recursos hídricos subterrâneos, em função de sua demanda, conduz à locação de poços nas áreas mais favoráveis, com melhores rendimentos, resultando no menor custo do m³ de água explorada. A água subterrânea é encontrada nas rochas da crosta terrestre, e assim, para uma compreensão adequada desse tipo de recurso em uma área, torna-se necessário compreender sua geologia.

Um aspecto importante na pesquisa e exploração da água subterrânea é o conhecimento técnico das pessoas envolvidas. Um programa tanto de pesquisa, como de utilização da água subterrânea, para seu completo êxito, deve contar com pessoal qualificado em hidrogeologia.

Atualmente as captações da água subterrânea para abastecimento público, em sua maioria, são locadas aleatoriamente e, às vezes, em áreas vulneráveis à contaminação. Segundo dados estatísticos (IBGE, 1991), 96% das cidades paraenses são abastecidas por água subterrânea, entretanto, o nível tecnológico das captações ainda é muito baixo.

A água subterrânea, além de constituir-se num importante recurso para utilização é também um constituinte fundamental do meio ambiente e de sua conservação. A proteção dos recursos hídricos subterrâneos não foi ainda implementada nesta região, não se notando preocupação alguma nesse sentido, tanto por parte dos órgãos de administração urbana como pelos órgãos de proteção ao meio ambiente.

A situação atual da exploração dos recursos de água subterrânea é pois marcada por um imediatismo. Não há um planejamento técnico que faça uma análise mais aprofundada das condições hidrogeológicas buscando otimizar a utilização da água subterrânea, que conseqüentemente seria obtida por um custo bem menor. A preocupação, geralmente é de atender apenas as necessidades do momento. Melhores resultados seriam obtidos através da coordenação entre os órgãos de pesquisa e os órgãos ou companhias que utilizam recursos hídricos subterrâneos, a fim de que, em função da demanda da água subterrânea, se possa procurar a melhor solução sob o ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Muitos perfuradores de poços que atuam nesta região nem mesmo aplicam completamente as normas técnicas sobre construção de poços, propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Deve-se ressaltar ainda que não há nenhum tipo de fiscalização técnica ou legal dos poços perfurados para exploração da água subterrânea.

Não existe sequer uma legislação em nível estadual (no Pará e demais estados da Amazônia) que regulamente a construção de poços tubulares e obtenção dos dados técnicos dos mesmos. Assim, muitas informações importantes, como os perfis dos poços e outros dados hidrogeológicos, que atualmente acabam sendo perdidos com o tempo, seriam registrados e utilizados posteriormente como fonte de informações para construção de poços, com maior embasamento técnico.

Os órgãos de pesquisa e utilização de recursos hídricos têm demonstrado interesse em relação aos estudos sobre água subterrânea, havendo já alguns trabalhos importantes. São contudo esparsos. Não há ainda uma política de pesquisa da água subterrânea definida em função de sua demanda. Deve-se destacar o pioneirismo do Instituto do Desenvolvimento Econômico-Social do Pará - IDESP nas pesquisas hidrogeológicas desta região e o apoio da Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM, a qual tem contribuído com recursos através de convênios e também executado pesquisas de recursos hídricos na Amazônia.

Programas de avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, visando sua preservação e utilização racional tornam-se indispensáveis para melhor promover o desenvolvimento da região. O gerenciamento da água subterrânea, que com a Carta Magna de 1988 passou a ser de competência estadual, deve ser precedido de ações que conduzam a uma utilização racional. A condição fundamental para que a gestão dos recursos de água subterrânea se realize é a decisão política para sua efetiva implantação.

A implementação de projetos para aproveitamento da água subterrânea é fundamental para melhorar a qualidade de vida das populações da Amazônia, ao mesmo tempo que constitui a solução mais econômica.

A escolha da região de Santarém para estes estudos foi determinada pela possibilidade de se tentar desenvolver um modelo institucional de utilização da água subterrânea.

Esta tese teve sua elaboração viabilizada através do Projeto Recursos Hídricos de Santarém e Hidrogeoquímica Ambiental do Rio Tapajós, da SUDAM, que forneceu subsídios para o seu desenvolvimento. A maioria das atividades foram realizadas no Centro de Hidroclimatologia e Sensoriamento Remoto da Amazônia, da SUDAM, em Belém.

1. 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA

A área estudada corresponde à região de Santarém, situada entre os paralelos de 2° 20' S a 2° 40' S e entre os meridianos de 54° 35' W a 55° 05' W, com uma superfície aproximada de 900 km². A Figura 1.1 mostra sua localização, na parte oeste do Estado do Pará; pertence à mesorregião nº 011 do Baixo Amazonas e à microrregião nº 032 de Santarém. A cidade de Santarém está localizada à margem direita da confluência dos rios Tapajós e Amazonas.

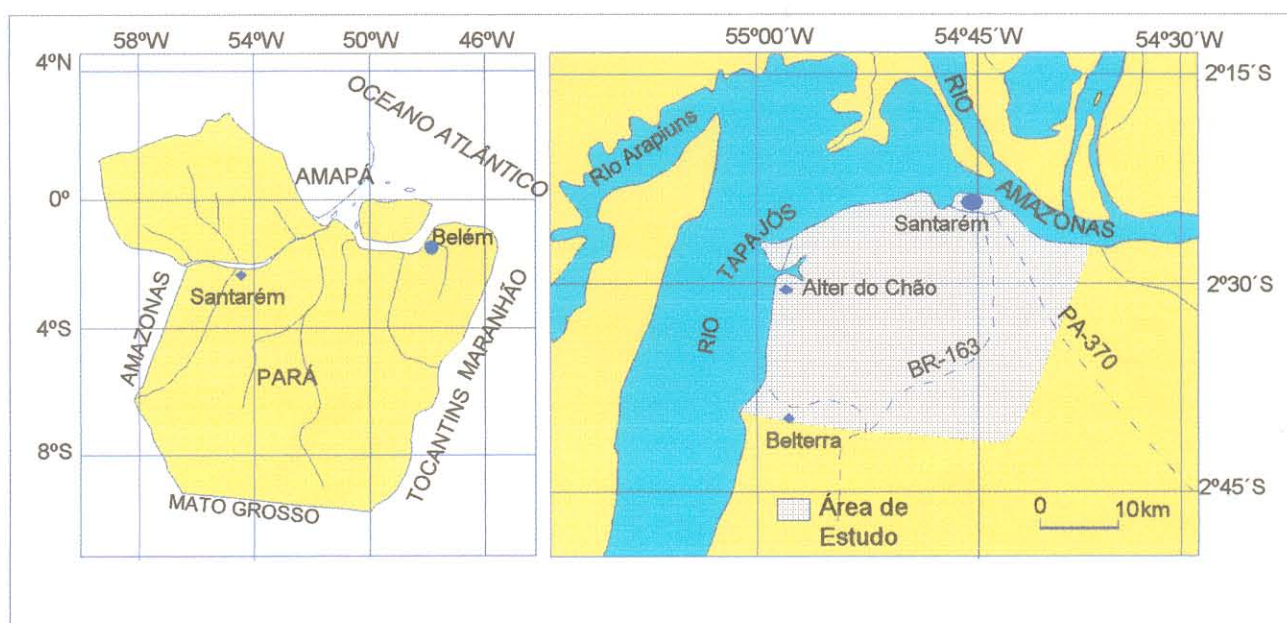


Figura 1.1 - Localização geral e da área pesquisada.

1.2 - OBJETIVOS

Avaliar, em termos técnicos e econômicos, os recursos hídricos subterrâneos da região de Santarém.

Estabelecer um modelo institucional para utilização desses recursos.

Fornecer dados e orientação aos órgãos de gestão e utilização de recursos hídricos.

1.3 - METODOLOGIA

A metodologia compreendeu:

A fotointerpretação da área, com auxílio de fotografias aéreas, imagens de radar e de satélites.

Obtenção dos dados hidrogeológicos básicos através: do inventário de poços; das amostragens e análises físico-químicas da água; das amostragens e análises granulométricas do sedimento; das execuções de ensaios de bombeamento; da instalação e operação de dois postos fluviométricos na bacia hidrográfica do igarapé São Brás, com medições de cotas fluviométricas diárias e descargas líquidas em várias épocas.

Avaliação dos custos de perfuração, de instalação e de operação de poços.

Avaliação da vulnerabilidade e proteção da água subterrânea.

Definição de parâmetros de proteção de poços.

Análise conceitual de gestão para uso e proteção da água subterrânea da região de Santarém.

2 - ELEMENTOS HIDROCLIMÁTICOS

O potencial de recursos hídricos subterrâneos de uma região é condicionado por fatores climáticos e geológicos. Os fatores climáticos relacionam-se à alimentação da água subterrânea, enquanto que, os fatores geológicos indicam o modo de ocorrência e disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos.

2.1 - QUADRO CLIMÁTICO

A região de Santarém está localizada no domínio de clima equatorial úmido do tipo *Am*, segundo a classificação de Köppen (SUDAM, 1984).

Conforme dados que são apresentados na Tabela 2.1 e na Figura 2.1 referentes à estação meteorológica de Belterra, situada na área destas pesquisas, no período de 1967 a 1990 (DNMET, 1992) as características climáticas mostram que a precipitação pluviométrica anual média é de 1911,2 mm e a temperatura anual média de 24,8 °C. O período chuvoso mais intenso concentra-se nos meses de fevereiro a maio e o período mais seco de agosto a novembro.

Os parâmetros climáticos da Tabela 2.1 são valores médios mensais e o valor médio anual para a temperatura e umidade relativa e o total anual médio para a precipitação pluviométrica, a evaporação e a insolação.

Tabela 2.1 - Parâmetros climáticos médios mensais e anual da estação meteorológica de Belterra, no período de 1967 a 1990.

	Temperatura Média (°C)	Precipitação Pluviométrica Total (mm)	Evaporação Total (mm)	Umidade Relativa (%)	Insolação Total (H)
janeiro	24,7	183,5	77,9	90,0	158,2
fevereiro	24,5	258,3	57,2	92,0	122,4
março	24,5	302,8	60,3	92,0	128,7
abril	24,7	283,4	53,2	92,0	128,7
maio	24,5	264,5	52,7	93,0	198,6
junho	24,4	125,7	59,6	92,0	188,2
julho	24,2	93,5	72,8	90,0	228,8
agosto	27,7	52,4	88,6	88,0	251,2
setembro	25,3	41,8	100,0	87,0	240,4
outubro	25,8	47,6	118,1	86,0	232,0
novembro	25,7	77,3	118,5	85,0	203,4
dezembro	25,3	180,4	100,6	87,0	179,3
Média Anual	24,8			90,0	
Total Anual		1911,2	959,5		2219,0

Fonte: DNMET (1992).

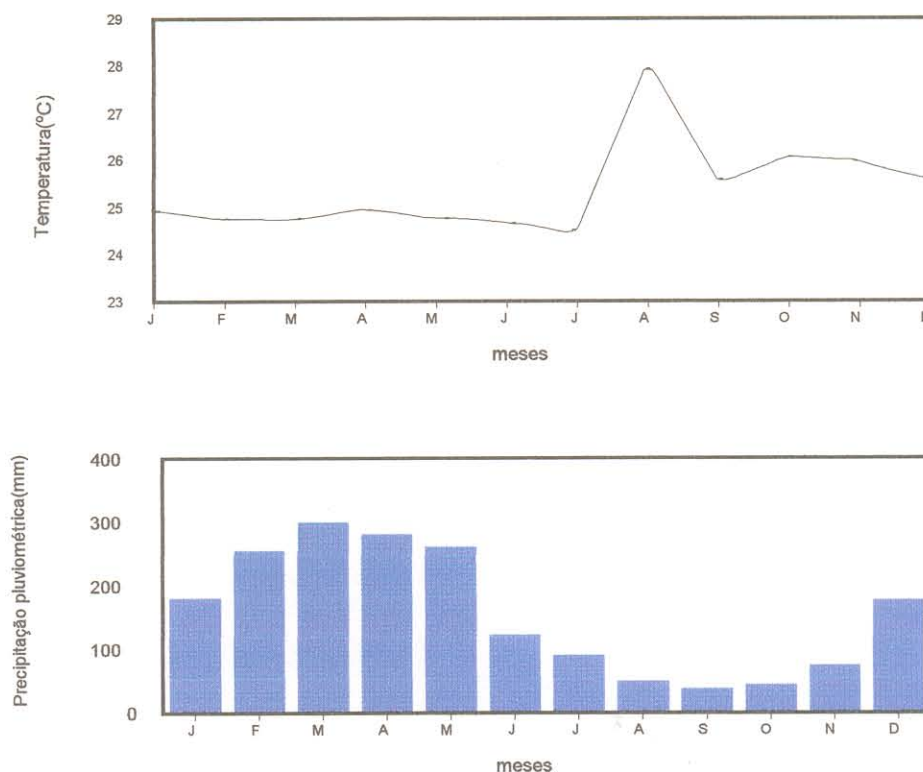


Figura 2.1 - Distribuição mensal média da temperatura anual e da precipitação pluviométrica anual, no período de 1967 a 1990, da estação meteorológica de Belterra (baseado em DNMET, 1992).

2.2 - QUADRO HIDROLÓGICO

A região de Santarém situa-se na bacia hidrográfica do rio Amazonas. Mesmo sendo chamada e definida como mesorregião do Baixo Amazonas, a localização desta região é na parte do médio rio Amazonas. A descarga líquida anual média do rio Tapajós em sua foz, localizada em Santarém é de 13 540 m³/seg e a descarga líquida anual média do rio Amazonas em Óbidos, situado a 130 km a montante de Santarém é de 165 740 m³/seg (MOLINIER, et al 1992).

2.2.1 - Características Hidrológicas

A região de estudo compreende pequenas bacias hidrográficas, que alimentam diversos igarapés, os quais desaguam no rio Tapajós e no rio Amazonas. Essa área é drenada pelos igarapés Grande, São Brás, Irurá, Urumari, Mararu e outros menores, conforme é mostrado na Figura 2.2. O nível de base dessa drenagem está associado ao nível dos rios Tapajós e Amazonas.

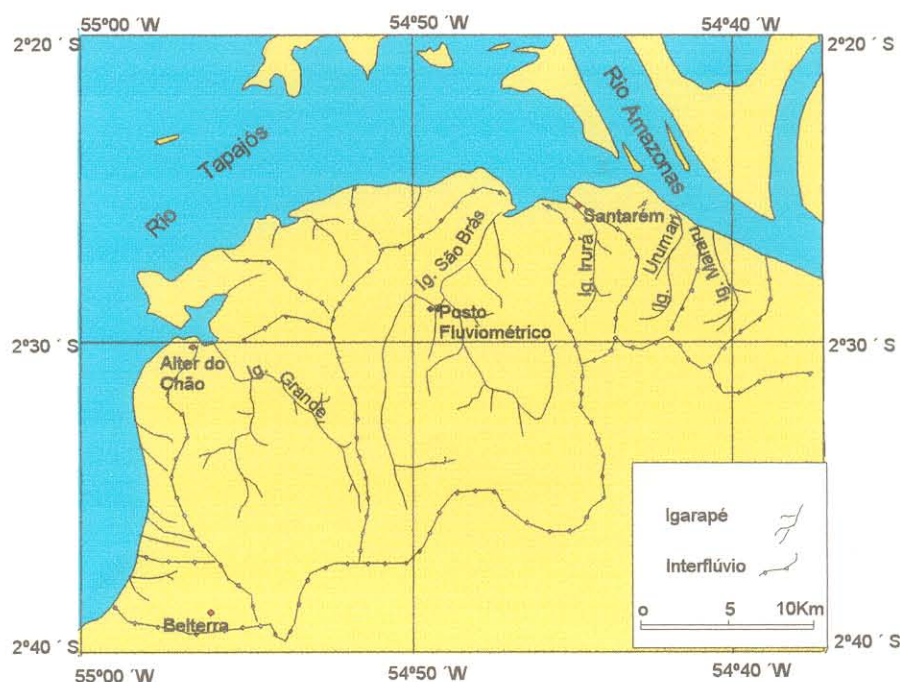


Figura 2.2 - Bacias hidrográficas da região de Santarém.

No âmbito do estudo, o igarapé São Brás, cuja bacia de drenagem é de 197,2 km², foi monitorado com o objetivo de se estabelecer o balanço hídrico. O posto fluviométrico, situado em seu médio curso, abrange uma área de drenagem de 147,78 km², na qual foi avaliada a entrada e a saída de água. A entrada consiste na

renovação dos recursos em água, através da precipitação pluviométrica, enquanto que a saída representa a descarga líquida e a evapotranspiração.

O fluxo de água ou descarga líquida que foi determinado no posto fluviométrico do igarapé São Brás é o volume que escoar na unidade de tempo através da seção transversal a qual é representada na Figura 2.3. Os valores da descarga são calculados pela equação seguinte:

$$Q = A v_m$$

onde:

$$Q = \text{descarga líquida (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$$

$$A = \text{área da seção molhada (L}^2\text{)}$$

$$v_m = \text{velocidade média da corrente na seção (LT}^{-1}\text{)}$$

A descarga líquida anual média obtida foi de 2,17 m³/seg. A descarga específica da bacia é a descarga líquida por unidade de área (L³T⁻¹ L⁻²). Seu valor determinado foi de 14,69 L/seg.km².

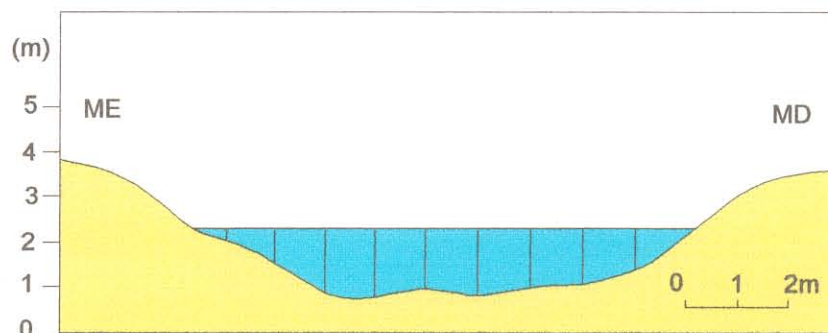


Figura 2.3 - Seção de medição do igarapé de São Brás.

A Tabela 2.2 apresenta as principais características hidrológicas e fisiográficas da bacia do igarapé São Brás. Os parâmetros de descarga são relativos ao ano de 1993, não se dispondo ainda de dados para um período mais longo.

Tabela 2.2 - Características hidrológicas e fisiográficas da bacia do igarapé São Brás.

Área Total	197,20 km ²
Área Controlada	147,78 km ²
Extensão Total	25 km
Descarga Líquida Anual Média	2,17 m ³ /seg
Descarga Específica Média	14,69 L/seg.km ²

2. 2. 2 - Avaliação do Fluxo de Base

A descarga líquida dos rios é constituída por três componentes principais (desprezando-se a pequena parte da precipitação pluviométrica que cai diretamente sobre o corpo de água superficial), podendo ser assim equacionada:

$$Q = Q_{\text{sup}} + Q_{\text{sub}} + Q_{\text{base}}$$

onde:

$$Q = \text{descarga líquida total (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{\text{sup}} = \text{descarga líquida devido ao escoamento superficial (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{\text{sub}} = \text{descarga líquida devido ao escoamento sub-superficial (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$$

$$Q_{\text{base}} = \text{descarga líquida devido ao escoamento de base (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$$

O escoamento sobre a superfície do terreno ocorre quando a intensidade da precipitação pluviométrica ultrapassa a capacidade de infiltração do solo (HORTON, 1933). Após a infiltração no terreno uma parte da água que se infiltra na zona não saturada vai alimentar o curso d'água e constitui o escoamento sub-superficial, outra parte se infiltra até a zona saturada e é por esta restituída ao curso d'água, a qual constitui o fluxo de base.

A avaliação da descarga da água subterrânea na bacia do igarapé São Brás baseou-se no conceito de depleção do fluxo de base. O escoamento de base relaciona-se ao volume da água pluvial que se infiltrou no terreno da bacia hidrográfica e atingiu a zona saturada no período chuvoso imediatamente anterior.

Diversos autores (CONKLING, 1946; MEYBOOM, 1961; FARVOLDEN, 1963; INESON & DOWNING, 1964) utilizaram hidrogramas de depleção do fluxo de base em estudos do fluxo da água subterrânea.

O processo físico de liberação da água subterrânea segue uma lei exponencial do tipo:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

onde:

Q_0 = descarga líquida do curso d'água no início do desenvolvimento da curva de depleção (L^3T^{-1}).

Q_t = descarga líquida do curso d'água ao fim de um período de tempo t dado em dias (L^3T^{-1}).

e = base neperiano.

α = coeficiente de depleção específica; o coeficiente α tem dimensão do inverso do tempo (T^{-1}).

A validade dessa equação pode ser confirmada teoricamente (BOUSSINEQ, 1904; HALL, 1968; SINGH, 1969). O processo de esgotamento pode ser simulado como o equivalente ao esvaziamento de um reservatório cheio de água através de uma tampa porosa.

A Figura 2. 4 mostra essa simulação para a depleção da água subterrânea:

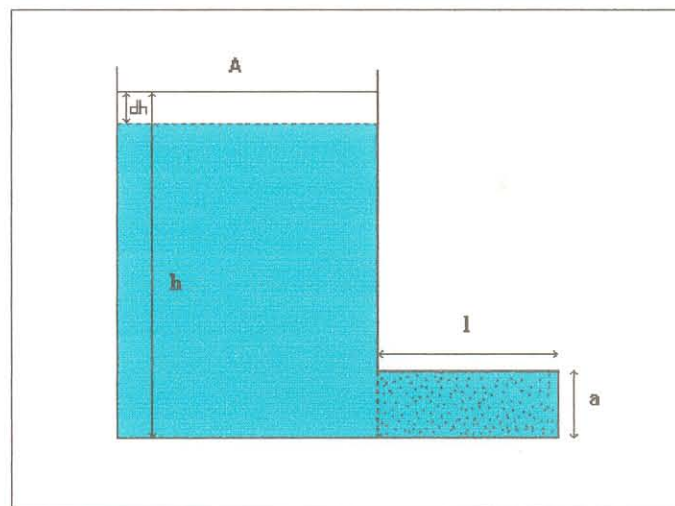


Figura 2.4 - Esquema de depleção da água subterrânea.

onde:

A = área do reservatório (L^2).

a = seção da tampa (L^2).

l = comprimento da tampa (L).

h = altura da coluna de água (L).

O fluxo de água através da tampa porosa pode ser calculado pela Lei de Darcy:

$$q = \frac{h}{l} a$$

Se a descarga durante o intervalo de tempo dt rebaixa o nível de água dh , no reservatório, com a permeabilidade k da tampa porosa, temos :

$$dq = k \frac{a}{l} dh$$

$$A dh = -q dt$$

portanto:

$$\frac{dq}{dt} + \alpha q = 0$$

sendo:

$$\alpha = \frac{ka}{lA}$$

integrando, resulta:

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t}$$

portanto:

$$-\alpha t = \ln \frac{Q}{Q_0}$$

e:

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \frac{Q}{Q_0}$$

A Figura 2.5 apresenta o hidrograma do igarapé São Brás no ano de 1993, representa a distribuição diária de seu fluxo (descarga líquida), que escoou através da seção de medição, ao longo desse ano. Após um certo tempo do início do

decréscimo da descarga líquida, as contribuições dos escoamentos superficial e sub-superficial cessam e o fluxo do curso d'água é alimentado pela restituição da água subterrânea, constituindo isto a depleção.

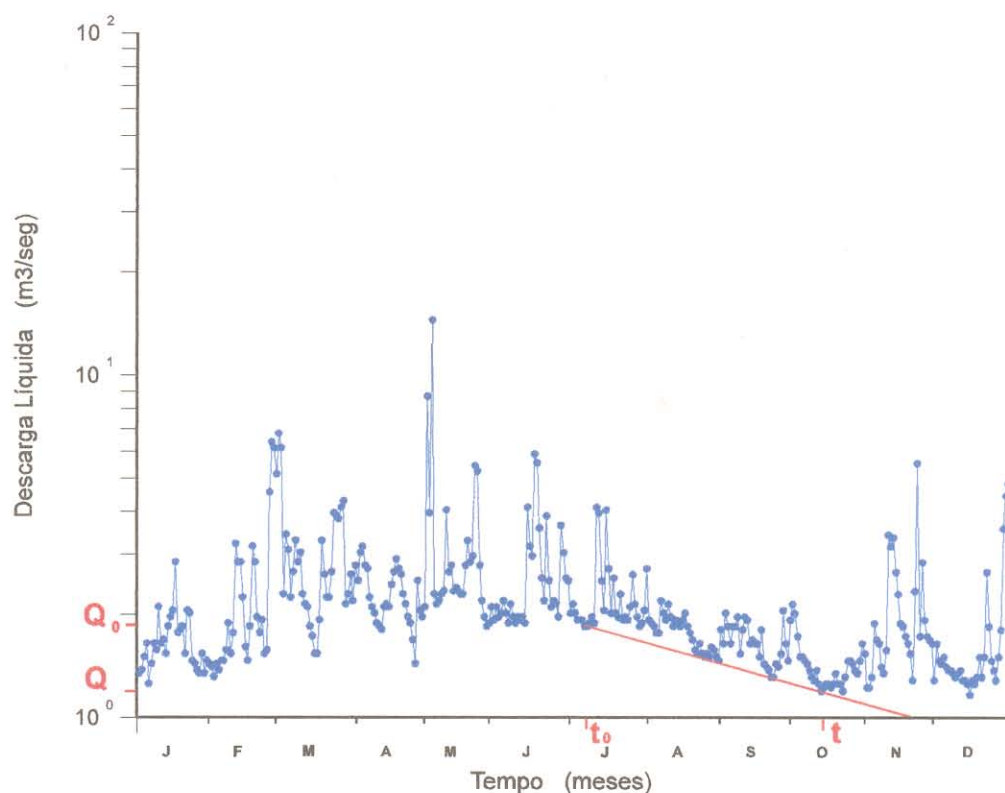


Figura 2.5 - Hidrograma do igarapé São Brás no ano de 1993.

Com a utilização do hidrograma da seção de medição do igarapé São Brás, mostrado da Figura 2. 5, obtém-se diretamente os valores de Q_0 , t_0 , Q , t , e calcula-se o coeficiente de depleção α . Estes valores são apresentados a seguir na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de descargas do período de depleção do igarapé São Brás e os respectivos dias, intervalo de tempo e coeficiente de depleção específica, para o ano de 1993.

Parâmetro	Unidade	Valor
t_0	Data	06/ 07/ 1993
t	Data	13/ 10/ 1993
dt	Dia	100
Q_0	$m^3 seg^{-1}$	1,85
Q	$m^3 seg^{-1}$	1,20
α	Dia^{-1}	$4,32 \times 10^{-3}$

O volume da água subterrânea armazenada é dado por:

$$V = \int Q dt = \frac{Q_0 e^{-\alpha t}}{\alpha}$$

Portanto o volume da água subterrânea armazenada no momento t_0 é dado por:

$$V_0 = \frac{Q_0}{\alpha}$$

sendo o volume de água subterrânea liberada através do escoamento de base.

No exemplo da bacia do igarapé São Brás (Figura 2.5), Q_0 é dado em m^3/seg ; com sua transformação em m^3/dia , tem-se:

$$V_0 = \frac{Q_0 \cdot 86400}{\alpha}$$

portanto:

$$V_0 = 37,0 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Assim, no ano de 1993, o volume de $37,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ representa o componente do escoamento de base, ou seja, a parte da água da chuva que se infiltrou no terreno, atingiu a zona de saturação do aquífero e foi restituída sendo drenada pelo igarapé São Brás para jusante do posto fluviométrico (seção de medição).

Deve-se ressaltar que esse valor obtido corresponde somente ao ano de 1993 e pode variar de um ano para outro, em função da variação dos parâmetros hidroclimáticos. Um valor médio para um período maior ainda não é possível se obter.

A obtenção dos valores de todos os componentes da descarga líquida total do igarapé São Brás ainda não é possível, pois a separação dos componentes da descarga líquida devido ao escoamento superficial e subsuperficial requer trabalhos hidrométricos específicos durante as precipitações pluviométricas.

A Tabela 2.4 apresenta os valores da precipitação pluviométrica, da descarga líquida total, da descarga líquida devida ao escoamento de base e as relações entre esses parâmetros, no ano de 1993. Esses valores são expressos em volume (m^3), lâmina d'água (mm) e percentagens (%). A precipitação pluviométrica utilizada é a da estação meteorológica do aeroporto de Santarém, situada na bacia hidrográfica do igarapé São Brás, e gentilmente cedida pelo Ministério da Aeronáutica.

Tabela 2.4 - Precipitação pluviométrica, descarga líquida total e descarga líquida devido ao escoamento de base e suas relações, para a bacia do igarapé São Brás, até o posto fluviométrico, no ano de 1993.

	Precipitação Pluviométrica (P)	Descarga Líquida Total (Q)	Descarga Líquida do Escoamento de Base (Q _{base})
Volume (m ³)	308,7 x 10 ⁶	68,6 x 10 ⁶	37,0 x 10 ⁶
Lâmina de Água (mm)	2.089,2	463,8	250,5
Relação com a Pluviometria	100% P	22,2% P	12,0% P
Relação com a Descarga Líquida Total		100% Q	53,9 % Q

A descarga líquida total do igarapé São Brás é 22,2 % da precipitação pluviométrica. A descarga líquida devido ao escoamento de base é 12,0 % da precipitação pluviométrica e 53,9 % da descarga líquida total desse curso d'água.

2.3 - BALANÇO HÍDRICO

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.

Em uma bacia hidrográfica em que haja coincidência dos interflúvios ou divisores de água, superficial e subterrâneo e na qual não haja fluxo de água subterrânea entrando ou saindo para as bacias vizinhas, a equação do balanço hídrico para um período anual, pode ser escrita:

$$P - Q - ER - \Delta S_{AS} - \Delta S_{AG} = 0$$

ou:

$$P = Q + ER + \Delta S_{AS} + \Delta S_{AG}$$

onde:

P = precipitação pluviométrica

Q = descarga líquida do rio principal da bacia hidrográfica.

ER = evapotranspiração real

ΔS_{AS} = mudança no armazenamento do reservatório de água superficial.

ΔS_{AG} = mudança no armazenamento do reservatório de água subterrânea.

Normalmente os valores desses parâmetros são apresentados em coluna de lâmina de água (mm). Se esses valores médios forem de vários anos de registro, pode-se assumir que:

$$\Delta S_{AS} = \Delta S_{AG} = 0$$

e a equação torna-se:

$$P = Q + ER$$

O valor da precipitação pluviométrica menos a descarga líquida (P-Q) é chamado déficit de escoamento. Esse valor deve ser igual ao da evapotranspiração real (ER) média.

A Tabela 2.5 apresenta o balanço hídrico obtido pelo método de Thornthwaite (THORNTHWAITE & MATHER, 1955), considerando a reserva hídrica (RH) no solo de 150 mm, com os dados médios da estação de Belterra, no período de 1967 a 1990 (DNMET, 1992). Esse balanço utiliza em seus cálculos os parâmetros climáticos. Consta na determinação desse balanço, os valores mensais da temperatura (TEMP), da pluviometria (P), e da evapotranspiração potencial (EP), medidas na estação meteorológica. O valor da evapotranspiração potencial (EP) resulta igual ao valor da evapotranspiração real mais a deficiência anual de umidade (DEF). Por sua vez, o valor da precipitação pluviométrica (P) resulta igual ao da evapotranspiração potencial (EP) mais o excesso de água (EXC) menos a deficiência anual de umidade (DEF).

A Tabela 2.6 apresenta um balanço hídrico para essa região, obtido pelo método de Thornthwaite, com os dados da estação meteorológica do aeroporto de Santarém no ano de 1993, com os dados médios da estação meteorológica de Belterra no período de 1967 a 1990 e associado a esses valores são apresentados os da bacia do igarapé São Brás no ano de 1993. Esse balanço é apresentado para os valores anuais. As diferenças que se observam nesses balanços resultam de os valores da estação do aeroporto no ano de 1993 serem maiores que os valores médios da estação meteorológica de Belterra, em um período de mais de 20 anos. Assim, os volumes armazenados na bacia do igarapé São Brás, tanto para água superficial como para água subterrânea, serão diferentes, e o valor da evapotranspiração é obtido com o cálculo de fórmulas empíricas, sendo tomada uma reserva hídrica de 150 mm de solo.

O balanço da Tabela 2.5 indica que há excesso de água no período de fevereiro a junho, no qual deve ocorrer recarga da água subterrânea e escoamento do componente da descarga sub-superficial. O excesso de água atinge nesse balanço o

valor de 704 mm. Um balanço semelhante, porém, considerando-se o ano de 1993 e a partir dos dados da estação meteorológica do aeroporto, o valor desse excesso de água resulta em 630 mm. Assim, a diferença entre a evapotranspiração real calculada pelo método de Thornthwaite e o déficit de escoamento da bacia do igarapé São Brás (Tabela 2.6) é de 10,2%.

Tabela 2.5 - Balanço hídrico para uma reserva hídrica de 150 mm de solo
(adaptado de THORNTHWAITE & MATHER, 1955).

ALTITUDE: 176 m		LONGITUDE: 54°-57'-W		LATITUDE: 02°-38'-S		
ESTAÇÃO: BELTERRA		MUNICÍPIO: Santarém		UF: PA		
MÊS	TEMP (°C)	EP (mm)	P (mm)	ER (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
JAN	24.7	110	184	110	0	0
FEV	24.5	99	258	99	0	154
MAR	24.5	109	303	109	0	194
ABR	24.7	105	283	105	0	178
MAI	24.5	108	265	108	0	157
JUN	24.4	105	126	105	0	21
JUL	24.2	102	94	102	0	0
AGO	27.7	150	52	121	29	0
SET	25.3	120	42	75	45	0
OUT	25.8	134	48	66	68	0
NOV	25.7	122	77	82	40	0
DEZ	25.3	126	180	126	0	0
ANO	25.1	1390	1912	1208	182	704

O balanço hídrico da Tabela 2.6 compara os valores obtidos experimentalmente na bacia do igarapé de São Brás aos valores experimentais e teoricamente calculados para a evapotranspiração real pelo método de Thornthwaite.

Tabela 2.6 - Balanço hídrico anual da região de Santarém.

	Bacia do Igarapé São Brás (1993)	Estação Meteorológica do Aeroporto (1993)	Estação Meteorológica de Belterra (1967 - 1990)
Precipitação Pluviométrica (P) (mm)	2089,2	2089,2	1911,2
Descarga Líquida Total (Q) (mm)	463,8		
Evapotranspiração Real Calculada (ER) (mm)		1459	1208
Déficit de Escoamento (P-Q) (mm)	1625,4		

Os valores referente às medidas hidrológicas são mais consistente em termos de recarga efetiva dos recursos hídricos renováveis da região.

3 - QUADRO GEOLÓGICO

A geologia constitui o arcabouço por onde a água subterrânea circula e se armazena controlando sua natureza e distribuição. A litologia forma a parte física, incluindo suas estruturas e sua composição mineral. As formas do terreno resultantes dos processos geomorfológicos condicionam em parte a circulação da água durante o escoamento superficial e a infiltração a partir da superfície do terreno.

As formações geológicas constituem as grandes unidades geométricas e cronológicas que governam o comportamento da água subterrânea na crosta terrestre.

3.1 - GEOLOGIA REGIONAL

Conforme mostra a Figura 3.1, a grande unidade geotectônica nessa região é constituída pela Sinéclise do Amazonas, a qual originou-se a partir do final do Pré-Cambriano e início do Paleozóico, com diversos ciclos deposicionais. A Bacia do Amazonas está contida na parte central da sinéclise. Na concepção de CUNHA et al (1994) reúne as anteriormente chamadas Bacias do Médio e Baixo Amazonas (CAPUTO, 1984).

A Bacia Sedimentar do Amazonas é intracratônica, com cerca de 500 000 km², abrange parte dos estados do Pará e Amazonas, sendo limitada ao norte pelo Escudo das Guianas e ao sul pelo Escudo Brasileiro. A parte leste limita-se com a Bacia da Foz do Amazonas, pelo Arco de Gurupá e a parte oeste limita-se com a Bacia do Solimões pelo Arco de Purus.

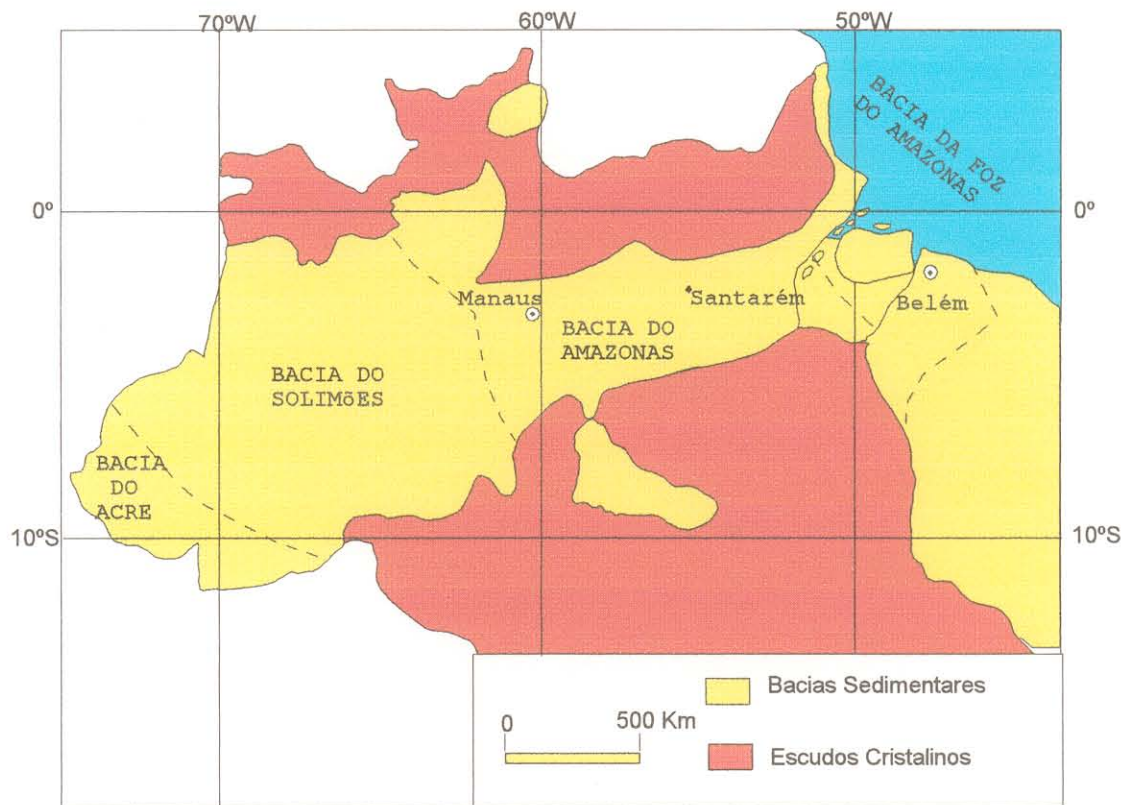


Figura 3.1 - Localização da bacia sedimentar do Amazonas (adaptado de CUNHA et al, 1994).

A Figura 3.2 apresenta o sumário da litoestratigrafia, ressaltando-se que o pacote de rochas sedimentares atinge 5 000 m de espessura com três ciclos deposicionais no Paleozóico, em ambiente marinho que passa a continental no final do Permiano e um ciclo deposicional Mesozóico-Cenozóico em ambiente continental. Esses ciclos deposicionais são limitados por discordâncias ligadas a episódios orogênicos.

O embasamento cristalino subjacente e aflorante nas margens da bacia sedimentar com o Escudo das Guianas situado ao norte e o Escudo Brasileiro ao sul é caracterizado por rochas ígneas e rochas metamórficas de diversos graus de metamorfismo, apresentando variada litologia, tais como: granitos, granodioritos, riólitos, dacitos, andesitos, gnaisses, quartzitos, xistos.

As unidades basais paleozóicas assentam-se em discordância sobre o embasamento cristalino, ou recobrem em parte as rochas do Grupo Purus, constituído pela Formação Prosperança com arenitos e siltitos, e recobrimdo esta a Formação Acari com calcários, dolomitos, siltitos e argilitos (CAPUTO et. al, 1972). Estas formações são limitados por discordâncias e suas rochas são consideradas de idade pré-cambriana.

A região de Santarém situa-se na parte central da bacia sedimentar, com exposição da Formação Alter do Chão, depositadas em ambiente continental durante o Cretáceo com rochas clásticas, que apresenta localmente espessura de 600 m e pelos sedimentos dos depósitos aluviais quaternários, os quais recobrem parcialmente essa formação (vide item 3.2). A espessura dos depósitos aluviais apresenta espessura de 20 m, nos baixos cursos dos igarapés dessa área, sendo mais espessa na planície aluvial do rio Amazonas. As rochas das demais unidades geológicas encontram-se em sub-superfície.

ERA	PERÍODO	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	
CENOZÓICA	QUATERNÁRIO		ALUVIÕES	Argilas, Siltes, Areias e Cascalhos	
	TERCIÁRIO	JAVARI	SOLIMÕES	Argilitos vermelhos e cinzentos	
MESOZÓICA	CRETÁCEO		ALTER DO CHÃO	Arenitos, Siltitos, Argilitos, Conglomerados	
	JURÁSSICO				
		DIABÁSIO PENATECAUA	Diabásios finos a grosseiros		
TRIÁSSICO					
PALEOZÓICA	PERMIANO		ANDIRÁ	Siltitos vermelhos e verdes, Arenitos, Folhelhos	
	CARBONÍFERO	TAPAJÓS	NOVA OLINDA	Evaporitos: Halitas, Anidritas	
			ITAITUBA	Calcários, Margas	
			MONTE ALEGRE	Arenitos, Siltitos e Folhelhos	
	DEVONIANO	CURUÁ	FARO	Arenitos finos e grosseiros	
			ORIXIMINÁ	Arenitos, Pelitos	
			CURIRI	Diamictitos, Folhelhos e Siltitos	
			BARREIRINHA	Folhelhos pretos	
		URUPADI	ERERÊ	Siltitos, Folhelhos, Arenitos	
			MAECURU	Arenitos, Pelitos	
		SILURIANO	TROMBETAS	MANACAPURU	Arenitos, Pelitos
	PITINGA			Folhelhos, Diamictitos	
	NHAMUNDÁ			Arenitos	
	AUTÁS-MIRIM			Arenitos e Folhelhos	
	ORDOVICIANO				
	CAMBRIANO				
	PRÉ-CAMBRIANO (Indiferenciado)		PURUS	ACARI	Calcários e Dolomitos.
				PROSPERANÇA	Arenitos, Siltitos, Argilitos, Arcósios
			Granitos, Gnaisses, Riólitos, Andesitos, Granodioritos, Dacitos, Quartzitos, Xistos.		

Figura 3.2 - Sumário da estratigrafia da bacia sedimentar do Amazonas (adaptado de CUNHA et al, 1994).

3. 1. 1 - Formações Paleozóicas

A sedimentação paleozóica iniciou-se com o Grupo Trombetas, em ambiente marinho do final do Ordoviciano ao início do Devoniano. Este grupo é formado pela Formação Autás-Mirim com arenitos e folhelhos, depositada durante o Ordoviciano; pela Formação Nhamundá com arenitos e pela Formação Pitinga com folhelhos e diamictitos, depositadas durante o Siluriano e pela Formação Manacapuru com arenitos e pelitos, depositada do Siluriano Superior ao Devoniano Inferior.

Em discordância paralela, recobrando o Grupo Trombetas, há uma seqüência concordante constituída pelos Grupos Urupadi e Curuá, depositados em ambiente marinho do Devoniano ao Carbonífero. O Grupo Urupadi é constituído pela Formação Maecuru, com arenitos e pelitos, e pela Formação Ererê, com siltitos, folhelhos e arenitos, depositadas durante o Devoniano. O Grupo Curuá é constituído pela Formação Barreirinha, com folhelhos negros, pela Formação Curiri, com diamictitos, arenitos e siltitos, depositadas durante o Devoniano, pela Formação Oriximiná, constituída por arenitos e pelitos, depositada no final do Devoniano e início do Carbonífero e pela Formação Faro, constituída por arenitos finos a grosseiros, esta última já depositada durante o Carbonífero.

Sobrejacente e em discordância a essas formações, ocorre a seqüência concordante do Grupo Tapajós, depositada do Carbonífero ao Permiano, sendo constituída pelas Formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda, originadas durante o Carbonífero e pela Formação Andirá depositada do final do Carbonífero ao Permiano.

A Formação Monte Alegre é constituída por arenitos, siltitos e folhelhos, a Formação Itaituba por calcários e margas, e a Formação Nova Olinda por evaporitos. A Formação Andirá é constituída predominantemente por siltitos vermelhos, verdes, cinzas e subordinadamente por arenitos e folhelhos, marcando a passagem do ambiente marinho para o continental. Representa o fim do ciclo transgressivo.

3.1.2 - Formações Meso-Cenozóicas

Durante o Mesozóico, essas rochas paleozóicas foram intrudidas por um magmatismo básico, com diques e sills, constituindo o Diabásio Penatecaua (DNPM, 1974).

Recobrimo em discordância essas rochas paleozóicas e as intrusões de rochas básicas, ocorreu a deposição do Grupo Javari, constituído pela Formação Alter do Chão, originada durante o Cretáceo e pela Formação Solimões, depositada durante o Terciário. Esta última é representada apenas margeando a parte ocidental da Bacia Sedimentar do Amazonas.

A deposição de sedimentos continentais, em ambiente aquoso, predominantemente lacustre e fluvial, durante o Cretáceo, constitui a Formação Alter do Chão, cuja espessura máxima atinge 1 250 m (CUNHA et al, 1994) e cuja exposição ocupa a maior parte da Bacia do Amazonas.

Por muito tempo, esses sedimentos continentais avermelhados que cobrem grande parte das formações paleozóicas da Bacia do Amazonas foram indevidamente definidos como Grupo, Série ou Formação Barreiras, com base na aparência e semelhança com os sedimentos desta unidade geológica. O chamado

Arenito Manaus (ALBUQUERQUE, 1922) constitui um nível da Formação Alter do Chão.

A Formação Alter do Chão, que representa o contexto geológico deste estudo, ocorre em boas exposições no baixo curso do rio Tapajós (AMARAL, 1954) e em outros locais. Estudos realizados pela PETROBRÁS possibilitaram um melhor conhecimento dessa formação geológica, a qual foi definida a partir de uma perfuração petrolífera na localidade de Alter do Chão (KISTLER, 1954) e consagrada por diversos autores (KRAUSE, 1956; MORALES, 1958; CAPUTO et. al., 1972; SCHOBENHAUS et. al., 1984).

A Formação Alter do Chão é pobre em fósseis. Sua idade Neocretácea foi baseada em um dente de um dinossauro terópodo, encontrado em uma perfuração petrolífera em Nova Olinda (PRICE, 1960), e seu posicionamento corresponde à Idade Eocenomaniana a Maastrichtiana (DAEMON & CONTREIRAS, 1971). Estudos micropaleontológicos posteriores (DAEMON, 1975) indicaram que a deposição iniciou-se no Albiano Médio ou Inferior (Cretáceo Inferior), estendendo-se pelo Cenomaniano e Turoniano (Cretáceo Superior).

A sequência litológica da Formação Alter do Chão apresenta arenitos e argilitos, com conglomerados subordinadamente e níveis de lateritas (IBGE & SUDAM, 1990). Os arenitos são finos a médios, geralmente com estratificação cruzada, sendo de cor vermelha a variegada, com intercalações argilosas. Os argilitos tem cor vermelha, creme, branca, roxa, variegada, e são pouco consolidados e com lentes de areia. Os conglomerados possuem seixos de quartzo claro de até 5 cm de diâmetro e seixos de quartzo leitoso de até 15 cm de diâmetro.

Em grande parte da área situada ao norte do rio Amazonas há ocorrência de um arenito de textura média, com cimento caolínico e silicoso, branco, geralmente manchado de vermelho, consistente, com impregnações de óxido de ferro. O mesmo foi considerado por muito tempo como uma formação geológica

distinta, chamada de Arenito Manaus, constituindo um horizonte da Formação Alter do Chão.

A Formação Solimões situa-se a mais de 500 km a oeste de Santarém, recobrando em discordância a Formação Alter do Chão. É de origem continental, tendo sido depositada durante o Terciário e constituída essencialmente de argilitos.

Recobrando localmente a Formação Alter do Chão ou a Formação Solimões, encontram-se os depósitos aluviais dos rios da região, pertencentes ao Quaternário e constituídos de seixos, areias, siltes e argilas, destacando-se os sedimentos aluviais da planície de inundação do rio Amazonas, estes com predominância argilosa e de coloração cinza.

3.1.3 - Geomorfologia

As principais unidades morfoestruturais resultantes dos processos geomorfológicos das paisagens encontradas nesta região são constituídas pelo Planalto Tapajós-Xingu, pelo Planalto Rebaixado da Amazônia e pela Planície Amazônica. Outras unidades, como o Planalto Sedimentar do Amazonas, o Planalto Dissecado Rio Trombetas - Rio Negro, a Depressão Periférica do Norte do Pará, o Planalto Dissecado do Norte da Amazônia e o Pediplano Rio Branco - Rio Negro, situam-se bem mais distante, a mais de 400 km de Santarém.

O Planalto Dissecado Rio Trombetas - Rio Negro situa-se na parte oeste da Bacia do Amazonas, desenvolvido em rochas da Formação Alter do Chão. Sua altitude oscila de 60 m a 170 m e reflete intensa atuação dos processos erosivos, com áreas aplainadas bastante reduzidas.

O Planalto Sedimentar do Amazonas é representado por relevos residuais, em rochas paleozóicas da borda norte da bacia sedimentar, apresentando grande declividade, com altitudes próximas a 200 m.

A Depressão Periférica do Norte do Pará acompanha a borda norte da Sinéclise do Amazonas, elaborada em rochas pré-cambrianas, com altitude inferior a 200 m, predominando uma superfície de aplainamento conservada.

O Planalto Dissecado do Norte da Amazônia apresenta altitudes compreendidas entre 400 m e 500 m, desenvolvidas em rochas do embasamento cristalino.

O Pediplano Rio Branco - Rio Negro tem aspectos interplanálticos e situa-se em rochas pré-cambrianas apresentando altitudes em torno de 200 m.

A área deste estudo localiza-se nas unidades geomorfológicas constituídas pelo Planalto Tapajós-Xingu, pelo Planalto Rebaixado da Amazônia e pela Planície Amazônica (vide item 3.2).

O Planalto Tapajós-Xingu ocupa áreas com altitudes que variam de 120 m a 200 m e foi desenvolvido em rochas da Formação Alter do Chão. Os relevos aplainados e conservados são relacionados a oscilações climáticas. As superfícies de aplainamento, as superfícies tabulares e os inselbergs são considerados como elaborados em condições paleoclimáticas mais secas que o clima atual (DNPM, 1976).

As flutuações dos níveis de base da rede hidrográfica engendraram processos erosivos e/ou de sedimentação. O clima e as flutuações eustáticas influenciaram os níveis de base dos aplainamentos.

O Planalto Rebaixado da Amazônia possui também formas tabulares e sua altitude situa-se próxima aos 100 m; desenvolve-se em rochas da Formação Alter do Chão e possui drenagem regional dendrítica ou subdendrítica. O alargamento no leito dos rios que possuem a foz afogada é uma característica desta

unidade de relevo. Suas formas tabulares são também consideradas como elaboradas em paleoclima mais seco que o atual (DNPM, 1976).

A Planície Amazônica compreende áreas alagadas e inundáveis, tendo como eixo o rio Amazonas. Sua altitude é próxima à do nível do mar. É constituída pelos depósitos aluviais quaternários e pela complexa massa de água formada por lagos, paranás, furos, igapós, pântanos, na planície de inundação do rio Amazonas.

Este domínio morfoclimático está ligado à permanência da lâmina d'água submetida ao regime hidrológico do rio Amazonas.

3.2 - GEOLOGIA LOCAL

Na região de Santarém a geologia de superfície é representada pelo espesso pacote de rochas da Formação Alter do Chão e pelos depósitos quaternários aluviais.

Conforme mostra a Figura 3.3 os processos de evolução da paisagem da Formação Alter do Chão na região de Santarém resultaram em uma geomorfologia com formas tabulares do Planalto Tapajós-Xingu e do Planalto Rebaixado da Amazônia, constituindo os platôs, situados na parte sul. Mais ao norte, margeando os rios Tapajós e Amazonas situa-se a Superfície de Aplainamento e Inselbergs. Nessa área, a erosão atuou com mais intensidade, conforme é visto na seção geológica esquemática da Figura 3.4, cuja localização é mostrada na Figura 3.3; com remoção da parte superior e com altitudes decrescentes até a da Planície Amazônica.

A Planície Amazônica compreende áreas alagadas e inundáveis formadas pelos depósitos aluviais dos rios, destacando-se a várzea do rio Amazonas, que se

diferencia pela predominância argilosa e de colaração cinza de seus depósitos aluviais.

A variação sazonal do nível da lâmina d'água do rio Amazonas é da ordem de 7 m em Santarém.

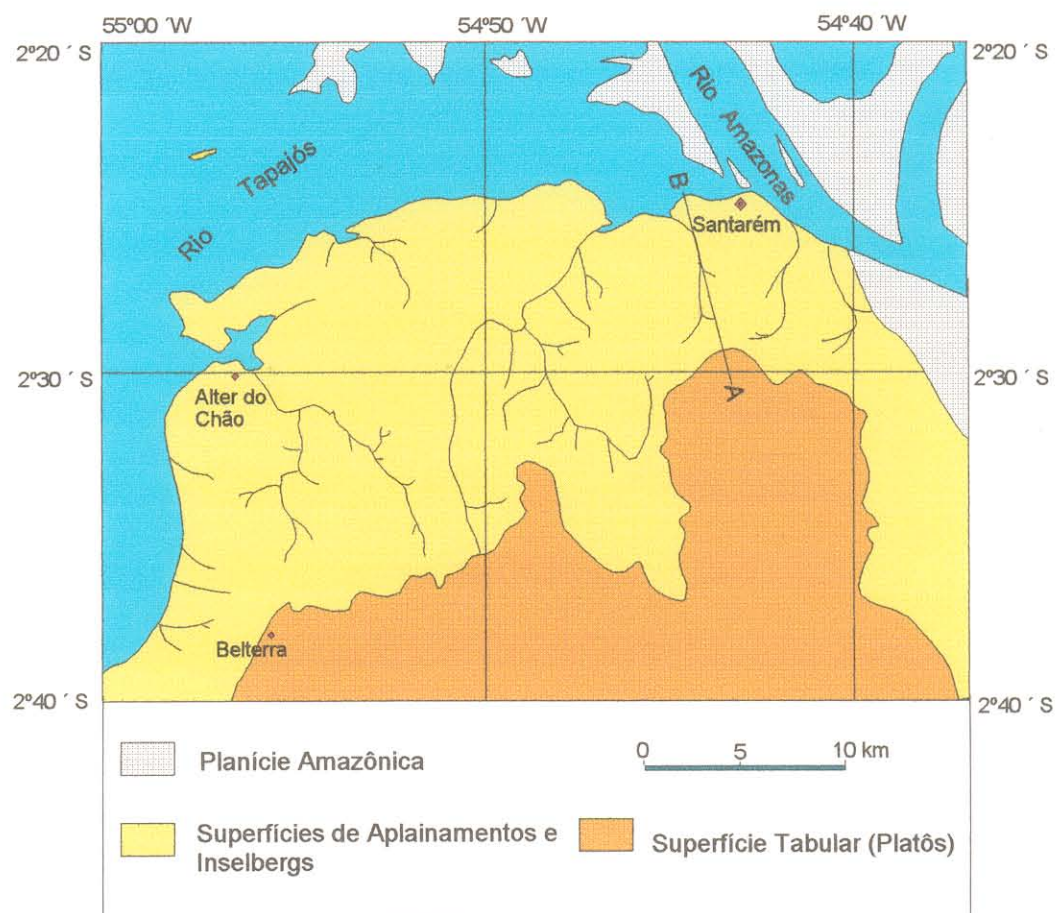


Figura 3.3 - Quadro geomorfológico da região de Santarém.

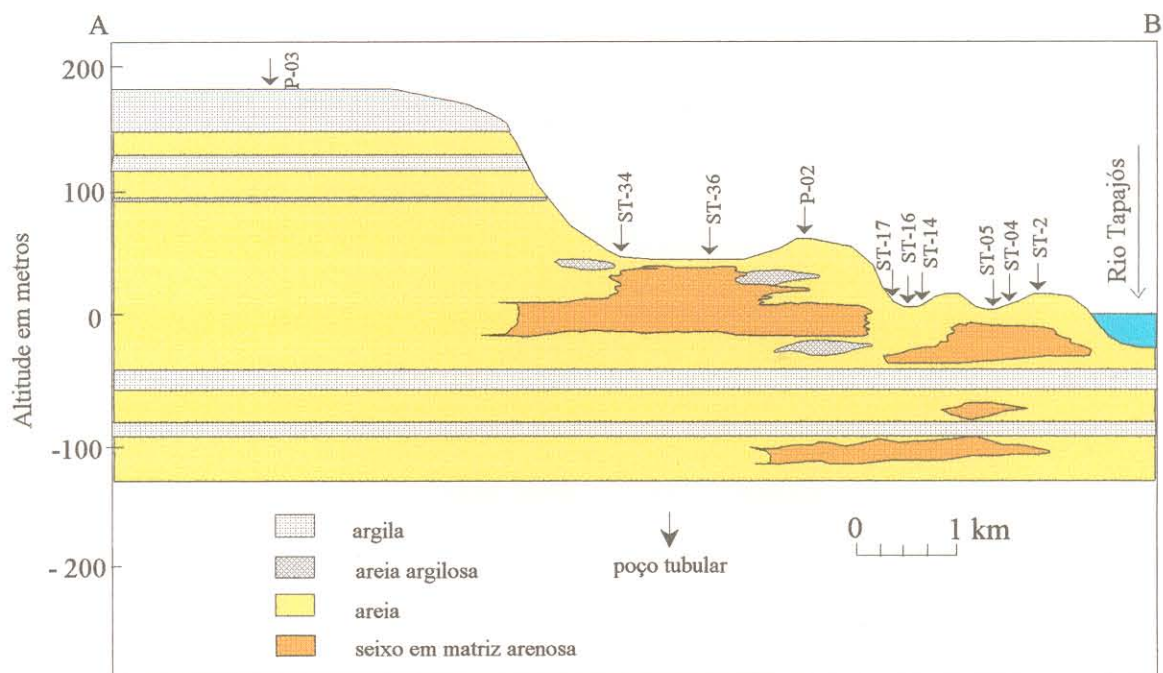


Figura 3.4 - Seção geológica esquemática da Formação Alter do Chão na região de Santarém.

Os perfis apresentados na Figura 3.5 indicam que a Formação Alter do Chão tem espessura de pouco mais de 600 m, com predominância arenosa.

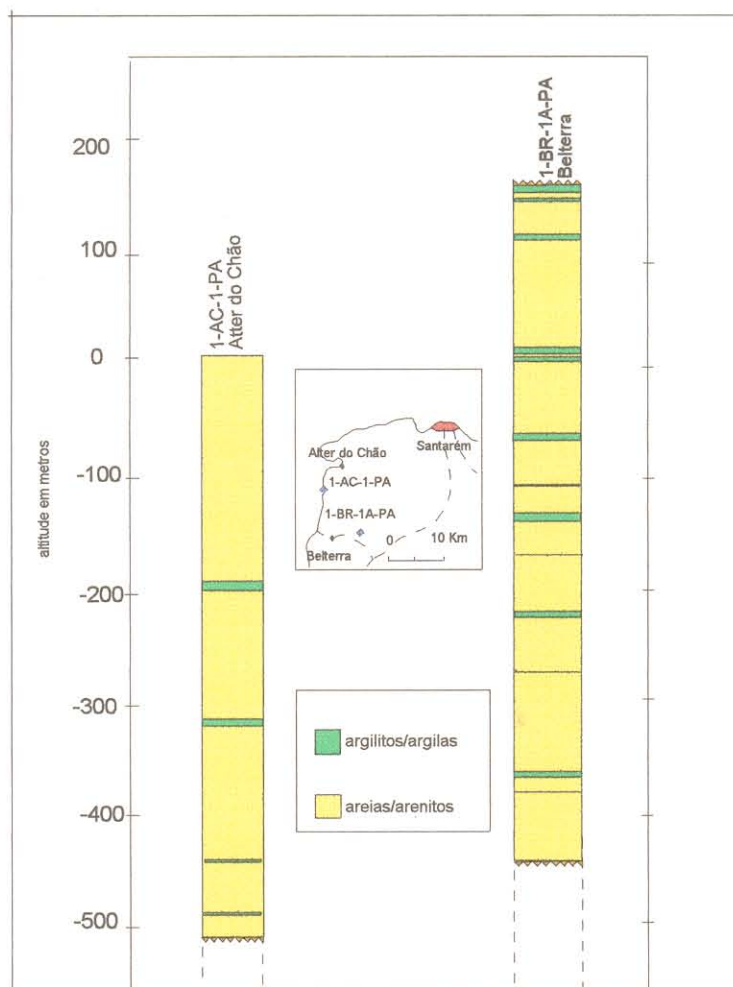


Figura 3.5 - Perfis de poços petrolíferos que atravessam a Formação Alter do Chão na região de Santarém (adaptado de PETROBRÁS, 1955 e 1985).

Verifica-se que a litologia apresenta em sua parte superior um capeamento argiloso com uma seqüência arenosa, esta com níveis argilosos e lentes de seixo em matriz arenosa. Esse capeamento é constituído de argilas de cor amarelada a creme, vermelha, às vezes clara, caolínicas, argilas siltosas de coloração roxa e níveis de laterização. Essa parte superior está situada nos platôs e atinge espessura de mais de 50 m.

A seqüência arenosa subsequente apresenta níveis argilosos e lentes de seixos em matriz arenosa. As areias e arenitos são de cor creme e clara, as vezes vermelha com granulometrias e seleções variadas e apresentam estratificações cruzadas. Esses sedimentos apresentam-se inconsolidados ou pouco consolidados.

Os depósitos aluviais do Quaternário são constituídos por seixos e areias, claros, do rio Tapajós e seus pequenos afluentes nessa área. Mais ao sul, a planície de inundação do rio Amazonas é constituída de areias, siltes e principalmente argilas. Estes sedimentos apresentam coloração cinza.

4 - CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

A natureza e distribuição dos recursos de águas subterrâneas na região de Santarém são controladas pela litologia, geomorfologia e estruturas das rochas sedimentares, pertencentes essencialmente, à Formação Alter do Chão.

Os primeiros trabalhos sobre a dinâmica de circulação da água subterrânea foram desenvolvidos por DARCY (1856) e DUPUIT (1863). Posteriormente, com o conceito de potencial hidráulico (HUBBERT, 1940) foram estabelecidos os fundamentos do fluxo de água subterrânea através dos meios geológicos. Mais recentemente, os fundamentos da hidráulica de poços basearam-se em analogias com o fluxo de calor (THEIS, 1935) e mais tarde, em conceitos exclusivamente hidráulicos (HANTUSH & JACOB, 1955).

Após a infiltração no terreno a água subterrânea desloca-se dos níveis de energia hidráulica mais altos para os mais baixos, devido principalmente às diferenças de nível e pressão. Com isso, as rochas da costra terrestre armazenam e conduzem a água subterrânea constituindo os sistemas hidrogeológicos.

4.1 - INVENTÁRIO HIDROGEOLÓGICO

O cadastramento de poços tubulares (e algumas perfurações) com dados disponíveis possibilitou obter informações sobre as litologias de subsuperfície e ter uma idéia consistente das condições hidrogeológicas da área.

A Figura 4.1. mostra a distribuição desses poços na área urbana de Santarém e suas proximidades, a Figura 4.2 mostra essa distribuição para os poços mais afastados e a Tabela 4.1 apresenta seus dados técnicos.

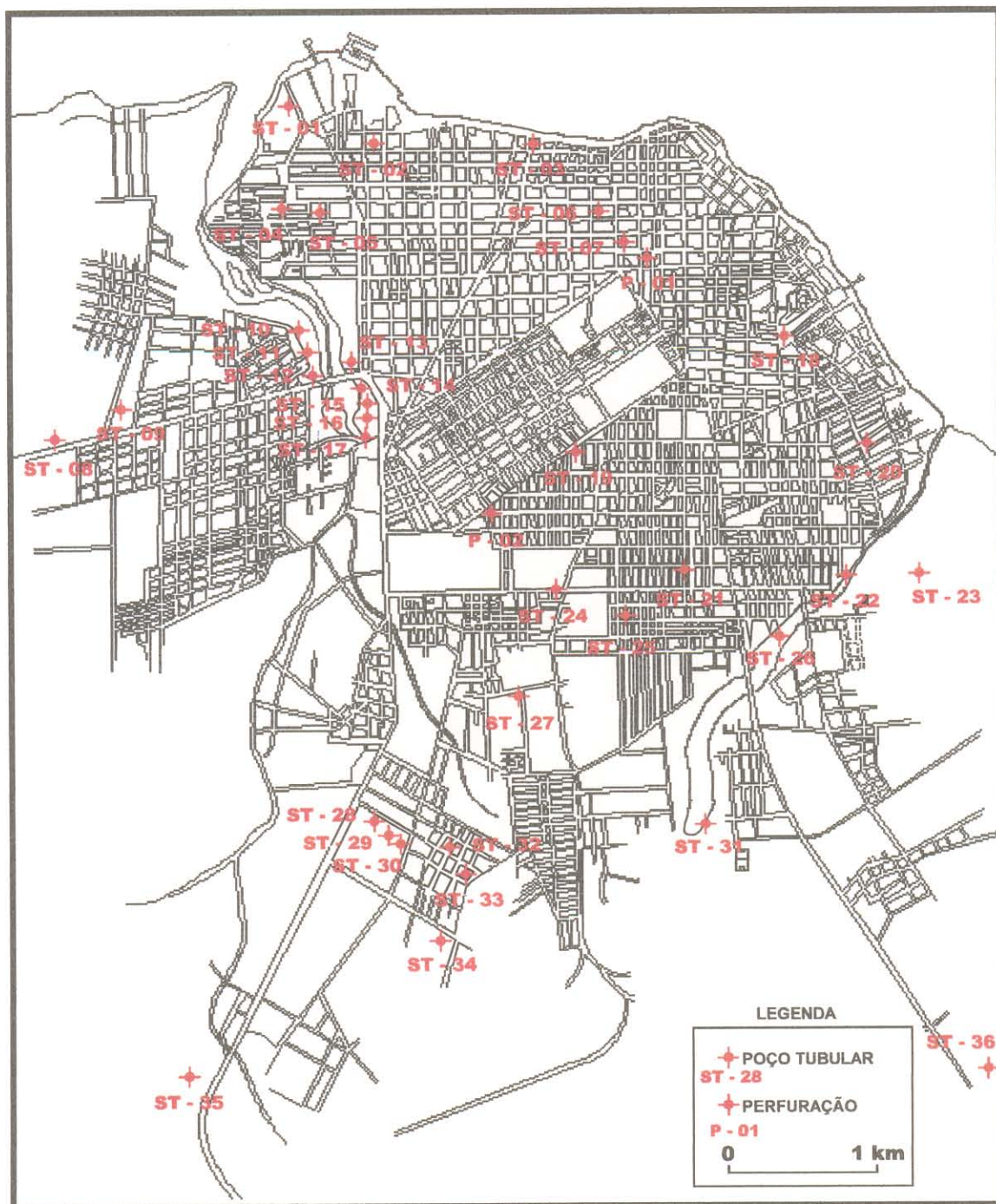


Figura 4.1 - Localização dos poços da área urbana de Santarém e suas proximidades.

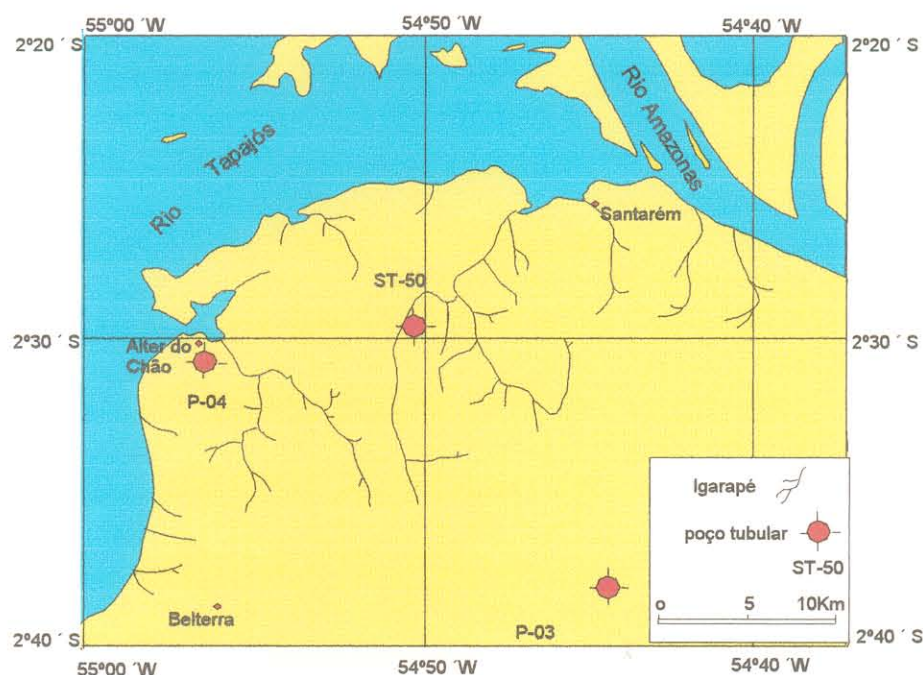


Figura 4.2 - Localização de poços mais afastados da área urbana de Santarém.

Esses poços, em sua maioria, foram perfurados pelo método rotativo, tendo sido utilizados, também, os métodos do jato d'água e manual. A profundidade máxima dessas perfurações atingiu 258 m. Estes dados são complementados por duas perfurações petrolíferas, as quais atravessam toda a Formação Alter do Chão com espessuras de 527 m em Alter do Chão e 603 m em Belterra (Figura 3.4).

As coordenadas geográficas desses poços foram obtidas com a utilização de GPS, equipamento de posicionamento que capta sinais de uma constelação de satélites geodésicos (Tabela 4.1)

Tabela 4.1 - Dados técnicos dos poços tubulares da região de Santarém (e das perfurações P-01, P-02, P-03 e P-04 (continua).

Poço	Latitude	Longitude	Prof. (m)*	N.E (m)*	Filtro	Diâmetro	Capacidade Específica (m³/h.m)	Tipo de Aquífero Captado	Litologia e Profundidade (m)
ST-01	2°25'14"S	54°44'36"W	20	4,50	10-18 m	6"	8,0	L	0-Ar-11-Ag-11,5-Ar-20
ST-02	2°25'17"S	54°44'09"W	20	8,60	17-20 m	4"		C	0-Ag-9-Ar-10-Ag-12,5-Ar-16-Ag-17-Ar(Ca)-20
ST-03	2°25'10"S	54°43'24"W	106,4	jorrante	64-76 m 86-104 m	12"- 0-51,4 m 8"- 51,4-100,4 m	6,0	C	0-Ar-24-Ar(Ca)-44-Ar-48-Ag-53-Ar(Ca)-80 80-Ar-84-Ar(Ca)-108-Ar-112
ST-04	2°25'41"S	54°44'33"W	98,4	6,65	64,2-82,4 m 88,4-96,4 m	12"- 0-76,2 m 8"- 76,2-98,4 m	4,4	C	0-Ar-20-Ca-44-Ag-48-Ar-72-Ca-84-Ar-88 88-Ar(Ca)-96-Ag-100-Ar(Ca)-118
ST-05	2°25'39"S	54°44'02"W	20	0,40	17-20 m	6"	3,6	L	0-Ag-5,6-Ar-9-Ar(Ag)-15-Ar-20-Ag-22-Ar-23
ST-06	2°25'18"S	54°43'04"W	28	17,00	24-28 m	6"	2,5	L	0-Ag-10-Ar(Ca)-28-Ag-29-Ar(Ca)
ST-07	2°25'30"S	54°42'48"W	40	24,00	37-40 m	6"		L	0-Ar-6-Ca-9-Ar-40
P-01	2°25'34"S	54°42'44"W	133	31,00					0-Ar-24-Ar(Ca)-36-Ar-41-Ag-42-Ar-46 46-Ar(Ca)-48-Ar-64-Ca-70-Ar-76-Ca-80 80-Ar-104-Ag-106-Ar(Ag)-133
ST-08	2°26'54"S	54°45'11"W	74	45,00	57-71 m	6"	2,3	L	0-Ar-74-Ag-75-Ar
ST-09			41	16,00	32,5-4 m	6"	0,4	L	0-Ar-25-Ag-27,5-Ca-28-Ag-28,5-Ar-41
ST-10	2°26'20"S	54°44'26"W	156,1	-8,69	99-115,6 m 126,8-129,8 m 138,8-148,8 m 153-156,1 m	12"- 0-99 m 8"- 99-156,1 m	4,2	C	0-Ag-5-Ar-10-Ag-21,5-Ar-43-Ag-46-Ar-59 59-Ag-62-Ar-70-Ag-96—Ar-118,5-Ag-125 125-Ar-132,5-Ag-136-Ar-143-144,5-Ar-150,5 150,5-Ag-151,5-Ar-157,5-Ag-160
ST-11	2°26'19"S	54°44'14"W	157,1	-3,98	88-115 m 133,7-136,7 m 154,1-157,1 m	12"-0-88 8"- 88-157,1 m	2,9	C	0-Ag(Ar)-10-Ar-27-Ag(Ar)-45-Ar-56-Ag(Ar)-76 76-Ag-86-Ar-118-Ag(Ar)-132-Ar-138-Ag(Ar)-144 144-Ar—149-Ag-153-Ar-160
ST-12	2°26'13"S	54°40'58"W	157,1	-5,71	82,4-109,8 m 151,1-157,1 m	12"- 0-63 m 8"- 63-157,1 m	1,7	C	0-Ag-6-Ar-70-Ag-82,5-Ar-110-Ag-126,5-Ar-139,5 139,5-Ag-141,5-Ar-143-Ag-148-Ar-160
ST-13	2°26'18"S	54°44'01"W	157,2	-3,10	81,2-90,2 m 96,5-101,5 m 110,9-119,9 m 139,1-145,1 m	12"- 0-81 m 8"-81-157,3 m	1,2	C	0-Ar-4-Ag-10-Ar-55-Ag(Ar)-85-Ar-90 90-Ag(Ar)-95-Ar-101-Ag-109-Ar-120-Ag-135 135-Ar-145-Ag-150-Ar-160-Ag-170-Ar-200
ST-14	2°26'27"W	54°43'57"W	128	-3,10	88-124 m	12"- 0-63 m 8"- 63 - 126 m	7,7	C	0-Ar-44-Ar(Ca)-52-Ar(Ag)-72-Ar-82-Ar(Ag)-92 92-Ar-126-Ar(Ag)-128
ST-15	2°26'53"S	54°43'53"W	133,8	-7,00	84,1-101,1 m 113-126 m	12"-0-84 m 8"-84-133,8 m	1,1	C	0-Ag-6-Ar-35-Ag(Ar)-55-Ag(Ar)-85-Ar-103 103-Ag-106-Ag(Ar)-113-Ar-125-Ag(Ar)-130 130-Ar-132-Ag(Ar)-141-Ar-144-Ag-146-Ar-150
ST-16	2°26'34"S	54°43'53"W	116	-7,50	22-28 m 63-87 m 94-104 m	12"-0-37 m 8"-37-106 m	3,0	L/C	0-Ar-5,5-Ag-6,5-Ar-50-Ag(Ar)-56-Ag-62 62-Ar(Ag)-68-Ar-72-Ar(Ca)-124
ST-17	2°25'40"S	54°44'20"W	115	jorrante	36-42 m 84,9-114,9 m	12"-0-52 m 8"-52-115 m		L/C	0-Ar-44-Ar(Ag)-48-Ag(Ar)-60-Ar-72 72-Ar(Ca)-96-Ar-100-Ar(Ca)-132

(*) Em relação ao nível do solo.

L - livre, C - confinado, Ar - areia, arenito, Si - silte, siltito, Ag - argila, argilito, Ca - cascalho, La - laterita.

Tabela 4.1 - Dados técnicos dos poços tubulares da região de Santarém (e das perfurações P-01, P-02, P-03 e P-04) (conclusão).

Poço	Latitude	Longitude	Prof. (m)*	N.E (m)*	Filtro	Diâmetro	Capacidade Específica (m³/h.m)	Tipo de Aquífero Captado	Litologia e Profundidade (m)
ST-18	2°25'53"S	54°42'02"W	64	13,80	52-64 m	6"	1,7	L	0-Si-16-Ar-40-Ag(Ar)-48-Ar(Ag)-60-Ar-118
ST-19	2°26'31"S	54°42'48"W	78	36	54-62 m 66-78 m	6"		L	0-Ar-33-Ag-36-Ar-80
P-02	2°26'47"S	54°43'08"W	258						0-Ar-66-Ca-90-Ar-126-Ag-131-Ar-182 182-Ag-188-258
ST-20	2°26'18"S	54°41'35"W	54	16,30	36-48 m 51-54 m	6"	1,7	L	0-Ar-16-Ar (Ca)-54
ST-21	2°26'59"S	54°42'18"W	72	35,00	52-60 m 64-72 m	6"	0,8	L	0-Ag-12-La-12-Ar-72
ST-22	2°26'56"S	54°41'37"W	24	0,32	18-24 m	6"	5,5	C	0-Ag-3-Ar-5-Ag-12-Ar-24
ST-23	2°26'39"S	54°41'11"W	13,5	3,20	7,5-13,5 m	6"	6,2	C	0-Ag-4-Si-10-Ar-19
ST-24	2°28'10"S	54°43'30"W	41,5	17,62	37,5-41,5 m	4"		L	0-Ar(Ag)-25-Ar(Ca)-30-Ag-40-Ar-41,5
ST-25	2°27'16"S	54°42'37"W	80	45,00	56-72 m 76-80 m	6"		L	0-Ar-22-Ca-24-Ag-24,5-Ar-40-Ca-40-Ar-80
ST-26	2°26'12"S	54°42'00"W	20	0,10		6"		C	0-Ag-12-Ar-20
ST-27	2°27'43"S	54°42'56"W	64	17,62	30-39 m 42-48 m	6"		L	0-Ar(Ag)-17-Ag(Ar)-24-Ar-64
ST-28	2°27'25"S	54°41'41"W	54	16,90	48-54 m	6"	4,1	L	0-Ar-31-Ag(Ar)-47-Ar-54-Ag(Ar)-90
ST-29	2°28'11"S	54°43'35"W		20,00			1,2	L	0-Si-6-Ar-10-Ag-12-Ar-33-Ag-41-Ar-51-Ag-53 53-Ar(Ca)-61-Ag-67-Ag(Ar)-90
ST-30	2°28'12"S	54°43'40"W	60	15,00	30-34 m 43-60 m	8"	6,0	L	0-Si-19-Ar(Ca)-20-Ar-34-Ar(Ag)-43 43-Ar-61-Ar(Ar)-65
ST-31	2°27'12"S	54°41'51"W	22	0,57	18-22 m	6"	5,5	C	0-Ag-12-Ar-14-Ag-16-Ar(Ca)-22-Ar-25
ST-32	2°28'14"S	54°43'27"W	50	17,67	32-41 m 44-50 m	6"		L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50
ST-33	2°28'20"S	54°43'10"W	50	8,17	23-39 m 44-50 m	6"		L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50
ST-34	2°29'05"S	54°42'05"W	50	9,00	32-41 m 44-50 m	6"		L	0-Ag-9-Ar(Ca)-50
ST-35			18	jorrante	13-18 m	6"		L	0-Ar(Ag)-6-Ar-13-Ca-18-Ag-22
ST-36			40	17,30	31-40 m	6"	1,6	L	0-Ag(Ar)-12-Ag-17-Ar-31-Ag-32-Ar-40
ST-50	2°28'55"S	54°50'28"W	41	20,72	29-38 m	4"		L	0-Ag-9-La-11-Ag-13-Si-28-Ar(Ca)-32-Ar-33 33-Ar(Ca)-36-Ar-38-Ag(Ar)-41
P-03	2°36'51"S	54°43'32"W	44	35,17					0-Ag-28-Ar-30-Ar(Ca)-32-Ar-36-Ar-36-44-Ag 36-Ar(Ca)-40-Ar-44-Ag
P-04	2°30'39"S	54°40'42"W	104						0-Ar-39-Ag-39,2-Ar(Ca)-56-Ar-72,5 72,5-Ag-73,1-Ar-104

(*) Em relação ao nível do solo.

L - livre, C - confinado, Ar - areia, arenito, Si - silte, siltito, Ag - argila, argilito, Ca - cascalho, La - laterita.

4. 2 - CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Na região de Santarém, os aquíferos são constituídos por areias finas a médias do Quaternário e areias e arenitos de granulação fina a grossa e cascalhos da Formação Alter do Chão, do Cretáceo.

Os aquíferos do Quaternário situam-se em planícies aluviais dos principais igarapés, em seus baixos cursos. Suas espessuras máximas atingem em torno de 20 m, tendo pequena representatividade espacial.

O sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão estende-se por toda a área, com espessura em torno de 600 m. Os aquíferos atingem espessuras totais de 480 m e são constituídos por uma sucessão de camadas arenosas, com permeabilidade e espessura variáveis, intercaladas com aquícludes e aquítardes de pequena espessura. Representam os aquíferos cerca de 80% do sistema hidrogeológico.

As feições geomorfológicas dessa área influenciam fortemente as condições hidrogeológicas da Formação Alter Chão. Na parte sul, situa-se um platô com altitudes que atingem 200 m e que em superfície é constituído de camadas argilosas, com espessuras totais de cerca de 50 m, estando o nível hidrostático da água subterrânea situado a partir de 35 m de profundidade. Essa área dos platôs, com sua topografia elevada, constitui-se em zona de recarga da água subterrânea. Na parte norte, situada geomorfologicamente na superfície de aplainamento e inselbergs, onde a erosão atuou com maior intensidade e removeu parte dos estratos superiores, a coluna litológica é predominantemente arenosa (conforme já referido no item 3.2) e com topografia mais irregular com altitudes decrescentes até a planície de inundação do rio Amazonas, esta última com aproximadamente 10 m de altitude. Nessa área situam-se zonas de recarga nas partes mais elevadas e nas partes mais

baixas do relevo as zonas de descarga, com fluxos da água subterrânea para fontes, igarapés e para o canal dos rios Tapajós e Amazonas.

A Formação Alter do Chão, na região de Santarém, encerra dois sistemas de aquíferos principais. A parte superior é constituída por um aquífero livre e a parte inferior por aquíferos confinados. Os dados obtidos através do inventário hidrogeológico indicam espessuras médias de 50 m para o aquífero livre e 430 m para os aquíferos confinados. Considerando-se as cotas altimétricas mais baixas do terreno, esses dois sistemas aquíferos estão separados por aquícludes e/ou aquítardes constituídos de estratos argilosos no intervalo de 44 m a 80 m de profundidade, sendo bem delineados na área de captação de água situada na planície aluvial do igarapé Irurá. Nesse local, o aquífero confinado apresenta uma zona de artesianismo, com poços jorrantes. Poços locados nesse aquífero apresentam níveis estáticos observados de até 8,69 m acima do terreno (CPRM, 1978). Este artesianismo foi também verificado mais distante dessa área, no poço ST-03, também jorrante.

A continuidade dos aquíferos confinados em maiores profundidades é indicada pelos dados de perfurações petrolíferas. Estes aquíferos são delimitados por camadas confinantes de pequenas espessura dos aquícludes e aquítardes (Figura 3.4).

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam perfis hidrogeológicos característicos, dos poços ST-23, ST-21 e ST-04 com profundidades de 13,5 m, 72 m e 98,4 m, respectivamente.

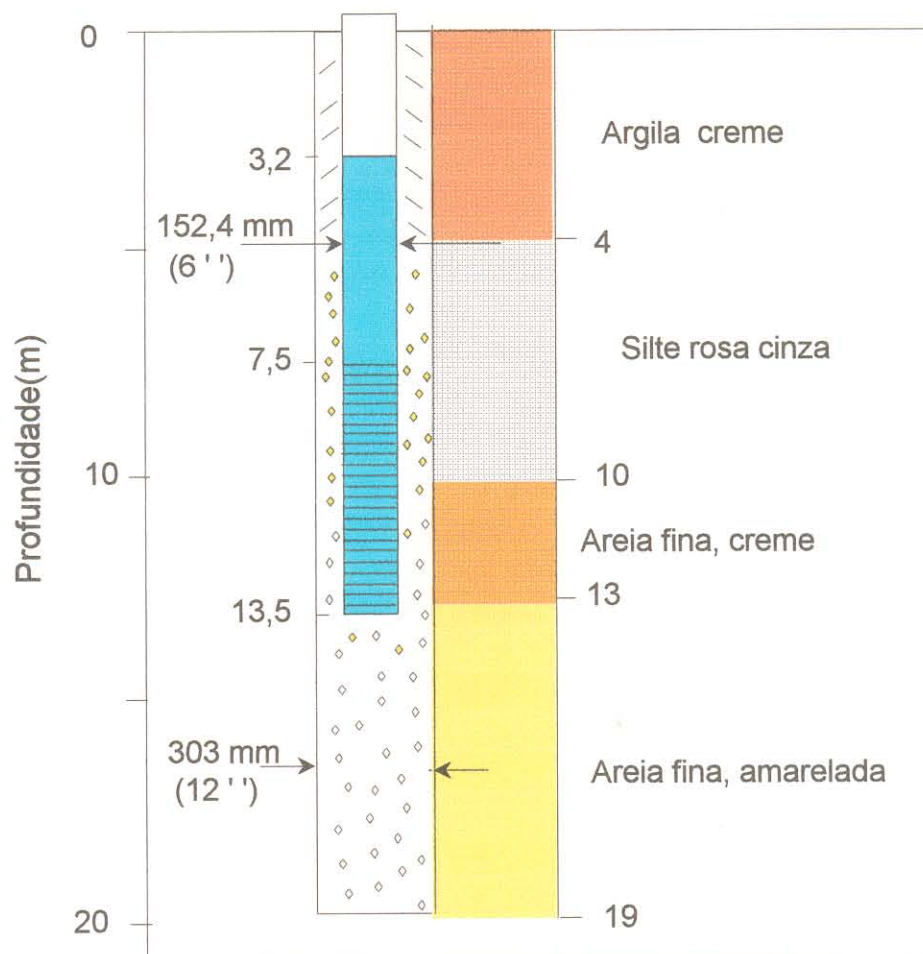


Figura 4.3 - Perfil hidrogeológico do poço ST - 23

Observa-se no perfil da Figura 4.3 que a colocação da seção de filtros abrange pouco mais de 40% da camada de silte rosa cinza e praticamente não aproveita a camada de areia fina amarela atingida na base da perfuração. Neste caso a produtividade deverá estar refletindo mais propriamente a qualidade construtiva do poço do que o potencial dos aquíferos atravessados.

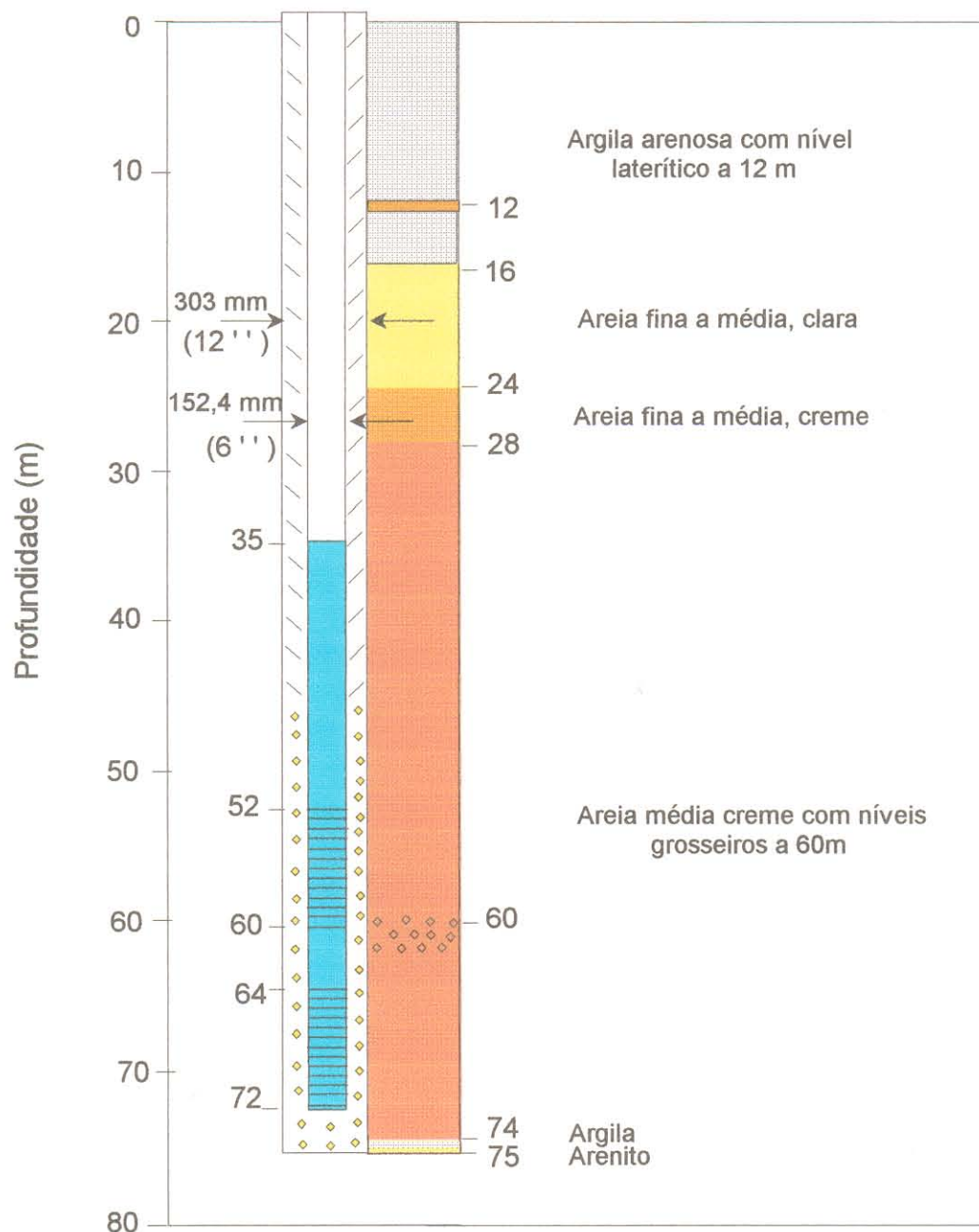


Figura 4. 4 - Perfil hidrogeológico do poço ST - 08

No caso da Figura 4.4 o perfil construtivo, relativo à colocação do revestimento, dos filtros, do cascalho ou pré-filtro e a estanqueidade do espaço anular superior indica que a seção de filtros não levou suficientemente em consideração o perfil litológico. A capacidade específica de apenas $2,3 \text{ m}^3/\text{hm}$ reflete

certamente a qualidade construtiva do poço e não necessariamente o potencial efetivo do aquífero.

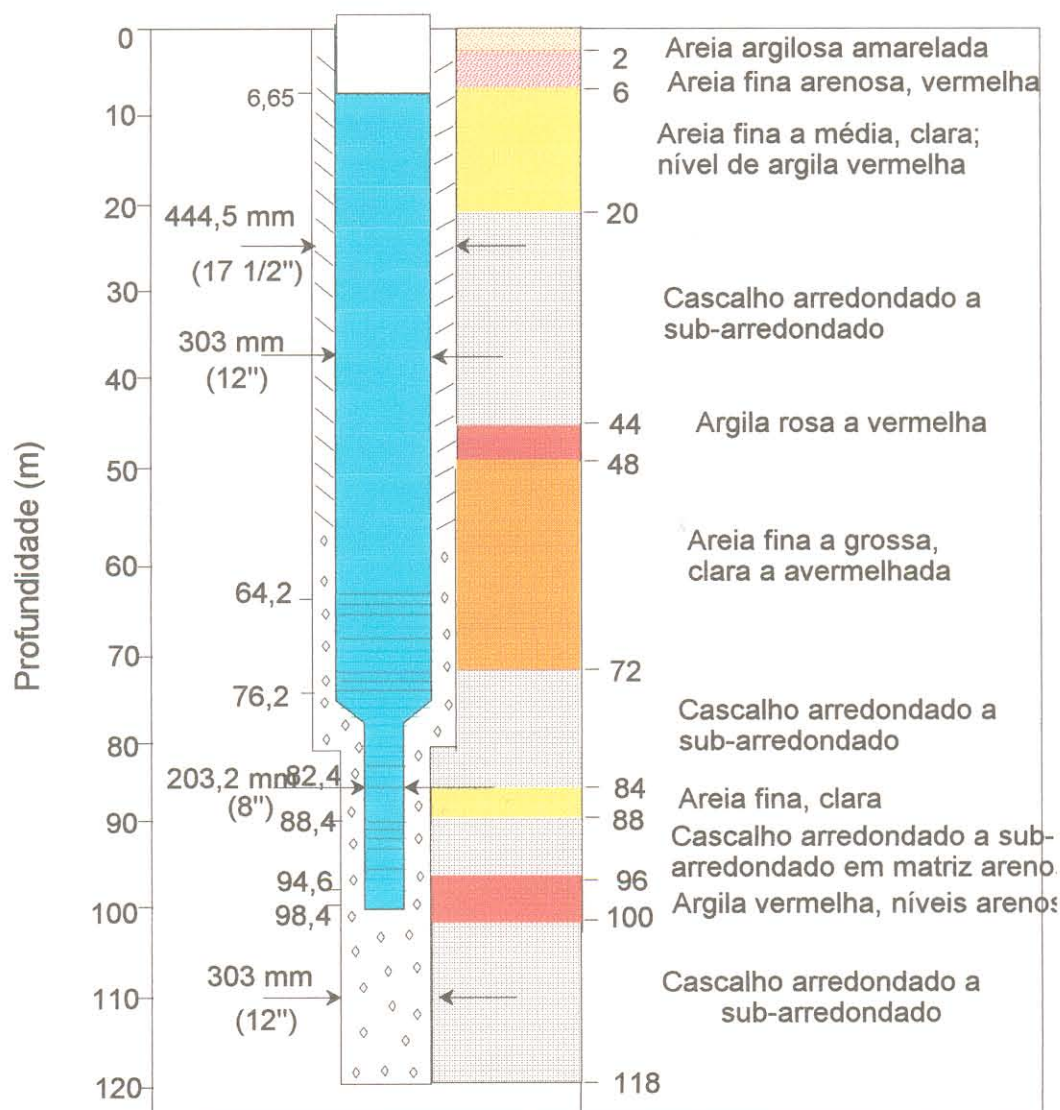


Figura 4.5 - Perfil hidrogeológico do poço ST - 04.

Os elementos da Figura 4.5 indicam perfis construtivos telescópicos com aproveitamento parcial das camadas de cascalho arredondado a sub-arredondado ou mais propriamente a captação de apenas uma destas camadas. Também aqui as características construtivas podem ser um dos fatores limitativos da produção obtida

pelo poço, resultando na capacidade específica de apenas 4,4 m³/hm. A disponibilidade de rebaixamento desse poço é próxima de 44 m (para a profundidade de 60,65 m).

4.2.1 - Características Litológicas

As possibilidades de armazenamento e condução da água nesses aquíferos são determinadas por propriedades físicas tais como: porosidade, permeabilidade, seleção e arranjo dos grãos, cimentação e composição mineral.

Dados da geologia de superfície e sub-superfície mostram que os estratos geológicos que constituem o sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão apresentam rochas clásticas arenosas, siltsas e argilosas. Argilitos e argilas de coloração variada, em geral amarela ou vermelha e também, roxa, creme, branca (caolínicas) e cinza com matéria orgânica, sendo às vezes compactas; apresentam-se formando os aquícludes. Siltitos e siltes, argilas arenosas e areias argilosas de coloração semelhantes formam os aquítardes.

Os aquíferos são constituídos por arenitos e areias, de finas a grosseiras e por cascalhos. Essa granulação apresenta-se, muitas vezes, bem selecionada, com grãos bem arredondados, sub-arredondados a angulosos. A coloração dessas rochas arenosas é creme, amarela, marrom, transparente, rosa ou roxa. Os seixos são de coloração creme, branco leitoso e também transparentes, com diâmetro de até 2 cm, os quais estão em matriz arenosa. Esses sedimentos clásticos que constituem os aquíferos apresentam-se inconsolidados ou pouco consolidados e são de composição predominantemente quartzosa.

A granulometria das frações arenosas foi determinada por peneiramento mecânico em amostras de calha de perfis de diversos poços. Essas análises mostram areias variando de fina a grosseira, de bem a mal selecionadas e seixos com diâmetro de até 2 cm.

A Tabela 4.2 apresenta os valores médios, obtidos a partir das curvas granulométricas para o tamanho efetivo e tamanho médio, dos grãos e para o coeficiente de uniformidade, associados aos poços e profundidade das amostras de calha das areias e cascalhos da região de Santarém.

O tamanho efetivo representa o tamanho dos grãos em que 10% da percentagem acumulada da areia é mais fina e 90% mais grossa (d_{90}). O tamanho médio, o tamanho dos grãos em que 50% da percentagem acumulada da areia é mais fina e 50% mais grossa (d_{50}). Seus valores obtidos nas análises granulométricas estão compreendidos entre 0,14 mm a 0,49 mm.

O coeficiente de uniformidade constitui a relação entre o tamanho dos grãos de areia em que 40% de percentagem acumulada da areia é mais fina e 60% mais grossa (d_{60}) e o tamanho dos grãos da areia em que 10% da percentagem acumulada é mais fina e 90% mais grossa (d_{90} ou tamanho efetivo). Portanto o coeficiente de uniformidade é igual à d_{60}/d_{90} .

Os valores obtidos das análises granulométricas para o coeficiente de uniformidade estão compreendidos entre 1,7 e 4,5. Os menores valores desse coeficiente (mais próximos de 1,0) indicam sedimentos arenosos bem selecionados e bem arredondados, mais favoráveis à transmissão da água subterrânea.

Tabela 4.2 - Valores médios obtidos a partir de curvas granulométricas para o tamanho efetivo e tamanho médio, dos grãos e para o coeficiente de uniformidade, associado aos poços e profundidades da amostra de calha, de areias e cascalhos da região de Santarém.

Poço	Profundidade da Amostra (m)	d_{90} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60}/d_{90}
ST-02	20	0,27	0,47	2,1
ST-03	8-48	0,29	0,72	3,1
	60-108	0,32	0,94	3,2
ST-06	10-28	0,24	0,47	2,1
ST-08	20-72	0,26	0,48	3,3
ST-14	6-52	0,30	0,87	4,2
	72-82	0,28	0,81	3,5
	92-128	0,20	0,54	3,5
ST-16	14-36	0,31	0,82	3,1
	54-126	0,37	1,10	3,5
ST-17	0-44	0,49	0,86	3,4
	60-132	0,32	0,79	2,9
ST-18	20-28	0,36	1,20	3,6
	32-40	0,26	0,94	4,5
	48-56	0,23	0,67	3,3
	60-119	0,26	0,80	3,9
P-02	0-126	0,31	0,74	2,5
	131-182	0,17	0,47	2,8
	188-258	0,18	0,52	3,9
ST-21	16-68	0,26	0,42	2,1
ST-23	10-19	0,15	0,26	2,0
ST-25	16-68	0,27	0,52	2,1
ST-27	24-44	0,27	0,67	2,1
ST-31	22-25	0,14	0,28	2,2
ST-34	9-50	0,28	0,67	2,8
ST-50	28-38	0,31	0,44	1,7
P-03	28-40	0,30	1,95	3,2

A Figura 4.6 apresenta curvas granulométricas características de sedimentos que constituem os aquíferos, os respectivos poços e profundidades das amostras analisadas. Essa grande variabilidade na granulometria e em outras

características litológicas resultou das complexas variações faciológicas dos sedimentos fluviais e lacustres da Formação Alter do Chão.

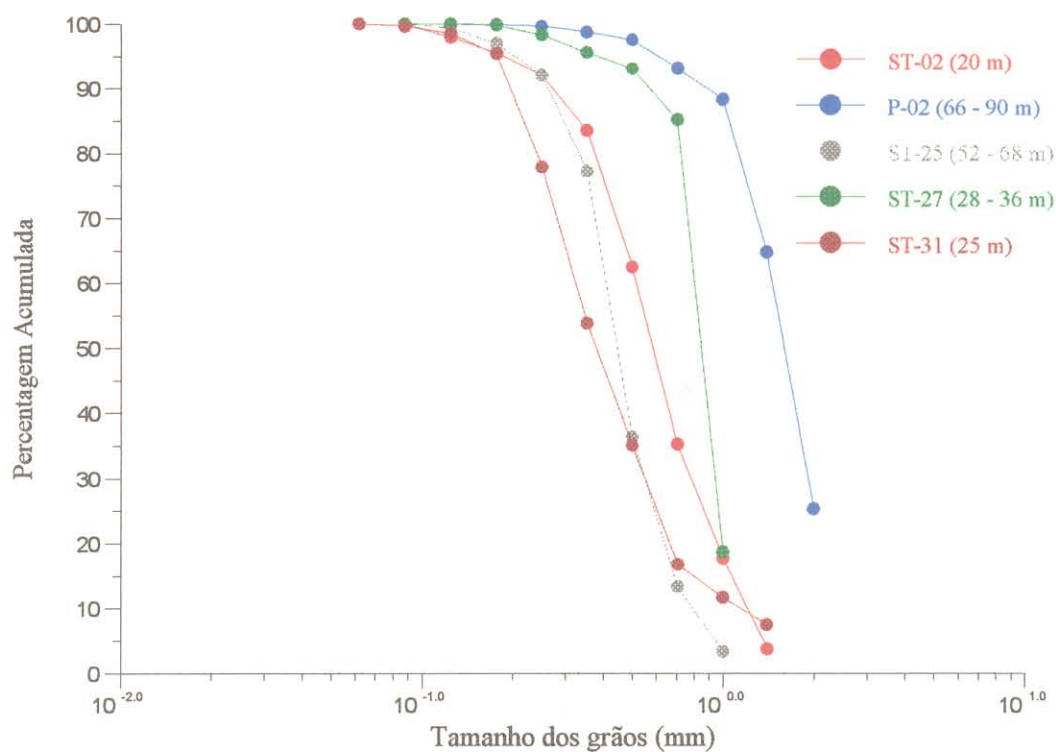


Figura 4.6 - Diagrama de análises granulométricas de sedimentos arenosos dos aquíferos da região de Santarém (amostras de calha).

4.2.2 - Características Hidráulicas

As características hidrodinâmicas dos aquíferos determinam a sua capacidade de produção de água. Entre as características que melhor definem essas propriedades estão a condutividade hidráulica, o coeficiente de transmissividade, a porosidade efetiva (ou específica) para o aquífero livre e o coeficiente de armazenamento para os aquíferos confinados.

Através de ensaios de bombeamento efetuados em diversos poços determinaram-se as características hidrodinâmicas dos aquíferos da região de Santarém. A grande variação litológica, tanto no sentido vertical como no horizontal, condicionou a complexidade do comportamento hidrodinâmico desses aquíferos.

Um ensaio de bombeamento consiste essencialmente no bombeamento do poço a uma taxa constante e na observação do nível potenciométrico do aquífero, no poço e às suas proximidades.

A execução e interpretação dos ensaios de bombeamento têm aumentado em face do melhor conhecimento da hidráulica da água subterrânea e do desenvolvimento de métodos de interpretação desses ensaios. Os valores dos parâmetros obtidos através de um ensaio de bombeamento fornecem uma média representativa de grande volume do aquífero.

As soluções analíticas desenvolvidas na hidráulica de poços são baseadas na análise do fluxo da água subterrânea em direção ao poço, durante o bombeamento. Os potenciais hidráulicos decrescem no aquífero ao redor do poço bombeado e atingem seu mínimo no ponto de extração da água subterrânea, ou seja, no poço (Figura 4.7), estabelecendo-se um fluxo radial da água subterrânea em direção ao poço.

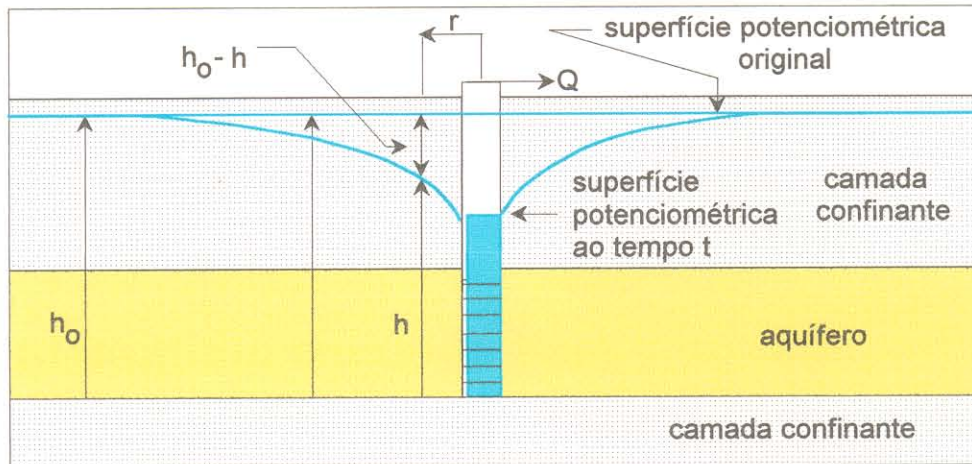


Figura 4.7 - Poço em bombeamento em um aquífero confinado.

A equação que descreve o fluxo saturado bidimensional horizontal em um aquífero confinado isotrópico e homogêneo com transmissividade T e armazenamento S , é dada por:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

onde:

x, y = coordenadas de um ponto do domínio [L]

T = coeficiente de transmissividade [$L^2 T^{-1}$]

S = coeficiente de armazenamento [adimensional]

h = potencial hidráulico do ponto observado [L]

t = tempo [T]

Considerando-se a simetria radial para esses rebaixamentos ao redor do poço temos:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

onde:

r = coordenada do ponto de domínio observado [L].

O desenvolvimento de metodologia para se chegar a solução analítica utilizou a analogia da teoria do fluxo de calor (THEIS, 1935). Em termos de hidráulica de poços resulta a equação exponencial integral:

$$h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u}$$

onde:

h_0 = potencial hidráulico inicial constante [L]

h = potencial hidráulico num instante após o início do bombeamento [L]

r = coordenada do ponto de domínio [L]

t = tempo de bombeamento [T]

Q = taxa de bombeamento constante [$L^3 T^{-1}$]

T = coeficiente de transmissividade [$L^2 T^{-1}$]

S = coeficiente de armazenamento [adimensional]

e:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

Sendo definido como função de poço $W(u)$.

Essas equações são chamadas equações de não equilíbrio ou equações de Theis.

Assim, temos:

$$h_0 - h = \frac{Q}{4 \pi T} W(u)$$

que é a fórmula de Theis.

Para valores de u suficientemente pequenos, onde os valores de t sejam suficientemente grandes ou os valores de r suficientemente pequenos, COOPER & JACOB (1946) mostraram que a equação de Theis pode ser modificada, sem erro significativo, para:

$$h_0 - h = \frac{2,3Q}{4 \pi T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

Assim, conhecendo-se as características hidrodinâmicas do aquífero (T e S) e a taxa de bombeamento (Q) é possível determinar o rebaixamento do potencial hidráulico ($h_0 - h$) em um aquífero confinado a qualquer distância (r) do poço bombeado e em qualquer tempo (t) após o início do bombeamento.

A equação de Theis pode ser também aplicada para aquíferos livres, desde que o rebaixamento seja pequeno em relação à espessura do aquífero (menor que 50%).

As características hidrodinâmicas podem ser calculadas através da interpretação dos dados de ensaios de bombeamento, com aproximações gráficas em diagramas *log-log* (método de Theis) ou em diagramas *monolog* (método de Jacob). No método de Jacob, a plotagem do rebaixamento do potencial com o tempo, a partir do início do bombeamento, resultará em uma reta para pequenos valores de r ou grandes valores de t .

Considerando-se Δh o rebaixamento para um ciclo logarítmico de tempo e t_0 o tempo de interseção quando a reta do rebaixamento intercepta o rebaixamento zero, tem-se:

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta h} = \frac{0,183Q}{\Delta h}$$

e

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2}$$

A interpretação do ensaio de bombeamento do poço ST-10, cujo perfil hidrogeológico é apresentado na Figura 4.8 foi obtido em um poço de observação (poço ST-12) situado a 400 m de distância do poço bombeado. Em sua interpretação utilizou-se o método de Jacob. A Figura 4.9 apresenta o diagrama desse ensaio de

bombeamento e para melhor elucidar, consta na figura: a taxa de bombeamento constante ($Q = 3\,336 \text{ m}^3/\text{dia}$ ou $139 \text{ m}^3/\text{h}$), a espessura do aquífero confinado ($e = 49 \text{ m}$), a distância do poço bombeado ao poço de observação ($r = 400 \text{ m}$), as fórmulas utilizadas para os cálculos dos coeficientes de transmissividade (T) e de armazenamento (S), e da condutividade hidráulica (K). O valor de t_0 obtém-se com o prolongamento da reta de evolução dos níveis até o rebaixamento zero, seu valor determinado foi 130 minutos ou 0,09 dia. O rebaixamento para um ciclo logarítmico de tempo apresenta o valor de 1,875 m.

Observe-se que, conforme mostra a Figura 4.8 o poço tem perfil construtivo telescópico, os filtros foram colocados tendo-se por base o perfil litológico mais arenoso e que o pré-filtro abrange toda extensão do espaço anular. Esta situação estabelece intercomunicação entre os diferentes níveis aquíferos o que poderá ser um benefício em termos de produção, porém estabelece a possibilidade de penetração de poluição que afete as camadas aquíferas mais rasas.

Deve-se ressaltar também que o nível estático desse poço, de 8,69 m acima do terreno possibilita um rebaixamento do potencial hidráulico (cone de depressão) até mesmo maior que a câmara de bombeamento, a qual possui profundidade de 65 m. Assim, a disponibilidade do rebaixamento desse poço é de 73,79 m.

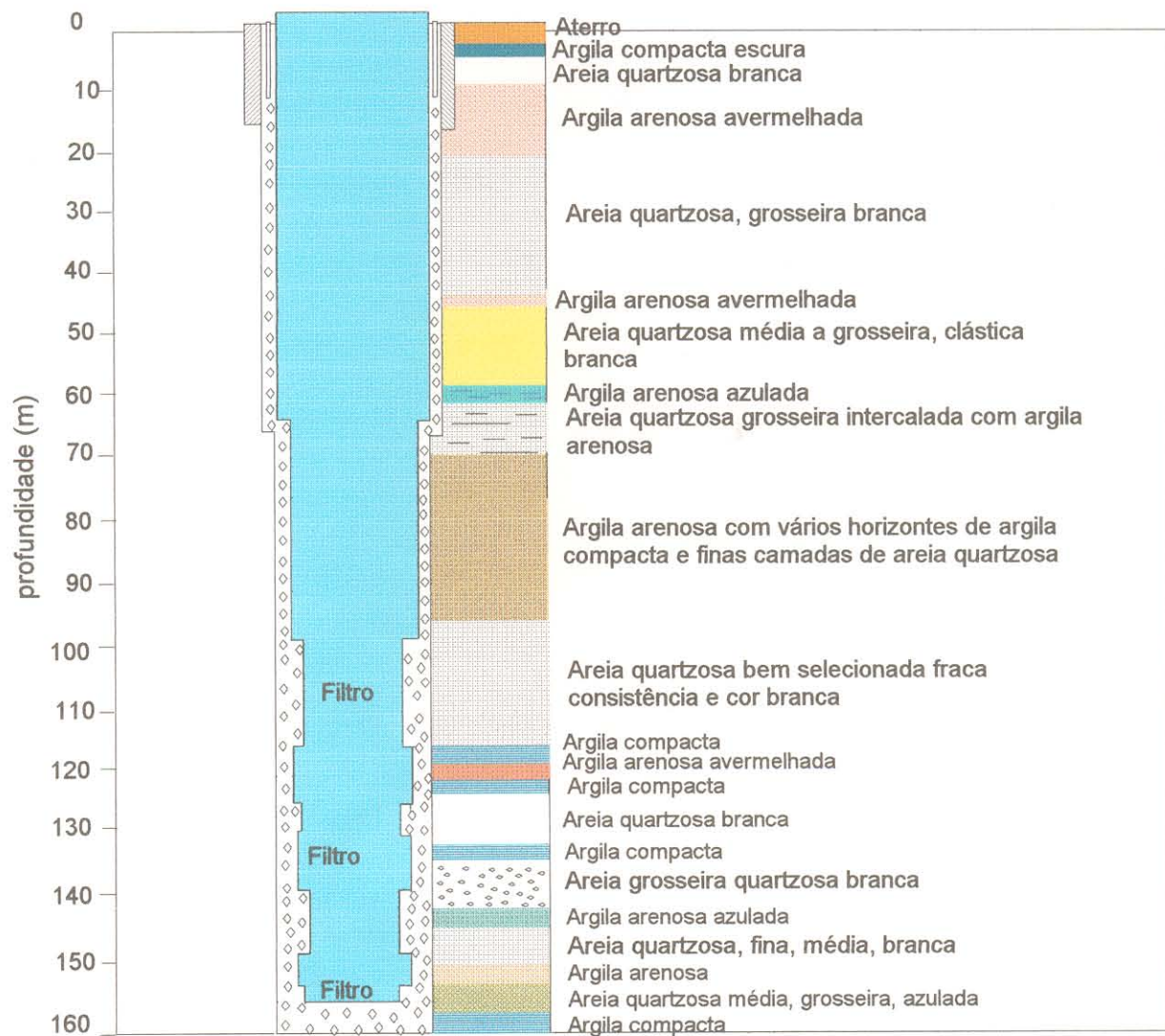


Figura 4.8 - Perfil hidrogeológico do poço ST-10 (nota: poço artesiano com nível estático de 8,69 m acima da superfície do terreno; adaptado de CPRM, 1978).

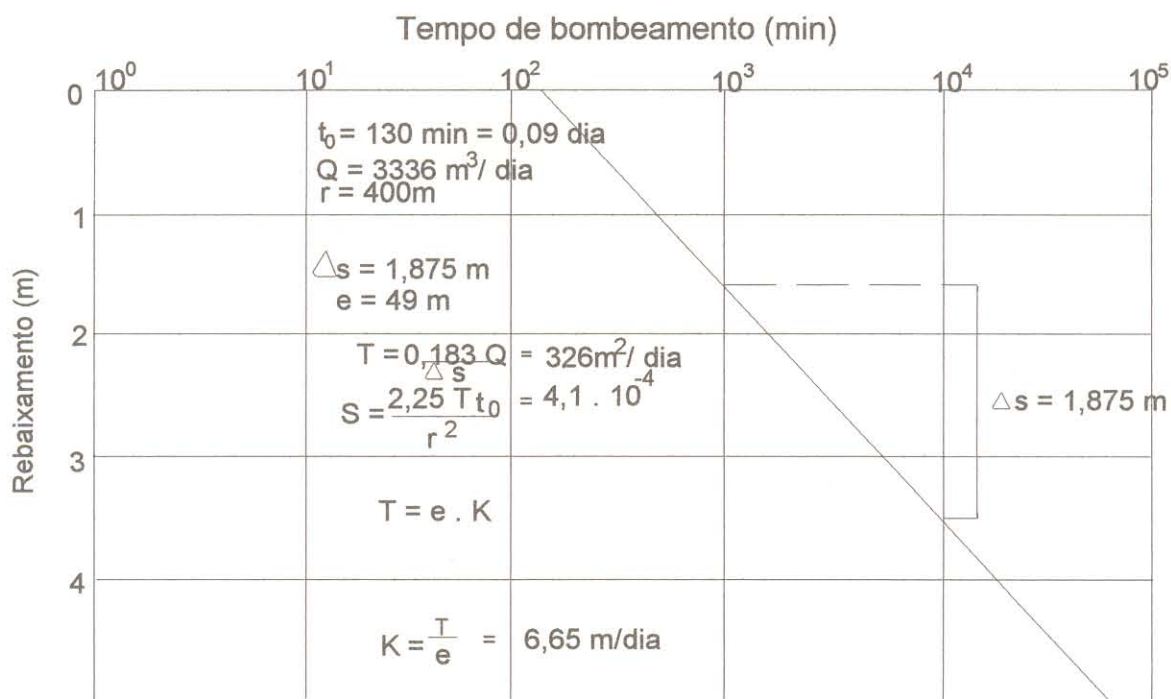


Figura 4.9 - Diagrama de rebaixamento com o tempo, do poço ST-10 tomadas no poço de observação (poço ST-12) distante 400 m do poço bombeado (adaptado de CPRM, 1978).

A Tabela 4.3 apresenta as características hidrodinâmicas dos sistemas aquíferos da Formação Alter do Chão na região de Santarém. Esses parâmetros foram obtidos pela interpretação dos dados de bombeamento, pelo método de Jacob.

As condutividades hidráulicas apresentaram valores compreendidos entre 4,6 m/dia a 18,8 m/dia. Os aquíferos constituídos por areias bem selecionadas e grãos bem arredondados têm alta produção de água. A condutividade hidráulica varia com a seleção dos grãos nos estratos da camada aquífera. A condutividade hidráulica do poço ST-14 apresenta um valor mais elevado em relação aos poços ST-13 e ST-15 (próximos) devido, principalmente, ser a camada arenosa do aquífero nesse local bem selecionada, com grãos bem arredondados.

As transmissividades estão compreendidas entre 132 m²/dia a 790 m²/dia.

Quando a transmissividade atinge valores de 124 m²/dia, ou mais, a produção pode ser adequada para fins de abastecimento municipal, industrial ou de irrigação (DRISCOLL, 1987). Pode-se notar que todos os valores obtidos estão acima desse valor, o que evidencia o elevado potencial dos aquíferos dessa área.

Tabela 4.3 - Parâmetros hidráulicos dos aquíferos da Formação Alter do Chão na região de Santarém.

Poço	Nível Estático (*) (m)	Profundidade do Poço (*) (m)	Condutividade Hidráulica (m/dia)	Coefficiente de Armazenamento (x.10 ⁻⁴)	Coefficiente de Transmissividade (m ² /dia x 10 ²)
ST-04	6,65	98,4	5,9		2,85
ST-08	42,48	74,0	18,8		5,93
ST-10	-8,69	156,1	6,6	4,1	3,26
ST-11	-3,98	157,1		3,5	2,60
ST-12	-5,71	157,1		3,3	2,40
ST-13	-3,19	157,3	5,3		1,69
ST-14	-3,10	126,0	11,6		3,95
ST-15	-7,00	133,8	4,6		1,38
ST-16	-7,50	118,0	6,4		3,16
ST-18	13,80	65,0			1,98
ST-20	16,30	54,0			3,53
ST-21	35,00	72,0			1,58
ST-22	0,12	24,0			7,90
ST-23	3,20	13,5			4,45
ST-31	0,57	22,0			5,30
ST-36	17,30	40,0			1,32

(*) Em relação ao nível do terreno

A variação que se observa nos valores do coeficiente de transmissividade é causada, principalmente, pelas diferentes espessuras das camadas geológicas que constituem os aquíferos nos locais dos ensaios de bombeamento. Foram obtidos poucos valores do coeficiente de armazenamento devido à pouca quantidade de poços de observação disponíveis para a obtenção destes parâmetros.

A condutividade hidráulica tem sua variação relacionada ao grau de arredondamento e seleção da granulometria das camadas aquíferas, bem como da ausência de pequenas frações argilosas nessas camadas. As areias limpas, bem arredondadas e bem selecionadas apresentam os valores mais elevados, como as dos poços ST-08 e ST-14.

Através das análises granulométricas foram estimadas as condutividades hidráulicas dos aquíferos, baseadas na relação de Hazen, em amostras de calha de areias das camadas aquíferas nessa região.

Utilizou-se a relação de Hazen, com a seguinte fórmula:

$$K = c.(d_{90})^2$$

em que:

K = condutividade hidráulica (m/dia).

d_{90} = tamanho efetivo dos grãos (cm)

c = coeficiente de proporcionalidade.

O coeficiente de proporcionalidade foi obtido através da relação gráfica entre as condutividades hidráulicas obtidas através dos ensaios de bombeamento dos poços ST-08 e ST-14 e as condutividades hidráulicas obtidas pela aplicação da relação de Hazen inicialmente considerando-se $c = 1$. Os valores de c variaram de 30 a 40 estando incluso a transformação de unidades, para obtenção dos valores da condutividade hidráulica em m/dia.

A Tabela 4.4 apresenta os valores da condutividade hidráulica estimadas através da relação de Hazen, a qual é aplicável para areias com tamanho efetivo dos grãos compreendidos entre 0,1 mm a 0,3 mm aproximadamente.

Tabela 4.4 - Condutividade hidráulica e diâmetro efetivo dos grãos, de areias das camadas aquíferas, associadas aos poços e profundidades das amostras, da região de Santarém (amostras de calha).

Poço	Profundidade da Amostra (m)	d ₉₀ (mm)	K (m/dia)
ST-02	20	0,27	19,5
ST-03	8-48	0,29	22,1
ST-06	10-28	0,24	15,5
ST-08	20-72	0,26	18,8
ST-14	6-52	0,30	24,3
	72-82	0,28	20,5
	92-128	0,20	11,6
ST-16	14-36	0,31	6,4
ST-18	20-28	0,36	18,8
	32-40	0,26	14,5
	48-56	0,23	18,8
P-02	0-126	0,31	26,0
	131-182	0,17	7,7
	188-258	0,18	9,8
ST-21	16-68	0,26	18,8
ST-23	10-19	0,15	6,5
ST-25	16-68	0,27	19,5
ST-27	24-44	0,27	19,5
ST-31	22-25	0,14	6,0
ST-34	9-50	0,28	20,8
ST-50	28-38	0,31	26,0
P-03	28-40	0,30	24,3

Os valores obtidos indicam condutividades hidráulicas compreendidas entre 6,0 m/dia a 26,0 m/dia. Deve-se ressaltar que essas amostras são de calha e portanto suas composições granulométricas devem estar ligeiramente modificada. Os valores da condutividade hidráulica para os diâmetros efetivos maiores que 0,20 mm

refletem valores mais elevados devido à essa modificação. Outra constatação foi a não recuperação de níveis ou pequenas camadas argilosas nas amostras de calha, as quais foram incorporadas à lama de perfuração, o que influenciou nos resultados mais elevados da condutividade hidráulica dos poços ST-21, ST-18 e ST-16. Os tamanhos de diâmetro efetivo, grande, onde os grãos são angulosos também tendem a resultar em valores mais elevados para a condutividade hidráulica.

4.2.3 - Sistema de Fluxos

O sistema de fluxo principal da água subterrânea nessa região é transmitido dos platôs, zonas de recarga, para as drenagens da água superficial.

Na elaboração do mapa potenciométrico utilizou-se o modelo de simulação de aquífero Flowpath, no Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, com gentil colaboração dessa instituição. Esse modelo foi desenvolvido pela Waterloo Hydrogeologic Software do Canadá.

O modelo Flowpath é do tipo bidimensional baseado em formulação por diferenças finitas. Sua utilização baseia-se na aplicação do fluxo da água subterrânea em equilíbrio, com a equação:

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) \pm Q(x,y) = 0$$

onde:

T_{xx}, T_{yy} = componentes do tensor transmissividade (L^2T^{-1}).

h = potencial hidráulico (L).

$Q(x,y)$ = fluxo volumétrico por unidade de área do aquífero (LT^{-1}).

x,y = coordenadas cartesianas.

Os componentes de tensor de transmissividade são dados por:

$$T_{xx} = K_{xx}b$$

$$T_{yy} = K_{yy}b$$

onde:

K_{xx}, K_{yy} = componentes do tensor de condutividade hidráulica nas direções x e y (LT^{-1}).

b = espessura saturada do aquífero livre ou espessura do aquífero, para os aquíferos confinados (L).

O modelo calcula o balanço de fluxos de entrada e saída do aquífero (recarga e descarga de base nos rios), a relação entre as propriedades do meio poroso, o gradiente hidráulico e o fluxo da água subterrânea, o qual é dado pela lei de Darcy:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}$$

onde:

q_x, q_y = componentes do fluxo (de Darcy) na direção x - y (LT^{-1}).

Os componentes de velocidade linear média da água subterrânea são dados pela fórmula:

$$v_x = \frac{q_x}{\theta}$$

e.

$$v_y = \frac{q_y}{\theta}$$

onde:

θ = porosidade efetiva do fluxo (adimensional).

A velocidade e linha de fluxo da água subterrânea é delineada pelo modelo com as características bidimensionais, sendo dada pela equação:

$$P(x,y) = P(x_0y_0) + \int v dt$$

onde:

$P(x,y)$ = vetor das linhas de fluxo nas coordenadas x e y .

$P(x_0y_0)$ = vetor inicial das linhas de fluxo nas coordenadas x e y .

v = velocidade linear média da água subterrânea.

t = tempo de análise.

O tempo de percurso resulta como produto da integração da equação de velocidade e linha de fluxo da água subterrânea. O tempo de percurso de uma partícula do fluido é obtido pela fórmula:

$$t = t_0 + \int dt$$

onde:

t_0 = tempo inicial;

dt = incremento de tempo infinitesimal que corresponde ao incremento vdt .

O modelo utiliza como entrada as propriedades do aquífero como condutividade hidráulica, porosidade, cotas do topo e da base do aquífero, fluxos subterrâneos, taxa de recarga e de evapotranspiração, vazão dos poços (ou taxa de bombeamento), cotas de carga constante a montante, cotas da lâmina d'água e do fundo de corpos de água superficial, fator de drenagem (taxa de recessão) e pontos de aferimento.

Considerou-se na aplicação do modelo, com a devida simplificação e aproximação, o aquífero livre, situado na parte superior da Formação Alter do Chão, em Santarém. A pequena quantidade de dados disponíveis dos aquíferos confinados

não viabilizou a elaboração de um mapa potenciométrico, em que se pudesse visualizar o comportamento da água subterrânea nesses aquíferos.

O aquífero livre foi subdividido em quatro blocos com condutividades hidráulicas de 6 m/dia (dois blocos) na parte oeste e sul da área, 8 m/dia na parte central da área e 10 m/dia na parte marginal dos rios Tapajós e Amazonas. As fronteiras foram definidas pelos interflúvios ou divisores de água das bacias hidrográficas. As cargas constantes dos níveis da água subterrânea dos poços basearam-se no mapa topográfico. Os corpos de água superficial são representados pelos igarapés Irurá e Urumari e pelos rios Tapajós e Amazonas, com cotas das lâminas d'água e do fundo. Considerou-se para o cálculo das cotas do fundo, profundidades de 0,5 m e de 1 m para os igarapés e de 35 m para os rios Tapajós e Amazonas. O coeficiente de recessão utilizado foi o obtido na bacia do igarapé São Brás ($\alpha = 1,32 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$) e a taxa de recarga considerada constante foi de 250 mm (12% de precipitação pluviométrica). Como ponto de aferimento utilizou-se o nível d'água do poço ST-31.

As cotas topográficas foram obtidas a partir do mapa topográfico planialtimétrico, na escala de 1 : 8 000, com as curvas de níveis equidistantes de 5 m, gentilmente cedidas pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

A Figura 4.10 apresenta o mapa potenciométrico da água subterrânea na cidade de Santarém, com base nos dados dos poços e nas demais características hidrogeológicas. O mapa mostra a distribuição do potencial hidráulico da água subterrânea do aquífero livre situado na parte superior da Formação Alter do Chão. As curvas potenciométricas representam as condições de equilíbrio, e seu valor (em metros) indica a posição relativa do nível da água sobre a base do aquífero, tomada como datum, as setas indicam o sentido de escoamento da água subterrânea.

Pode-se notar que o fluxo local e intermediário alimenta os igarapés e é descarregado nos rios Tapajós e Amazonas. Na parte central, que corresponde à área do antigo aeroporto, o efeito topográfico (elevado) reflete nas equipotenciais da água subterrânea, havendo uma mudança no padrão de seu traçado.

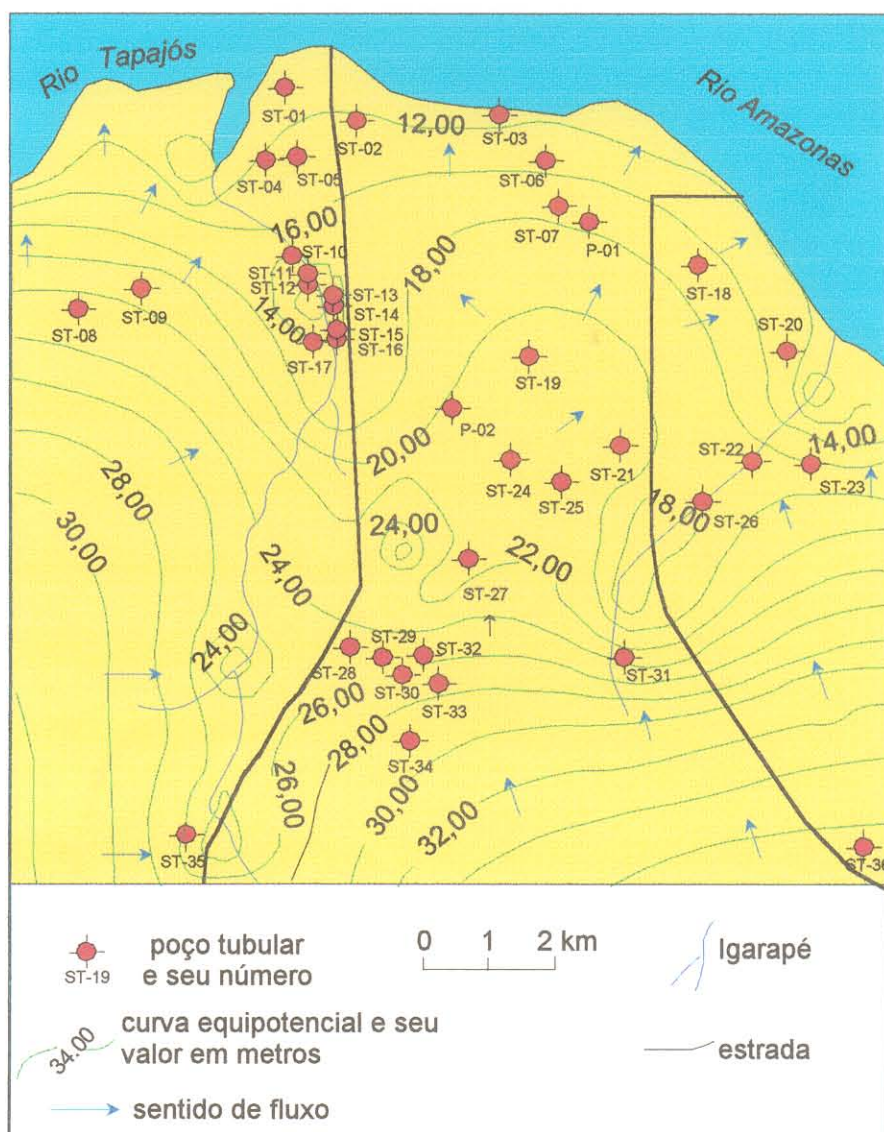


Figura 4.10 - Mapa potenciométrico do aquífero livre da Formação Alter do Chão em Santarém

A Figura 4.11 apresenta a seção esquemática de fluxo dessa área, a qual indica que o fluxo local e intermediário alimenta fontes e igarapés, enquanto o sistema de fluxo regional é basicamente descarregado no exutório natural dessa área, constituída pelo rio Tapajós e pelo rio Amazonas.

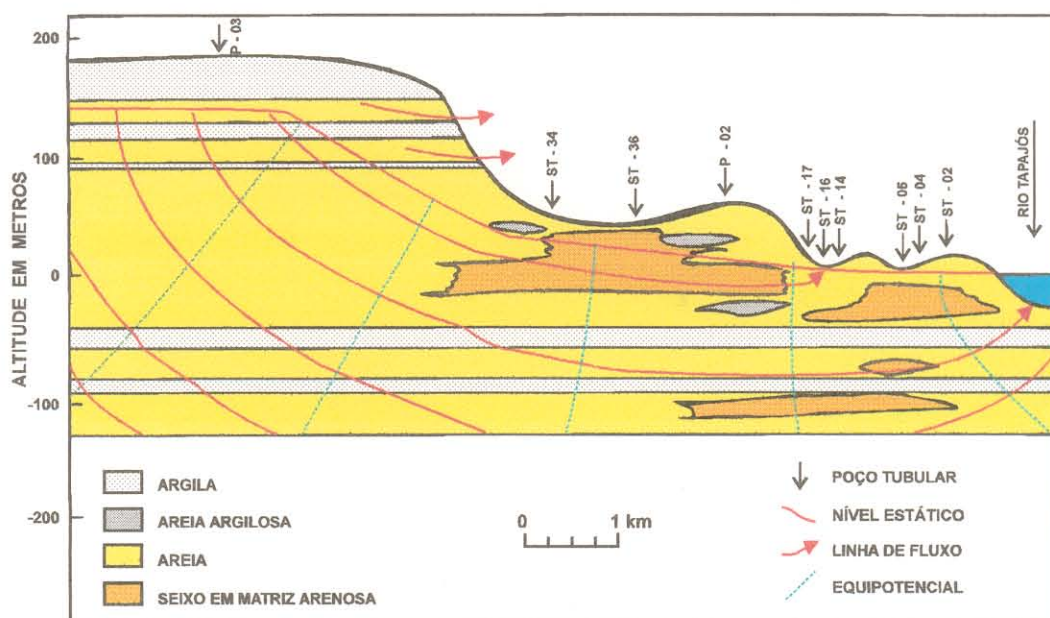


Figura 4.11 - Esquema do sistema de fluxo da Formação Alter do Chão na região de Santarém (baseado na Figura 3.4).

4.3 - QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A qualidade da água é uma consequência do seu estado natural, físico e químico, bem como de qualquer alteração que possa ter ocorrido devido à ação humana sobre a mesma. A utilização da água para uma determinada atividade é determinada pela sua qualidade. Um dos aspectos mais importante da gestão da água subterrânea é a proteção da sua qualidade no aquífero.

A alta capacidade de dissolução da água e sua elevada reatividade faz com que as águas naturais contenham uma grande variedade de substâncias dissolvidas. As características físico-químicas dessas águas, resultam de dissoluções e outras reações químicas com sólidos, líquidos e gases, com os quais entram em contacto durante as várias partes do ciclo hidrológico.

O estudo da qualidade da água subterrânea na região de Santarém foi feito com amostragens e análises físico-químicas da água de poços e fontes dessa área. A Figura 4.12 apresenta a distribuição dos locais das amostras e a Tabela 4.5 os resultados obtidos com essas análises, segundo as técnicas analíticas para água (APHA, 1980).

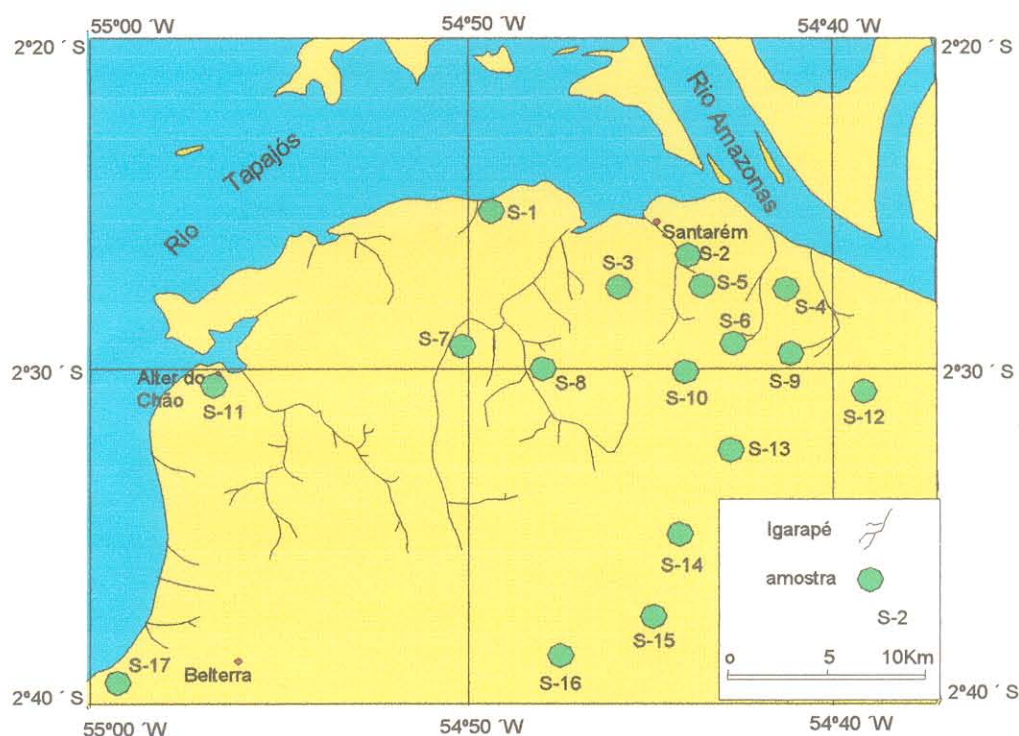


Figura 4.12 - Localização das amostras da água subterrânea para análises físico-químicas, da região de Santarém.

Tabela 4.5 - Análises físico-químicas de amostras da água subterrânea da região de Santarém (as amostras S2, S3, S4, S5, S6 e S7 são dos poços ST-16, ST-08, ST-23, ST-27, ST-22, ST-31 e ST-50, respectivamente; as amostras S12 e S17 são das fontes Emaús e Aramanai, respectivamente; as demais amostras correspondem, a outros poços tubulares dessa área).

PARÂMETROS						A	M	O	S	T	R	A	S				
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17
PH	4,6	4,7	4,0	4,2	4,2	4,3	4,6	4,0	4,0	4,7	4,7	4,3	4,4	4,4	4,3	4,7	4,3
T(°C)	28,3	29,3	29,6	26,8	27,6	26,5	27,4	28,0	27,8	27,6	28,9	25,8	27,0	26,5	26,3	26,3	25,0
Condutividade Elétrica (µS/cm)	17,8	23,1	23,3	27,2	22,7	26,3	19,6	16,4	19,2	11,4	37,2	24,2	23,2	28,0	27,0	23,6	25,0
Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃)	1,0	3,7	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	3,0	0,7	0,9	1,0	1,0	2,0	1,5
Dureza (mg/L de CaCO ₃)	2,3	3,4	2,2	2,2	2,7	3,3	4,0	2,2	1,1	2,3	4,3	1,2	4,1	3,7	3,6	2,8	3,3
Na (mg/L)	0,60	2,30	0,70	0,90	0,90	0,90	0,60	2,30	0,80	0,80	1,40	0,90	2,00	2,10	1,80	2,00	1,20
K (mg/L)	0,10	1,50	0,40	0,30	0,20	0,20	0,20	0,80	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,80	0,40	2,4	1,10
Ca (mg/L)	0,60	1,20	0,60	1,00	0,60	1,20	0,80	0,80	0,40	0,60	1,60	0,40	1,00	1,00	0,80	0,80	1,00
Mg (mg/L)	0,20	0,10	0,30	0,3	0,30	0,20	0,50	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10	0,40	0,30	0,40	0,20	0,20
Fe _{total} (mg/L)	0,01	0,05	0,00	0,03	0,01	0,03	0,06	0,02	0,12	0,18	0,40	0,05	0,06	0,18	0,07	0,20	0,02
Cl (mg/L)	1,50	3,20	1,50	2,20	1,80	2,20	1,80	3,8	1,50	2,00	2,20	1,80	4,30	4,20	3,20	4,60	2,00
SO ₄ (mg/L)	1,00	2,40	1,00	2,40	1,40	2,00	2,40	2,0	0,80	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,40	2,0	2,50
HCO ₃ (mg/L)	1,20	4,40	1,80	1,50	1,20	1,20	1,20	1,20	0,80	1,20	3,60	0,80	1,00	1,20	1,20	2,4	1,80
SiO ₂ (mg/L)		1,64	3,42	0,73	3,32	1,02	5,13	3,21	2,14	2,35	2,03	2,05	0,92	0,87	1,00	1,18	1,39

Os resultados evidenciam concentrações muito baixa dos constituintes em solução. Esses baixos teores resultam da natureza do material geológico da Formação Alter do Chão, constituída de sedimentos clásticos de origem continental, de composição predominantemente quartzosa, através dos quais a água subterrânea circula, bem como da elevada pluviosidade, característica de clima equatorial úmido dessa região.

A zona do solo, com sua intensa atividade biológica, tem grande capacidade para alterar as características físico-químicas da água quando a infiltração ocorre. Em seu percurso, iniciado a partir da precipitação pluviométrica, prosseguindo com a infiltração e circulação, a água subterrânea na região de Santarém interage com as rochas sedimentares, constituídas por sedimentos clásticos de origem continental. Essa interação que se traduz por uma variedade de processos geoquímicos, como reações de óxido-redução, de trocas de base, de hidrólises e de dissoluções, revela-se nos constituintes dissolvidos e suas concentrações.

A temperatura da água subterrânea nessa região reflete as condições climáticas, seus valores, determinado *in situ* situam-se entre 25,0 °C a 29,6 °C.

A condutância específica ou condutividade elétrica apresentou valores no intervalo de 11,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 37,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valores estes corrigidos a 25,0°C e determinados *in situ*. Tais valores são devidos às baixas concentrações dos constituintes em solução.

O pH dessas águas medido *in situ* situa-se no intervalo de 4,0 a 4,7. Esses baixos valores relacionam-se à dissolução do CO_2 livre, principalmente no solo, e sendo baixa a concentração de cálcio, o equilíbrio do sistema carbonato *tende para o H_2CO_3 , estável em pH menores que 5*. O íon hidrogênio (ou melhor o íon hidrônio, formado pela interação da água com o íon hidrogênio) tem grande importância no ataque aos minerais e rochas pelas águas naturais. As principais

fontes do íon hidrogênio são de reações de hidrólise, dissociações de soluções ácidas, como no sistema $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, e reações de oxidação, como as de compostos de enxofre. Nos sistemas de água naturais onde a produção do íon H^+ é mais rápida que a taxa pela qual pode reagir com os minerais disponíveis, o pH pode permanecer mais ácido que aquele que pode ser atingido em equilíbrio no sistema $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (HEM, 1970). As águas com baixo pH favorecem a solubilização de ferro. Em redes de distribuição quando há interrupção do fornecimento de água ou queda de pressão possibilita com a entrada do ar, o oxigênio oxidar os compostos de ferro divalente em solução e resultar na precipitação dos óxidos e hidróxidos de ferro nas canalizações. Os valores obtidos, relativamente baixos, refletem a elevada taxa de circulação (renovação) da água subterrânea no sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão.

A alcalinidade dessas águas apresenta baixos valores, compreendidos entre 0,79 mg/L de CaCO_3 e 3,7 mg/L de CaCO_3 .

A dureza também apresenta baixos valores situados entre 1,1 mg/L de CaCO_3 a 4,3 mg/L de CaCO_3 .

A concentração obtida para o ferro dissolvido apresenta valores menores que 0,4 mg/L, sendo, em geral, menores que 0,2 mg/L. Trata-se portanto teores favoráveis para utilização industrial e de consumo, da água subterrânea.

Os valores da concentração de sílica são baixos, compreendidos entre 0,73 mg/L e 3,42 mg/L. A sílica ocorre na forma coloidal e resulta da lixiviação das rochas sedimentares da Formação Alter do Chão.

A Figura 4.13 apresenta em diagrama de barras as concentrações dos principais constituintes, em unidades de miliequivalente grama por litro, de amostras de água subterrânea dessa região selecionadas para evidenciar a variação dessas concentrações. Pode-se notar baixos valores e pequena variação dos mesmos.

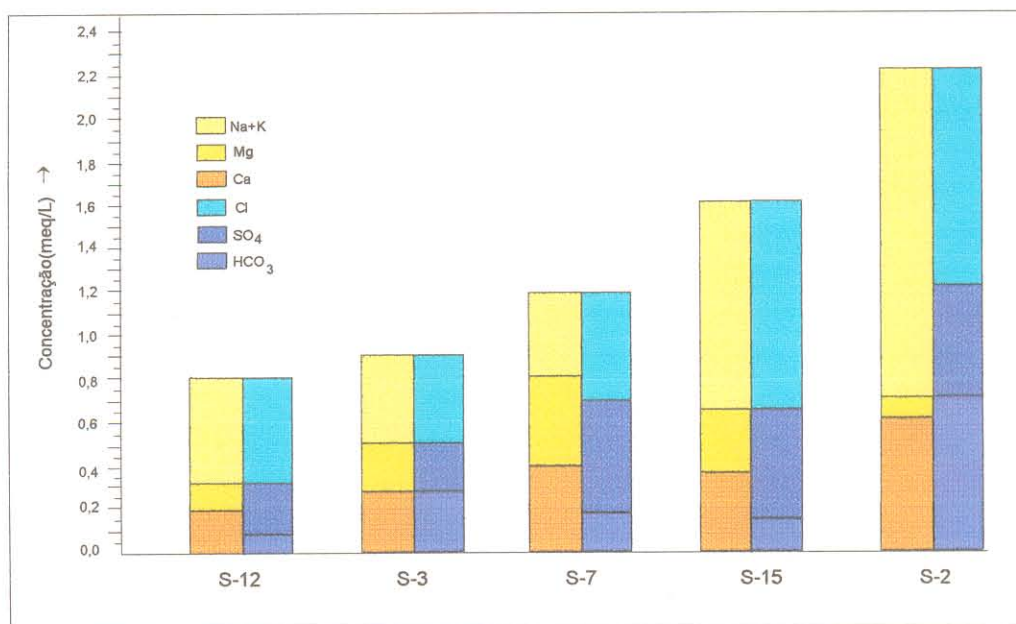


Figura 4.13 - Diagrama de barras de amostras selecionadas da água subterrânea da região de Santarém.

4.3.1 - Caracterização Hidrogeoquímica

A água subterrânea adquire suas características físico-químicas durante seu fluxo através dos aquíferos dessa região. A Figura 4.14 apresenta os dados das análises da água em diagrama trilinear de Piper (HILL, 1940; PIPER, 1944). Os valores dos principais constituintes estão representados em unidades percentuais de miliequivalente grama por litro, para os cátions e para os ânions, permitindo uma identificação dos fácies hidroquímicos. O losango situado entre os triângulos dos cátions e dos ânions representa a composição conjunta dos cátions e ânions.

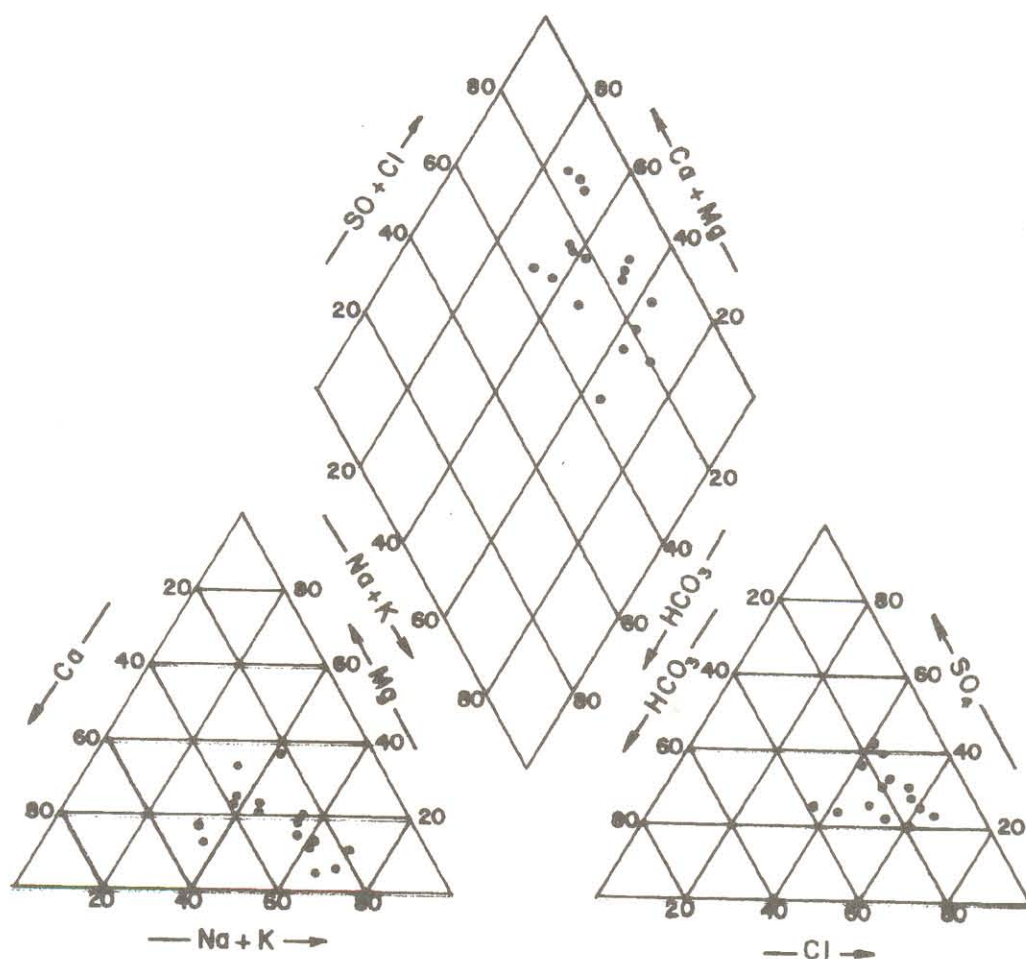


Figura 4.14 - Diagrama trilinear de Piper (HILL, 1940; PIPER, 1944) de amostras da água subterrânea da região de Santarém.

O tipo de água resulta da proporção dos principais constituintes dissolvidos. Observa-se uma predominância de águas do tipo sódio-cloretadas. Águas do tipo mista, tanto para os cátions como para os ânions, também ocorrem, porém em menores proporções.

A Figura 4.15 apresenta análises de amostras da água subterrânea em diagrama semi-logarítmico de Schöeller modificado (SCHÖELLER, 1962), onde as concentrações estão em unidades de miliequivalente-grama por litro (r). Pode-se notar, além das concentrações absolutas desses constituintes, também suas relações.

A predominância para as águas dessa região é de $rNa > rCa > rMg$ e $rCl > rHCO_3 > rSO_4$.

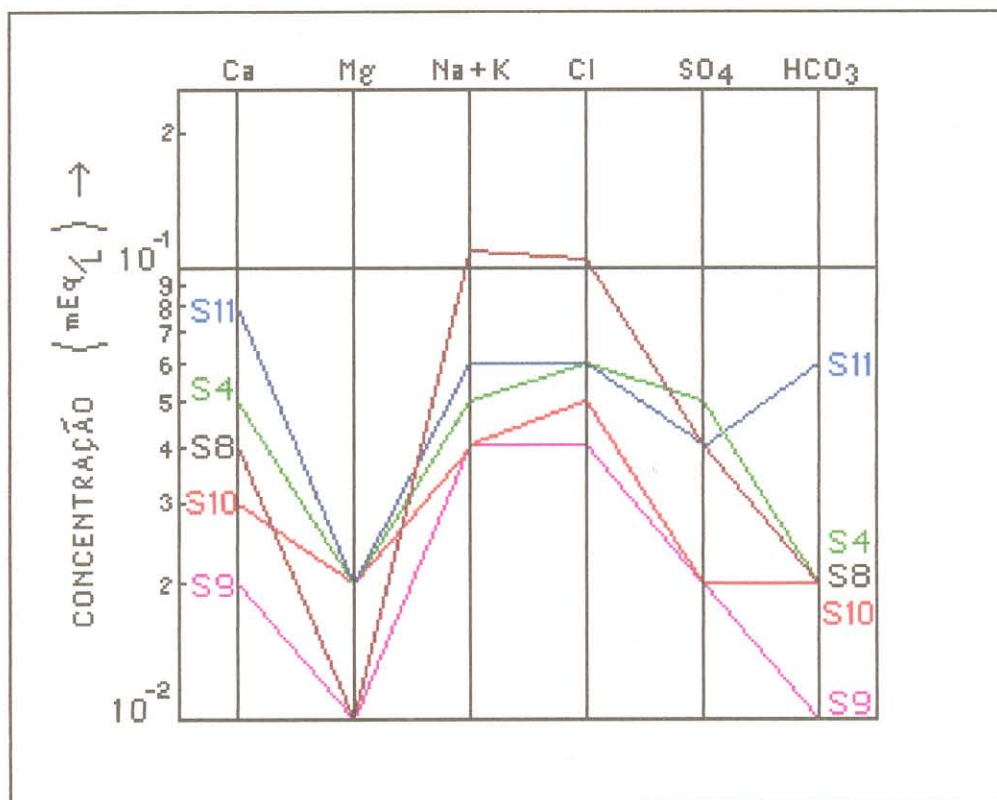


Figura 4.15 - Diagrama de Schöeller (modificado) (SCHÖELLER, 1962) de amostras da água subterrânea da região de Santarém.

O aumento das concentrações relativas observado está relacionado, principalmente, ao tempo e percurso da água subterrânea nos aquíferos dessa área. As concentrações do sódio e do cloreto resultam do transporte de sais cíclicos, de origem marinha. STALLARD (1980) avaliou essa contribuição na descarga líquida do rio Amazonas em Óbidos.

4.3.2 - Potabilidade

De uma maneira geral, a água potável é a que pode ser consumida sem perigo algum para a saúde.

Devido à eficiente filtragem a que é submetida no subsolo a qualidade da água subterrânea não apresenta materiais em suspensão e é praticamente isenta de bactérias, contrastando com a qualidade da água superficial, em geral turbida e com considerável conteúdo de bactérias. A água subterrânea é, pois, de superior qualidade sanitária e muito menos vulnerável à contaminação.

As amostragens e análises físico-químicas, da água subterrânea dessa região destinaram-se à caracterização de sua qualidade. A determinação das diretrizes de utilização específica da água é muito vasta e requer condições especiais de amostragem e análise.

A utilização de água para consumo humano baseia-se nos padrões de potabilidade. Os limites desses padrões são estipulados de forma a atender às características de estética e sabor, e não ser prejudicial à saúde. Concentrações excessivas dos constituintes dissolvidos como sódio, magnésio, ferro, cloreto e sulfato, mesmo não sendo nocivas à saúde, produzem efeitos organolépticos que podem impossibilitar o consumo dessas águas (FENZL, 1988).

Os padrões adotados referem-se ao Decreto N° 39.367, de 9 de março de 1977, que dispõe sobre as normas, o padrão de potabilidade e dá outras providências.

A Tabela 4.6 apresenta o valor mínimo e máximo dos parâmetros obtidos nas análises físico-químicas, o valor das normas de potabilidade referida como valor mínimo desejável e valor máximo permissível do Decreto N° 39.367 e os padrões recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 1984).

Tabela 4.6 - Valor mínimo e máximo obtido nos parâmetros analisados da água subterrânea da região de Santarém, valor mínimo desejável e máximo permissível das normas brasileiras de potabilidade, do decreto nº 39.367 e os padrões recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 1984).

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Decreto nº 39.367		Padrão Recomendado Pela OMS
				Valor Mínimo Desejável	Valor Máximo Permissível	
Temperatura	°C	25,0	29,3			
pH		4,0	4,7	---	---	6,5 - 8,5
Condutividade Elétrica	µ S/cm	11,4	37,2			
Alcalinidade	Mg/L de CaCO ₃	1,0	4,5	---	---	
Dureza	Mg/L de CaCO ₃	1,1	4,0	---	---	500
Na	mg/L	0,6	2,3			200
K	mg/L	0,1	2,4			
Ca	mg/L	0,4	1,6			
Mg	mg/L	0,1	0,5			
Fe total	mg/L	0,0	0,4	0,3	1,0	0,3
Cl	mg/L	1,5	4,6	200	600	250
SO ₄	mg/L	0,8	2,5	---	---	400
HCO ₃	mg/L	0,8	4,4			
SiO ₂	mg/L	0,7	5,1			

Constata-se por essas tabelas que as concentrações obtidas nos parâmetros físico-químicos analisados e que incluem os principais constituintes em solução, apresentam valores pequenos, muito menores que os valores mínimos desejáveis e máximos permissíveis de acordo com os padrões de potabilidade constante do Decreto N° 39.367 e dos critérios recomendados pela OMS. O único parâmetro com pequeno afastamento dos critérios recomendados pela OMS é o pH (mais baixo). O teor de nitrato obtido em análises de algumas amostras, apresenta baixos valores, compreendidos entre 0,00 mg/L a 3,32 mg/L

Portanto a água subterrânea da região de Santarém em seu estado natural apresenta potabilidade excelente. A conservação da qualidade da água subterrânea dessa região é fundamental para a sua utilização.

4.4 - VULNERABILIDADE E PROTEÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A vulnerabilidade da água subterrânea é um conceito ainda recente e em desenvolvimento. Originalmente, a vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação foi baseada na suposição de que o ambiente físico pode fornecer algum grau de proteção à água subterrânea em relação a um contaminante que entra em subsuperfície (MARGAT, 1968). Os materiais geológicos podem atuar como filtros naturais para alguns contaminantes.

A descrição do grau de vulnerabilidade da água subterrânea aos contaminantes em função das condições hidrogeológicas mostra que a proteção natural proporcionada pelo meio ambiente varia em diferentes locais (ALBINET & MARGAT, 1970).

O grau de atenuação que ocorre entre a fonte contaminante e o aquífero é função de processos hidráulicos, da facilidade de acesso dos poluentes à zona saturada e de processos físico-químicos de atenuação e degradação de contaminantes. A camada não saturada e situada na parte superior do sistema hidrogeológico exerce importante proteção da qualidade da água subterrânea, agindo como um sistema natural de tratamento de dejetos, constituindo-se na função filtro dos aquíferos (HORDON, 1977). O movimento da água nessa zona é geralmente lento e em ambiente aeróbico propiciando a biodegradação da matéria orgânica, eliminação de micro-organismos e atenuação de substâncias químicas.

A velocidade de infiltração da água na zona não saturada, determinada em terrenos argilosos da Formação Alter do Chão, às proximidades de Manaus, com utilização de traçadores de isótopos de hidrogênio, apresentou valor de 1,1 cm/dia ou 4m/ano (ARAGUÁS - ARAGUÁS et al, 1992).

A proteção da água subterrânea consiste essencialmente na preservação de sua qualidade no aquífero. Para isso deve-se tomar medidas de controle das cargas de poluentes potenciais. Um aspecto importante para esse controle é a educação. O esclarecimento ou conscientização da população sobre a proteção ambiental de uma área é mais eficiente que suas normas de proteção.

Nessa região atualmente apenas a área urbana apresenta risco de poluição da água subterrânea. As cargas de contaminantes potenciais são relacionados à: fossas, aterros sanitários, cemitérios, vazamento de postos de combustíveis, vazamento de esgotos, descarga de águas servidas, construção inadequada de poços e poços abandonados.

Os poços ou sistemas de captação de água subterrânea devem situar-se a uma distância adequada dessas fontes potenciais de contaminação, com delimitação de sua área de proteção (vide item 4.4.3).

Um aspecto difícil na proteção da água subterrânea dessa área é o controle de poços abandonados. Eles devem ser tamponados com preenchimento de material argiloso. Construções inadequadas de poços, sem cimentação da parte superior do espaço anular, podem causar a migração da água superficial ou subterrânea rasa contaminada para a parte profunda do aquífero livre ou para os aquíferos confinados mais profundos.

Poços construídos e/ou abandonados sem tecnologia adequada podem se transformar em principal fonte de contaminação da água subterrânea de uma área (PACHECO & REBOUÇAS, 1985).

A vulnerabilidade da água subterrânea deve ser considerada de importância fundamental na proteção ambiental dessa área. Uma maneira efetiva de se proteger a qualidade da água subterrânea é através da utilização de mapas de vulnerabilidade dos aquíferos, os quais devem subsidiar planos de desenvolvimento e guia de atividades humanas para minimizar os impactos na qualidade da água. O mapeamento da vulnerabilidade da água subterrânea possibilita a definição de programas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos (HIRATA, 1994).

4.4.1 - Caracterização da Vulnerabilidade

A vulnerabilidade natural dos aquíferos baseia-se essencialmente em suas características hidrogeológicas. A avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos da região de Santarém utilizou os critérios propostos por FOSTER (1987), adaptados às condições dessa área. Na avaliação da vulnerabilidade aplicou-se o sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero, apresentado na Figura 4.16 (FOSTER & HIRATA, 1988).

O grande número de parâmetros das características hidrogeológicas como condutividade hidráulica, porosidade efetiva, umidade da zona não saturada, características granulométricas, capacidade de atenuação e outros, necessários à caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos, torna impraticável sua obtenção na maioria dos estudos, sendo simplificados e reduzidos nestes critérios a apenas três:

- Tipo de ocorrência da água subterrânea (condição do aquífero).
- Características litológicas (da zona não saturada).
- Profundidade do nível d'água (espessura da zona não saturada).

As diferentes categorias de vulnerabilidade foram estabelecidas através da combinação dos valores atribuídos a esses três parâmetros.

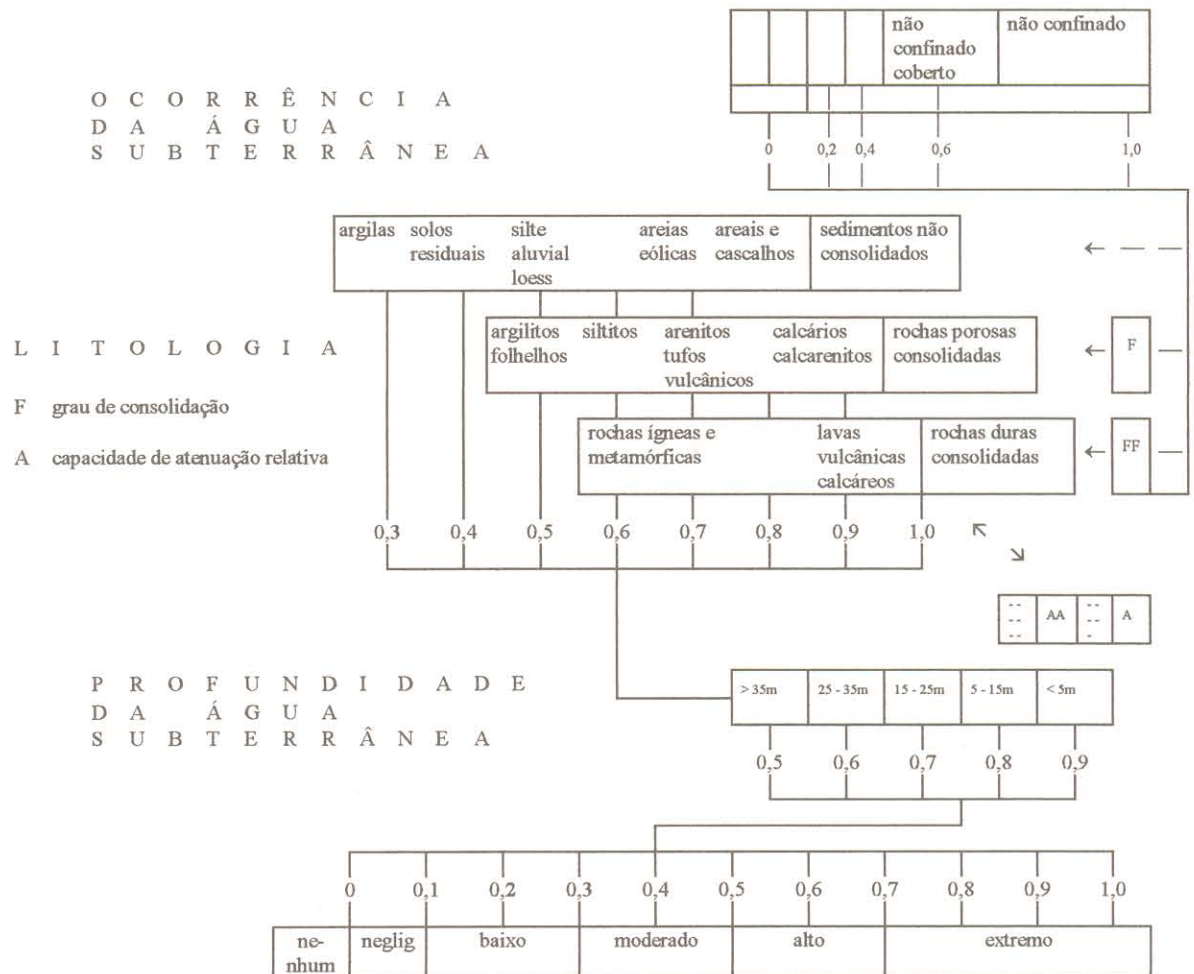


Figura 4.16 - Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade do aquífero (adaptado de FOSTER & HIRATA, 1988).

O tipo de ocorrência da água subterrânea ou condição do aquífero nessa área apresenta na parte sul aquíferos livres com cobertura argilosa (índice 0,6) e na parte norte aquíferos livres (índice 1,0). Subjacente ao aquífero livre ocorrem os

aquíferos confinados, que segundo a topografia do local podem ser também artesianos (índice 0,2).

A litologia considerada nesta avaliação constitui-se de argilas (índice 0,3), siltes, argilas arenosas, areias argilosas (índice 0,5) e areias com ou sem seixos (índice 0,7); da zona não saturada.

A profundidade do nível da água ou espessura da zona não saturada foi tomada em quatro classes: maior que 35 m (índice 0,5), de 35 a 25 m (índice 0,6), de 25 a 15 m (índice 0,7), de 15 a 5 m (índice 0,8) e menor que 5 m (índice 0,9).

Com esses três parâmetros e seus respectivos índices definidos, multiplicando-se entre si os índices relacionados, obteve-se o índice de vulnerabilidade (Tabela 4.7) e o grau de vulnerabilidade à contaminação (Tabela 4.8) da água subterrânea na região de Santarém.

Tabela 4.7 - Índice de vulnerabilidade da água subterrânea na região de Santarém.

Espessura não saturada				< 5 m	5-15 m	15-25 m	25-35 m	> 35 m
Característica Litológica	Índice	Tipo de Aquífero	Índice	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
Arenoso	0,70	Livre	1,00	0,63	0,56	0,49	0,42	0,35
		Livre com Cobertura	0,60	0,38	0,34	0,29	0,25	0,21
		Confinado	0,20	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07
Siltoso Argilo-Arenoso	0,50	Livre	1,00	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
		Livre com Cobertura	0,60	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
		Confinado	0,20	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05
Argiloso	0,30	Livre	1,00	0,27	0,24	0,21	0,18	0,15
		Livre com Cobertura	0,60	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09
		Confinado	0,20	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03

Os índices de vulnerabilidade à contaminação obtidos mostram apenas dois valores maiores que 0,5, o que corresponde ao grau de vulnerabilidade alta, os demais valores são todos menores que 0,5, o que corresponde a vulnerabilidades moderada, baixa e negligenciável.

Tabela 4.8 - Grau de vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea na região de Santarém.

Espessura não saturada				< 5 m	5-15 m	15-25 m	25-35 m	> 35 m
Característica Litológica	Índice	Tipo de Aquífero	Índice	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
		Livre	1,00	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
Arenoso	0,70	Livre com Cobertura	0,60	Moderada	Moderada	Baixa	Baixa	Baixa
		Confinado	0,20	Baixa	Baixa	Baixa	Neglig.	Neglig.
		Livre	1,00	Moderada	Moderada	Moderada	Moderada	Baixa
Siltoso Argilo-Arenoso	0,50	Livre com Cobertura	0,60	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
		Confinado	0,20	Neglig.	Neglig.	Neglig.	Neglig.	Neglig.
		Livre	1,00	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Argiloso	0,30	Livre com Cobertura	0,60	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Neglig.
		Confinado	0,20	Neglig.	Neglig.	Neglig.	Neglig.	Neglig.

4.4.2 - Mapa de Vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade da água subterrânea nessa área está relacionado às características hidrogeológicas do ambiente sub-superficial que determinam sua maior ou menor vulnerabilidade.

A distribuição espacial dos graus de vulnerabilidade dos sistemas aquíferos nessa região é apresentada na Figura 4.17 considerando os graus de vulnerabilidade obtidos (Tabela 4.6) para o aquífero livre situado na parte superior da Formação Alter do Chão.

Os graus de vulnerabilidade dos sistemas aquíferos confinados apresentam valores baixos e negligenciáveis. Esses aquíferos são subjacentes ao aquífero livre e aos aquíferos e/ou aquíclides criando uma proteção adicional, e estão sob pressão, gerando grandes fluxos ascendentes das águas, impedindo o ingresso de contaminantes. A presença de uma camada confinante restringe o movimento de contaminantes para o interior de aquíferos confinados. Os aquíferos confinados possuem, portanto, maior proteção natural para a infiltração de contaminantes a partir da superfície do terreno e são pois, menos vulneráveis à poluição. Na prática, pode-se considerar a vulnerabilidade natural negligenciável para todo o sistema dos aquíferos confinados da Formação Alter do Chão na região de Santarém.

Nessa área os aquíferos mais importantes são os aquíferos confinados. Não obstante deve-se considerar as características do aquífero livre tendo em vista que a poluição que o afetar poderá ser transferida aos aquíferos confinados na medida em que os poços profundos não sejam construídos com tecnologia adequada e que os poços abandonados não sejam tampanados, situação freqüente nessa região.

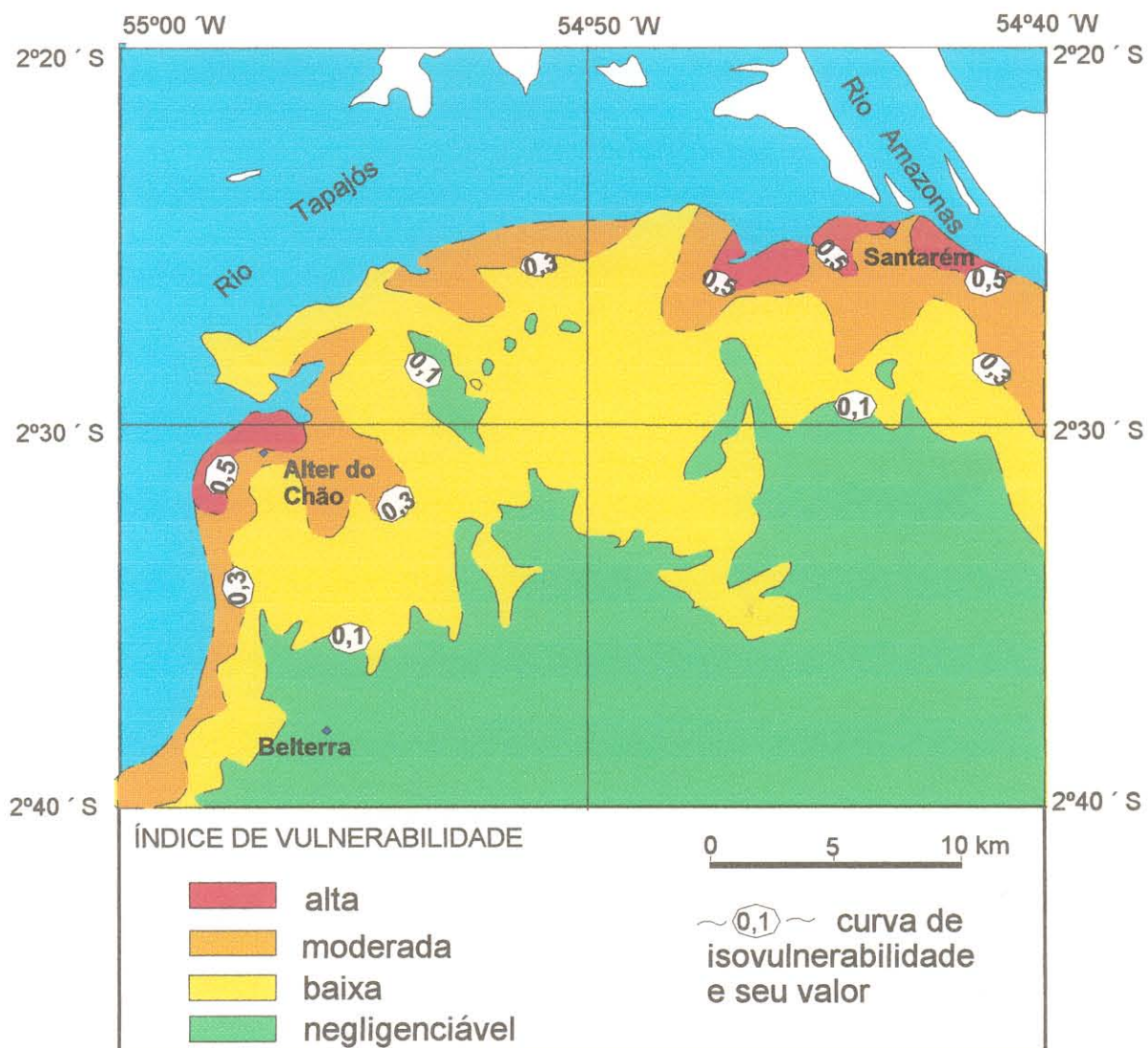


Figura 4.17 - Mapa de vulnerabilidade da água subterrânea da região de Santarém.

Pode-se notar pelo mapa de vulnerabilidade (Figura 4.17), graus de vulnerabilidade baixa na parte sul da área, nos platôs, devido, principalmente, à cobertura argilosa e à maior profundidade da água subterrânea. A parte norte da

área, com maiores graus de vulnerabilidade, sendo uma zona de descarga da água subterrânea, apresenta a possibilidade de diluição dos contaminantes, constituindo-se num fator de diminuição do risco de contaminação.

A maior parte da região possui graus de vulnerabilidade negligenciável, baixa e moderada, com índices de vulnerabilidade menor que 0,5. Apenas uma pequena parte dessa área apresenta índice compreendido entre 0,63 e 0,50, já considerado de grau alto nessa escala de vulnerabilidade que apresenta o valor máximo de 1,00. Essas áreas situam-se próximo à margem do rio Tapajós, na zona urbana de Santarém e de Alter do Chão.

Ressalte-se que o mapa de vulnerabilidade aqui apresentado mostra a vulnerabilidade relativa de um local em relação a outro e não valores absolutos. Essa vulnerabilidade natural está fora do contexto de um contaminante específico ou de uma fonte específica de contaminação.

O risco de contaminação é a combinação da vulnerabilidade natural com a carga de poluente real e sua forma de aplicação. Uma área com maior grau de vulnerabilidade poderá não ter risco de poluição devido à ausência de uma carga poluente e vice-versa.

O mapa de vulnerabilidade da água subterrânea dessa região é um dos mais importantes do conjunto de mapas ambientais. Constitui-se em importante instrumento para o planejamento das condições de uso do solo, em particular na seleção de sítios para a deposição de resíduos (lixeiros), localização de cemitérios e outras atividades de impacto ambiental.

4.4.3 - Área de Proteção de Poços

A área de proteção de um poço engloba a superfície e sub-superfície em torno do mesmo, a ser protegida, sendo restringido o uso do terreno ou parte dele, para as atividades de ocupação humana. É uma das formas eficientes de preservação da qualidade da água subterrânea. O traçado desta área resulta das características hidrogeológicas do aquífero no local do poço. Nesta área um contaminante pode deslocar-se e provavelmente atingir o poço em bombeamento.

Um poço em bombeamento provoca mudança nos potenciais hidráulicos do aquífero ao seu redor. Essas áreas próximas ao poço são chamadas de zona de influência e zona de contribuição. A zona de influência corresponde à área do cone de depressão. A zona de contribuição corresponde à área de recarga do poço. A zona de contribuição é normalmente a área que os programas de proteção de poços procuram proteger. A zona de contribuição coincide com o cone de depressão quando o nível do lençol freático é idealmente plano.

Na zona de contribuição, segundo sua distância do poço, uma molécula de água (por exemplo) leva um certo tempo até sua chegada ao poço. A zona de transporte corresponde a toda ou a uma parte da zona de contribuição, dependendo da isócrona considerada. A zona de transporte considerada para um determinado tempo de trânsito é também chamada zona de captura.

A Figura 4.18 mostra essas zonas (baseado em USEPA, 1987). A zona de captura indica a área da qual a água será removida pelo poço em bombeamento. Na zona de captura de um mês temos, pois, que se um poluente partir dessa isócrona e não houver retardamento de seu deslocamento em relação à água subterrânea, o mesmo levará um mês para atingir o poço em bombeamento. O tempo de trânsito selecionado para a delimitação de uma zona de transporte deve ser suficiente para

que haja atenuação adequada dos poluentes antes que eles atinjam o poço. Normalmente considera-se que de três a seis semanas seja tempo suficiente para eliminação da maior parte dos microorganismos (LEWIS et al, 1982).

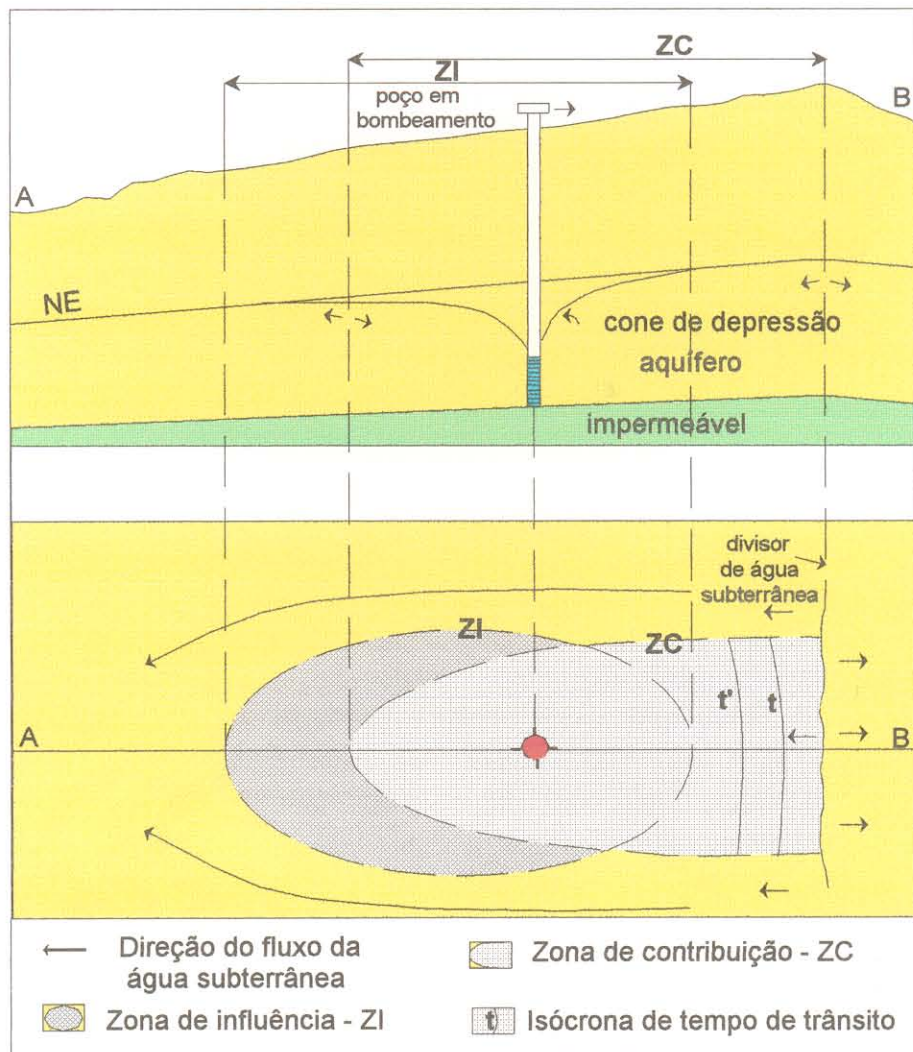


Figura 4.18 - Vista em perfil e em planta, de um poço em bombeamento, mostrando a zona de influência, a zona de contribuição e isócronas da zona de transporte ou captura (adaptado de USEPA, 1987).

A Figura 4.19 apresenta as zonas de capturas, considerando as isócronas de 1 mês, 2 meses e 6 meses, utilizando o método de fluxo e transporte.

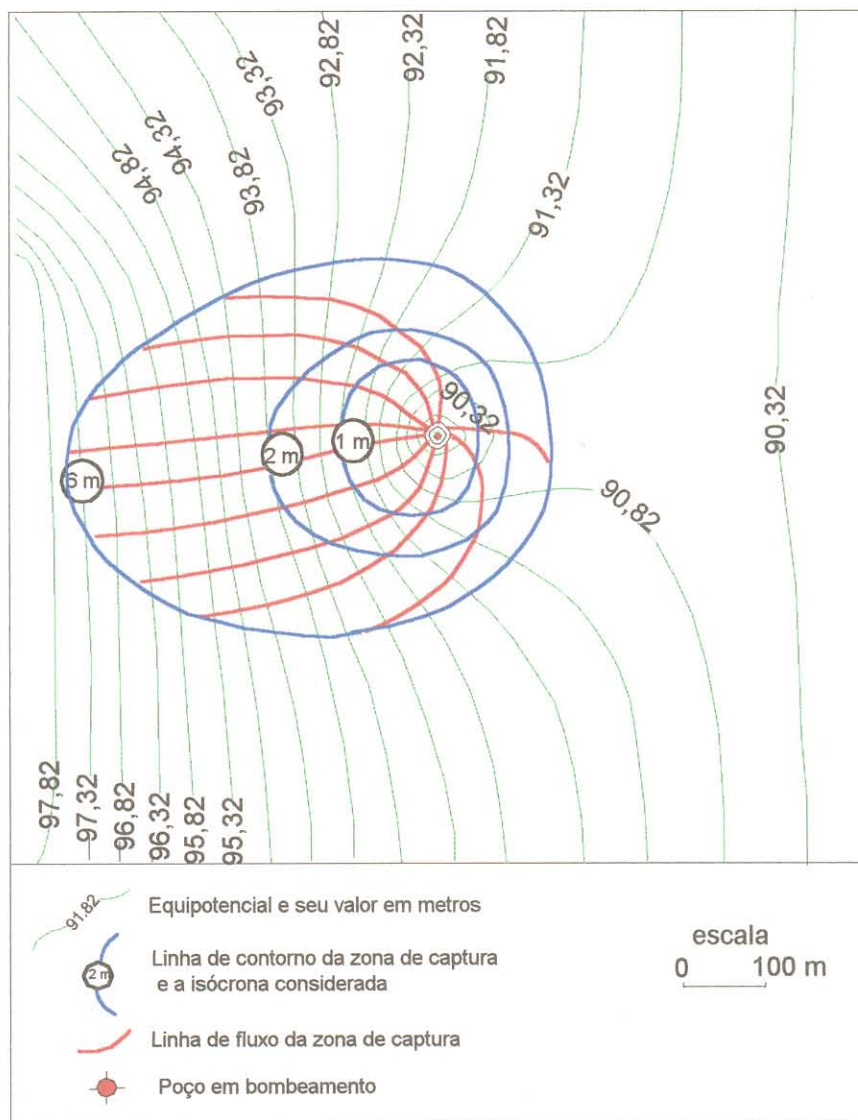


Figura 4.19 - Zonas de captura de água subterrânea para as isócronas de 1 mês (1 m), 2 meses (2 m) e 6 meses (6m), com uma taxa de bombeamento de $720 \text{ m}^3/\text{dia}$, do aquífero livre da Formação Alter do Chão em Santarém.

Aplicou-se nessas delineações as características hidrogeológicas do aquífero livre da Formação Alter do Chão na região de Santarém, com espessura média de 50 m, transmissividade de 300 m²/dia, gradiente hidráulico de 1 m/km (0,001) e porosidade efetiva 0,2; para o nível potenciométrico considerou-se a cota máxima de 100 m; a taxa de bombeamento adotada foi de 720 m³/dia (30 m³/h). Não foram consideradas atenuação e dispersão. Nestas delineações utilizou-se o modelo de simulação de aquífero Flowpath (vide item 4.2.4).

O traçado das zonas de captura é importante para os sistemas de abastecimento delimitarem as zonas de proteção dos poços.

A proteção de poços para abastecimento inclui se evitar as áreas atualmente poluídas e a selagem de poços para se prevenir a poluição no futuro.

Os aquíferos confinados, por serem mais profundos e estarem subjacentes a espessos pacotes de rochas que compreendem a zona não saturada, o aquífero livre e camadas confinantes de baixa condutividade hidráulica, possuem grande proteção. Seus fluxos são divergentes dependendo das condições dos potenciais dos aquíferos contíguos, o que torna muito difícil a penetração de substâncias poluentes, deixando-os naturalmente protegidos.

A camada confinante restringe a migração de fluidos, tanto da água como de contaminantes através de sua camada. No entanto os poços de captação de água subterrânea desses aquíferos terão melhor proteção se forem isolados por cimentação da parte superior do espaço anular em torno do revestimento do poço até a profundidade da camada confinante.

4.5 - AVALIAÇÃO DAS RESERVAS DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O volume dos espaços porosos do espesso pacote de rochas sedimentares da Formação Alter do Chão permite o armazenamento de grande quantidade de água. A reserva da água subterrânea constitui a quantidade de água mobilizável existente nos aquíferos.

A reserva da água subterrânea é normalmente expressa em reserva reguladora, reserva permanente e recurso explotável. A reserva reguladora consiste no volume de água compreendido entre os níveis máximo e mínimo do aquífero livre, ou seja, o volume de água compreendido entre os níveis de flutuação sazonal do aquífero livre. A reserva permanente constitui o volume de água armazenada abaixo do nível mínimo do aquífero livre, ou seja, abaixo do nível de flutuação sazonal do aquífero livre. O recurso explotável representa a fração do volume total da água subterrânea que pode ser utilizado, sob as condições de viabilidade técnica, econômica e ambiental.

A reserva permanente dá uma idéia da grandeza do volume de água armazenada nos aquíferos, enquanto que a reserva reguladora indica as condições da recarga. O coeficiente de realimentação constitui a relação entre a reserva reguladora e a reserva permanente. Na região de Santarém, seu valor é de apenas $3,3 \cdot 10^{-3}$ ou 0,33 %. Esse valor tão pequeno é devido ao grande volume da reserva permanente em relação à reserva reguladora; pois a reserva reguladora é também expressiva.

A qualidade da água subterrânea da Formação Alter do Chão não é restritiva à avaliação dessas reservas, os constituintes em solução apresentam baixas concentrações e situam-se dentro dos padrões de potabilidade.

4.5.1 - Reserva Reguladora

A quantidade de água subterrânea que é realimentada (e descarregada) anualmente corresponde à reserva reguladora. A reserva reguladora é função das características físicas do aquífero livre, principalmente das características hidrodinâmicas e das condições de recarga e descarga. Na avaliação da reserva reguladora utilizou-se a determinação do fluxo de base do igarapé São Brás, no ano de 1993, com volume de $37,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ o qual drena grande parte da área (Figura 2.2 e Figura 2.5). O igarapé São Brás, como em geral os riachos perenes de regiões úmidas com elevada pluviosidade é do tipo efluente, ou seja, recebe alimentação da água subterrânea, a qual aumenta sua contribuição no fluxo do igarapé na direção de jusante. A reserva reguladora varia de um ano para outro em função dos parâmetros hidroclimáticos. Em aquíferos submetidos à exploração as reservas se modificam. No caso de aquíferos conectados com rios, uma elevada exploração pode aumentar muito a reserva reguladora devido à recarga induzida da água superficial. A realimentação induzida pode também ocorrer no próprio aquífero, com o aumento da taxa de infiltração da água pluvial. O aquífero aluvial do baixo rio Llobregat, cuja reserva reguladora natural era de $10 \times 10^6 \text{ m}^3$, passou para quase $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ devido à intensa exploração (CUSTODIO & LLAMAS, 1976).

Os aquíferos da Formação Alter do Chão estão conectados com a rede de drenagem dessa área, tendo grande importância a conexão com os rios Tapajós e Amazonas, exutórios naturais de seus fluxos regionais.

A Tabela 4.9 apresenta o volume da reserva reguladora e as características consideradas em sua avaliação. O volume de água restituído pelo aquífero livre para o igarapé São Brás em uma área que abrange $147,78 \text{ km}^2$ corresponde à reserva

reguladora para essa área, sendo 12,0% da precipitação pluviométrica. A reserva reguladora apresentada é a extrapolada para a área de 900 km². Nessa área as condições hidroclimáticas e hidrogeológicas são semelhantes. Não há ainda uma série de dados que possam fornecer uma média consistente para a reserva reguladora, o volume calculado refere-se ao ano de 1993.

Tabela 4.9 - Volumes da precipitação pluviométrica, da restituição do aquífero livre para o igarapé São Brás e da reserva reguladora na região de Santarém.

Parâmetro	Volume (m ³)
Precipitação Pluviométrica	1,883 x 10 ⁹
Restituição do Aquífero para o Igarapé São Brás	0,037 x 10 ⁹
Reserva Reguladora	0,226 x 10 ⁹

A reserva reguladora obtida apresenta portanto o volume de 0,226 x 10⁹ m³ ou 226 milhões de m³.

4.5.2 - Reserva Permanente

A reserva permanente foi calculada utilizando-se o método volumétrico. As espessuras dos aquíferos estão baseadas nos dados de perfuração dos poços, inclusive as perfurações petrolíferas. As características hidrodinâmicas correspondem a médias aproximadas obtidas através da interpretação dos dados de ensaios de bombeamento.

A Tabela 4.10 apresenta os volumes obtidos para a reserva permanente e as características utilizadas em sua avaliação.

Tabela 4.10 - Espessura média dos aquíferos, porosidade efetiva, coeficiente de armazenamento e volume da reserva permanente na região de Santarém.

	Aquífero Livre	Aquíferos Confinados		Total
Espessura média (m)	50	430		480
Porosidade Efetiva	0,20		0,20	
Coeficiente de Armazenamento		$4,0 \times 10^{-4}$		
Reserva Permanente (m ³)	$9,0 \times 10^9$	$0,15 \times 10^9$	$77,4 \times 10^9$	$86,55 \times 10^9$

Nessa região a reserva permanente obtida apresenta o volume de $86,55 \times 10^9 \text{ m}^3$ ou 86,55 bilhões de m³.

Assim, a reserva total da água subterrânea, a qual compreende a soma das reservas reguladora e permanente, nessa região, com área de 900km², é de aproximadamente $86,78 \times 10^9 \text{ m}^3$ ou 86,78 bilhões de m³, volume bastante expressivo.

4.5.3 - Recurso Explotável

O recurso explotável está ligado às técnicas de exploração da água subterrânea. A quantidade de água que pode ser explotada dependerá dos esquemas

de bombeamento. Torna-se difícil uma avaliação precisa, pois essas condições evoluem constantemente e mesmo as reservas reguladoras podem ser consideravelmente acrescidas com o aumento da exploração.

O conceito de que não se deve explorar as águas subterrâneas além do volume da reserva reguladora parece estar ultrapassado. AMBROGGI (1978) mostrou que, mesmo quando um aquífero for rebaixado continuamente durante 10 anos, ou mais, sem recarga, o nível de água pode se recuperar completamente dentro de um ano se a área receber a precipitação pluviométrica normal.

O coeficiente de realimentação de apenas 0,33% e a elevada precipitação pluviométrica da região evidenciam a pequena fração do volume da reserva reguladora em relação à reserva permanente, e a pequena fração da água pluvial que é realimentada anualmente e que corresponde a apenas 12,0% da precipitação pluviométrica. As condições são portanto de um grande reservatório de água subterrânea cheio com descarga e recarga. Na hipótese de uma intensa exploração desses recursos, maior volume de recarga ocorreria e o excedente descarregado teria uma pequena diminuição, o que resultaria num pequeno aumento do coeficiente de realimentação (e da reserva renovável). Deve-se considerar ainda que nos aquíferos confinados, as camadas confinantes podem transmitir quantidades significativas de água se a seção transversal em relação ao sistema de fluxo for grande. PETERS (1972) considera como princípio, que com a retirada de água do aquífero, alguma descarga natural de água pode tornar-se disponível para uso.

O rebaixamento do nível da água subterrânea é um dos elementos mais importantes na determinação do recurso explotável. O sistema hidrogeológico nessa área é um sistema aberto, com fluxo regional descarregando nos exutórios naturais, ou seja, no rio Tapajós e no rio Amazonas, aos quais está associado o nível de base, e com os quais têm um grande potencial para recarga induzida.

Nessa região, devido à magnitude da reserva total, pode-se considerar o recurso explotável como ligado apenas às condições técnicas e econômicas de exploração da água subterrânea.

O potencial do recurso explotável está muito além da demanda, considerando qualquer expectativa de crescimento populacional e de desenvolvimento econômico e social nessa área, e o mesmo evoluirá em função de novos conhecimentos científicos sobre a água subterrânea e sobre as técnicas de exploração. Somente a reserva reguladora nas condições naturais atuais se fosse completamente captada daria para alimentar uma população de mais de 3.000.000 de habitantes, isso em uma área urbana que equivale à da região metropolitana de Belém, que possui praticamente a metade dessa população.

5 - PERSPECTIVA DE UTILIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A utilização da água subterrânea é uma resposta à demanda e ao seu potencial. Um programa de gestão de água subterrânea, como qualquer programa que envolva a utilização de recursos naturais, deve ter como meta principal o ordenamento, a conservação e o desenvolvimento do recurso.

O uso racional da água subterrânea envolve o conhecimento de tecnologias para maximizar a produção dos aquíferos a longo prazo, esforços para minimizar os impactos adversos das atividades humanas na qualidade da água e o desenvolvimento de prioridades em sua utilização no futuro.

A água subterrânea não só tem grande importância como fonte de abastecimento para consumo humano, irrigação, atividades industriais, de lazer e de recreação, como é também um constituinte fundamental do meio ambiente e de sua conservação.

Os aquíferos da Formação Alter do Chão, na região de Santarém, com grandes volumes de água armazenada e características hidrogeológicas favoráveis à sua exploração, constituem um potencial importante para o desenvolvimento dessa região.

Os aquíferos confinados devido às suas maiores reservas, à maior produtividade da água subterrânea e ao baixo grau de vulnerabilidade, estando naturalmente bem protegidos constituem os mais importantes mananciais para a exploração da água subterrânea na região. A parte superior do sistema hidrogeológico que constitui o aquífero livre deve ser isolada quando da construção das captações, com cimentação do espaço anular até a profundidade do confinamento, para sua completa proteção.

A exploração da água subterrânea na região de Santarém apresenta duas condições principais. Na parte sul da área, situada nos platôs, localmente chamada de planalto, sendo a principal zona de recarga da água subterrânea, a topografia relativamente elevada e o espesso pacote argiloso superficial condicionam a perfuração de poços com profundidades da ordem da centena de metros, mesmo para obtenção de vazões não tão elevadas, como as de abastecimento municipal ou industrial. Esse fato deve-se à grande profundidade do nível estático, situado a partir de 35 m de profundidade e ao espesso pacote argiloso na parte superior dessa área. Na parte situada ao norte, margeando os platôs, com sua topografia mais baixa e sendo uma zona de descarga da água subterrânea, os poços podem ter profundidades a partir de 20 m, segundo sua localização topográfica e finalidade.

Os aquíferos confinados, estão em profundidades maiores, subjacentes ao aquífero livre apresentam maior produtividade e proteção natural com condições favoráveis para a exploração de grandes volumes de água subterrânea.

Ressalte-se que os aquíferos da Formação Alter do Chão são de permeabilidade de interstício ou intergranular e apresentam relativa continuidade. A tarefa de locação de poços é relativamente simples. Os setores mais baixos do relevo apresentam níveis hidrostáticos mais rasos e até artesianismo. Poços locados nesses setores apresentam maior possibilidade de rebaixamento do potencial hidráulico (cone de depressão) e conseqüentemente maior produção. Esses setores mais baixos são também zonas de descargas de águas subterrâneas, com fluxos ascendentes; significando que um poço construído com tecnologia adequada reduz muito o risco de contaminação.

Os setores mais elevados do relevo são áreas de recarga, os níveis hidrostáticos da água subterrânea são mais profundos, o que resulta em mais consumo de energia para exploração de volume equivalente de água. Por sua vez, o

gradiente natural induz fluxo descendente da água subterrânea transportando as poluições dispostas em superfície para o subsolo. O processo de rebaixamento do nível hidrostático com formação do cone de depressão poderá induzir mais taxas de recarga e talvez contaminações se os poços não forem construídos, operados e abandonados (após sua vida útil) com tecnologia adequada.

5.1 - CARACTERÍSTICAS DOS PROJETOS DE POÇOS

Um poço é uma estrutura hidráulica complexa e constitui uma das mais importantes atividades da hidrogeologia aplicada.

A captação da água subterrânea através de poços fundamenta-se na aplicação de técnicas especializadas, baseadas em conhecimentos científicos e em experiências adquiridas.

O projeto de um poço envolve a seleção dos fatores dimensionais e dos materiais mais adequados à sua estrutura e deve combinar eficiência, vida útil e custo, em conjunto. Os principais objetivos de um projeto adequado devem assegurar (DRISCOLL, 1987):

- Maior produção com o mínimo de rebaixamento, consistente com a capacidade do aquífero.
- Boa qualidade da água com adequada proteção contra contaminação.
- Produção de água livre de areia.
- Vida útil longa (25 anos ou mais).
- Custos razoáveis a curto e longo prazo.

O projeto e construção de poços segundo as especificações técnicas apropriadas acarretarão, sem dúvida, maior despesa inicial, plenamente compensada pela maior eficiência e vida útil, conforme a experiência tem demonstrado (REBOUÇAS, 1976).

Antes do início do projeto de um poço deve-se estudar, além das condições hidrogeológicas, os projetos, a construção e a manutenção de outros poços existentes na área. Um dos primeiros passos no projeto de um poço deve ser a determinação de sua utilização e a expectativa de sua vida útil. O próximo passo é a determinação da água necessitada para o usuário final do poço. Nessa fase, deve-se considerar para avaliações e comparações o aumento da demanda no futuro (LEHR et al, 1988).

5.1.1 - Dimensionamento de Obras de Captação

O diâmetro de um poço é determinado em função da quantidade de água a ser produzida. A escolha do diâmetro do revestimento do poço deve ser suficiente para acomodar a bomba com folga, para sua instalação e operação adequada e também para assegurar que a velocidade ascendente da água no poço não ultrapasse 1,5 m/seg. A velocidade de subida da água, sendo maior que esse valor, acarreta maior perda de carga no sistema, resultando em maior consumo de energia para o bombeamento. Os fabricantes de tubos para revestimento de poços especificam os diâmetros recomendados em função das vazões em que as perdas de carga sejam pequenas.

Condições hidrogeológicas, métodos de perfuração e fatores econômicos muitas vezes tornam necessária a redução do diâmetro do revestimento e filtro. A

parte superior, a câmara de bombeamento, com diâmetro maior, adequado para abrigar a bomba, deve ter comprimento suficiente para a operação da bomba abaixo do rebaixamento previsto do nível dinâmico da água no poço. Nos poços de captação dos aquíferos confinados para abastecimento público, nessa região, a câmara de bombeamento deve atingir até 120 m de profundidade, seu diâmetro poderá ter até 444,5 mm (17 1/2 "). O espaço anular da câmara de bombeamento deve ser cimentado, isolando a parte superior até a profundidade da camada confinante.

A seleção do material de revestimento baseia-se em seu custo, no método de perfuração, no diâmetro de perfuração e na qualidade da água. A água dos aquíferos da Formação Alter do Chão apresenta baixos valores de pH (Tabela 4.5), com características corrosivas. Sob este aspecto, a tubulação de plástico é a mais adequada, inclusive pelos custos.

Para pressões lito-hidrostáticas das camadas aquíferas confinadas pouco consolidadas deve-se utilizar tubos plásticos (tipo Geomecânico) reforçado, pois há risco de danificações durante as operações de limpeza, desenvolvimento, instalação, operação e manutenção de bombas no poço.

A resistência ao colapso dos tubos plásticos tipo Geomecânico varia de 2,5 Kgf/cm² a 18,0 Kgf/cm² nos modelos Leve, Standard e Padrão, com profundidade básica de 50 m, 150 m e 300 m, respectivamente. Esses revestimentos têm sido utilizados em poços de até 300 m de profundidade, na Formação Alter do Chão, na região de Manaus.

A parte relacionada aos filtros requer considerações cuidadosas dos fatores hidráulicos que influenciam na eficiência do poço. Nas camadas aquíferas com pressões lito-hidrostáticas deve-se também utilizar filtros reforçados. O comprimento dos filtros é determinado em função das características hidrogeológicas, como, espessura, natureza e estratificação do aquífero e da disponibilidade do

rebaixamento. Certos horizontes dos aquíferos da Formação Alter do Chão transmitem mais água que outros, devido às variações de fácies litológicas. Os filtros devem ser locados nas zonas de maior condutividade hidráulica, normalmente na terça parte inferior do aquífero livre e no caso dos aquíferos confinados em 80 % a 90 % da espessura. Às vezes, pode não ser econômico perfurar grandes espessuras do aquífero e colocar uma coluna muito longa de filtros apenas para melhorar a eficiência do poço, como no caso da Formação Alter do Chão, nessa região, onde os aquíferos confinados totalizam espessuras de mais de 400 m e atingem profundidades de 600 m. Nestes casos deve-se compatibilizar os custos com a produtividade requerida do poço.

A interpretação cuidadosa dos dados da perfuração, como descrição das amostras, análises granulométricas, velocidade de penetração, perda de lama, vibração, ferramenta presa e perfilagem geofísica do poço, conduz à locação das zonas mais produtivas para a colocação dos filtros.

Pequenas camadas ou horizontes argilosos intercalados a camadas arenosas mais espessas podem não ser recuperados na amostragem de calha durante a perfuração do poço e mascarar o perfil litológico do mesmo, fato esse registrado na perfuração do poço ST-14, que foi indicado pelo perfil de penetração da perfuração e confirmado pela perfilagem elétrica.

A abertura do filtro é determinada através da análise granulométrica dos sedimentos da camada aquífera. A percentagem desejável da área aberta deve ao menos ser igual à porosidade da camada aquífera ou do pré-filtro (DRISCOLL, 1987). As camadas de seixos em matriz arenosa são propícias para poços com desenvolvimento natural. A confecção do pré-filtro é recomendável na maioria das vezes. Na região de Santarém consegue-se facilmente seixos e/ou areia grossa para confecção do pré-filtro.

O dimensionamento dos filtros deve considerar que a velocidade de entrada da água no poço através dos filtros não deve exceder 0,03 m/seg. Experiências de campo e testes de laboratório têm mostrado que nesta velocidade a perda por fricção nas aberturas do filtro é desprezível e as taxas de incrustação e corrosão são mínimas (DRISCOLL, 1987).

A velocidade média de entrada da água é calculada dividindo-se a vazão do poço pela área útil total das aberturas do filtro. Se a velocidade for maior que 0,03 m/seg, o comprimento e/ou o diâmetro do filtro devem ser aumentados para se obter área aberta suficiente, em que a velocidade de entrada da água seja igual ou menor que 0,03 m/seg. Em aquíferos não homogêneos, como os da Formação Alter do Chão, alguns estratos têm condutividade hidráulica maior, portanto a água desses estratos pode entrar no filtro com velocidade maior que a média calculada, e nos estratos com condutividade hidráulica menor, a velocidade de entrada de água será menor que a média. As experiências têm mostrado que estas diferenças de velocidade ao longo do filtro não são sérias (DRISCOLL, 1987).

Os fabricantes de filtros para poços fornecem a área aberta por unidade de comprimento do filtro para cada diâmetro e a largura da abertura correspondente. A seleção do material do filtro é condicionada pela qualidade da água, presença potencial de ferro-bactérias e resistência do filtro. A resistência ao colapso dos filtros plásticos tipo Geomecânico varia de 2,0 Kgf/cm² a 15,0 Kgf/cm² nos tipos Leve, Standard e Reforçado, para profundidades básicas de aplicações de 50 m, 150 m e 300 m, respectivamente. Os filtros plásticos têm sido utilizados em poços de até 300 m de profundidade em aquíferos da Formação Alter do Chão, na região de Manaus.

As águas subterrâneas da Formação Alter do Chão possuem características corrosivas, devido ao baixo pH. Nesta área a presença potencial de

bactérias é aumentada devido a poços abandonados. Sob esse aspecto e o dos custos, os filtros plásticos são adequados para a maioria dos poços. Os filtros de material plástico e os filtros de aço inoxidável têm sido utilizados com sucesso em poços nessa região. Para poços de abastecimento público, onde se deve otimizar a vazão de bombeamento, os filtros de aço inoxidável de abertura contínua são imprescindíveis, o que resultará em melhor eficiência do poço e, por conseguinte, menores custos do volume unitário da água subterrânea bombeada.

5.1.2 - Condições de Utilização

A aplicação das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT e orientação hidrogeológica relacionada às profundidades, espessuras das camadas aquíferas a serem captadas e outras características resultam na construção de poços com elevada eficiência.

A Figura 5.1 apresenta diagramas de ensaio de bombeamento dos poços ST-14, ST-31, ST-22, ST-20 e ST-21, que mostram o rebaixamento específico com o tempo de bombeamento, permitindo uma comparação entre as eficiências desses poços. O rebaixamento específico representa a relação entre o rebaixamento e a vazão ou taxa de bombeamento, ou seja, o inverso da capacidade específica. A eficiência dos poços relaciona-se conjuntamente às características de seus projetos e construções, como diâmetro, tipo e comprimento dos filtros e às características hidrodinâmicas do aquífero, como os coeficientes de transmissividade e de armazenamento. Os poços ST-14, ST-31 e ST-22 apresentam valores de rebaixamento específico, menores que $0,1\text{m/m}^3.\text{dia}$ o que reflete elevadas produtividades. Suas profundidades são de 126 m, 22 m e 24 m, respectivamente.

Os poços ST-20 e ST-21, com rebaixamentos específicos maiores que $0,2 \text{ m}^3/\text{dia}$ têm profundidades de 54 m e 72 m, respectivamente.

Pode-se notar, portanto, pequena diferença de produtividade em poços com grande diferença de profundidade. Os poços dessa região com dados disponíveis apresentaram capacidade específica compreendida entre $0,4 \text{ m}^3/\text{h.m}$ e $8,0 \text{ m}^3/\text{h.m}$ (Tabela 4.1).

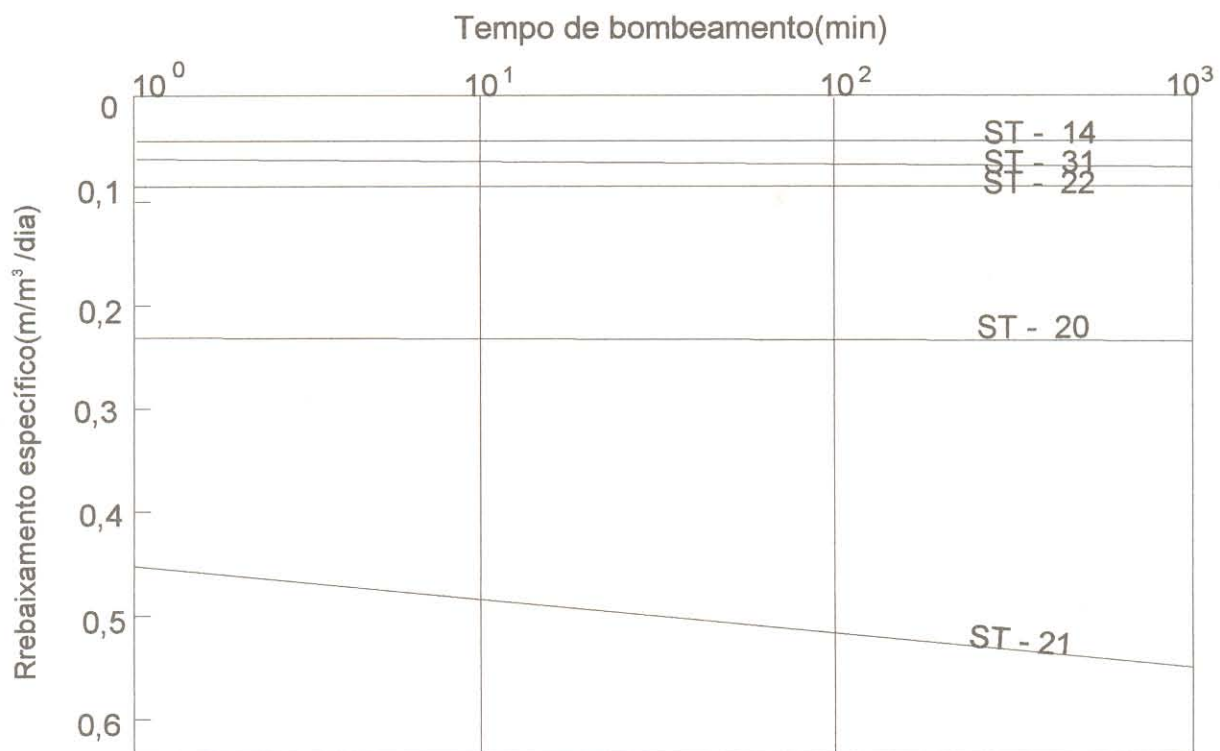


Figura 5.1 - Diagrama de rebaixamento específico com o tempo de bombeamento, de poços da região de Santarém.

As Figuras 5.2 e 5.3 apresentam a evolução dos cones de rebaixamento no aquífero livre e no aquífero confinado, em regime de bombeamento de 24 horas por dia, para os tempos de 1 dia, 4 meses (122 dias) e 1 ano (365 dias). São

representados os rebaixamentos nas ordenadas e as distâncias nas abcissas. Utilizaram-se as vazões de 720 m³/dia (30 m³/h) e 7200 m³/dia (300 m³/h) para o aquífero livre e para o aquífero confinado, respectivamente. O valor da porosidade efetiva do aquífero livre foi de 2×10^{-1} , que comumente é tomado para aquíferos de granulação grossa (DRISCOLL, 1987); o coeficiente de armazenamento do aquífero confinado foi de $4,0 \times 10^{-4}$. Os coeficientes de transmissividade adotados foram de 300 m²/dia para o aquífero livre e 400 m²/dia para o aquífero confinado. Esses valores correspondem a médias aproximadas obtidas a partir dos ensaios de bombeamento.

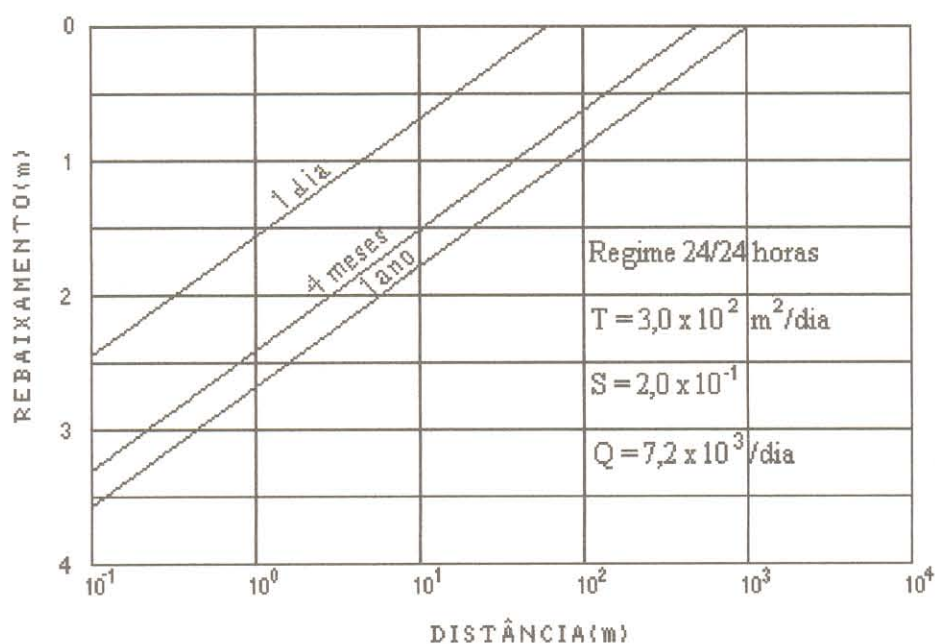


Figura 5.2 - Evolução teórica do cone de rebaixamento para o aquífero livre

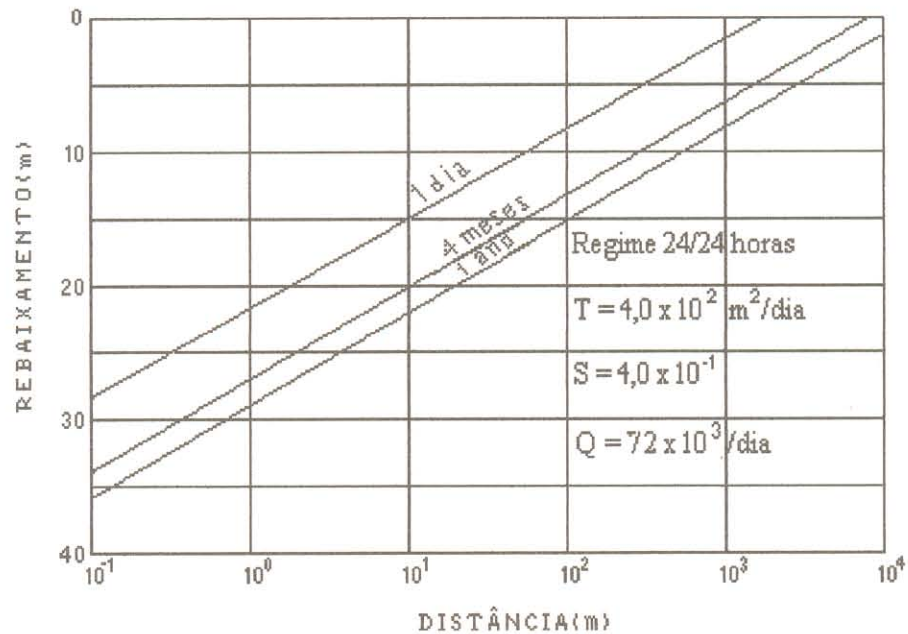


Figura 5.3 - Evolução teórica do cone de rebaixamento para o aquífero confinado.

O rebaixamento real em um poço em bombeamento é uma somatória de rebaixamentos devidos às perdas de carga no aquífero e às perdas de carga no poço. As perdas de carga do poço produzem um sobre-rebaixamento que é uma soma dos seguintes fatores:

- Perdas de carga em torno do poço, devido ao aumento da velocidade da água; este tipo de perda pode ser significativo em poços com filtros subdimensionados ou em poços mal desenvolvidos.
- Perdas de carga devido à ascensão da água no poço, desde os filtros até a bomba; este tipo de perda só é significativo quando essa distância for grande ou quando o diâmetro da tubulação for pequeno em relação à vazão.
- Perdas de entrada na bomba, quando o espaço entre o corpo da bomba e a parede da tubulação for pequeno.

As condições de utilização de um poço são determinadas mediante o conhecimento de sua vazão ótima, de suas perdas de carga e eficiência, das características hidrodinâmicas do aquífero captado e da qualidade da água. Conhecidas as condições atuais de utilização do poço e do aquífero, deve-se reavaliar essas condições, efetuar as adaptações ou os redimensionamentos necessários dos equipamentos de bombeamento e fixar o regime mais adequado de funcionamento do sistema (ROCHA & JORBA, 1982).

A determinação da vazão ótima para produção do poço é feita a partir de um teste de bombeamento em etapas ou teste de produção, o qual é feito quando o poço capta um aquífero livre. Nesse teste bombeia-se com taxas sucessivas mais elevadas, sendo medidos os rebaixamentos de cada etapa ou taxa de bombeamento. Se o tempo permitir, o nível da água do poço deve retornar ao nível estático, entre cada etapa. Este procedimento é repetido até se obter a máxima taxa de bombeamento sustentável. Normalmente, bombeia-se de 5 a 8 etapas, durando cada etapa de bombeamento de 1 a 2 horas (DRISCOLL, 1987).

A determinação da vazão máxima explotável é feita a partir da interpretação dos testes. O rebaixamento real em um poço bombeado obedece aproximadamente à equação (JACOB, 1946):

$$s = BQ + CQ^2$$

onde:

s = rebaixamento total, medido no poço em bombeamento.

B = coeficiente de perda de carga do aquífero.

C = coeficiente de perda de carga do poço.

Q = vazão ou taxa de bombeamento.

O termo BQ refere-se ao rebaixamento devido às perdas de carga do aquífero (equação de Theis), sendo o coeficiente B função do tempo; o termo CQ^2 refere-se às perdas de carga do poço, e o coeficiente C independe do tempo.

A partir da equação dos rebaixamentos de Jacob, BIERSCHEK (1964) apresentou um método gráfico para determinação dos coeficientes das perdas do aquífero e do poço. Temos, pela equação de Jacob:

$$s = BQ + CQ^2$$

ou

$$\frac{s}{Q} = B + CQ$$

Esta equação caracteriza uma reta. Em um gráfico (Figura 5.4) com a plotagem dos valores das vazões $Q_1, Q_2 \dots Q_n$ na abcissa e os correspondentes rebaixamentos específicos $s_1/Q_1, s_2/Q_2 \dots s_n/Q_n$ na ordenada, obtém-se, a partir do mesmo, os coeficientes de perda de carga do aquífero B e do poço C. Substituindo-se esses valores na equação de Jacob, obtém-se a equação característica do poço.

Os dados do teste permitem a construção de outro gráfico (Figura 5.5) onde são plotadas as vazões $Q_1, Q_2 \dots Q_n$ na abcissa e os rebaixamentos $s_1, s_2 \dots s_n$, na ordenada, fornecendo a curva característica do poço, a qual apresenta em sua parte inicial um trecho de reta e na sua parte final uma curva com rebaixamentos acentuados. O ponto P, chamado de ponto crítico, indica que, aumentando-se a vazão a partir deste ponto, o rebaixamento torna-se desproporcional em relação ao aumento da vazão. A vazão máxima ou vazão crítica corresponde ao ponto crítico. A partir desse ponto, a vazão entra em regime de fluxo turbulento, e as perdas de carga aumentam muito. A vazão de bombeamento não deve ultrapassar esse ponto crítico,

sendo a vazão ótima fixada em um valor pouco menor que o do ponto crítico, por medida de segurança.

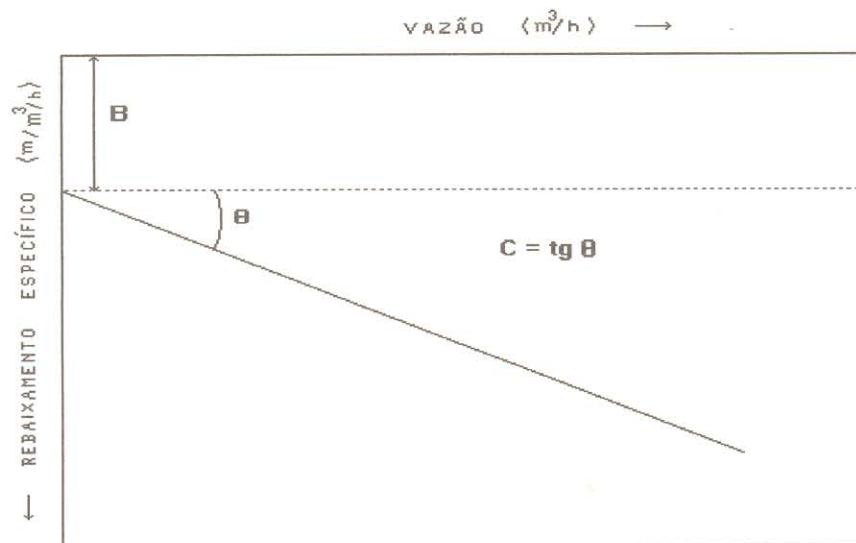


Figura 5.4 - Representação gráfica da equação dos coeficientes de perdas de carga do poço.

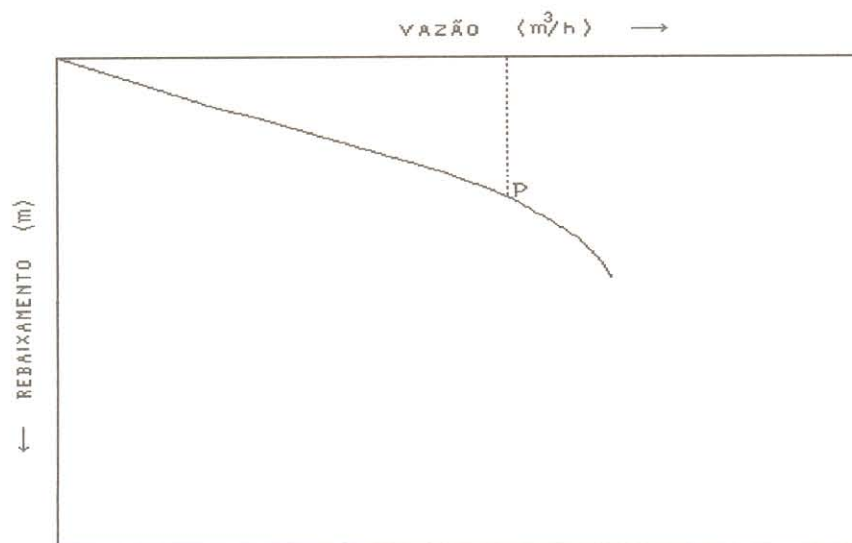


Figura 5.5 - Curva característica do poço.

5.1.3 - Manutenção de Poços

Um programa de manutenção preventiva de um poço é sempre importante. Pode evitar a perda de eficiência do mesmo, prolongar sua vida útil e resultar em grande economia.

A deterioração do poço com o tempo é função da interação da estrutura do poço com a água subterrânea. Os processos de deterioração podem atuar separadamente ou em conjunto. O poço pode baixar sua produtividade ou eficiência devido à incrustação, corrosão e erosão mecânica, as quais normalmente estão interrelacionadas (LEHR et al, 1988). Problemas do conjunto eletromecânico também podem ser responsáveis pela queda de produção do poço. É necessário medições regulares da vazão, do nível dinâmico e do consumo de energia do conjunto eletromecânico. Uma alteração de um desses parâmetros em função do tempo sinaliza a necessidade de manutenção e/ou substituição do poço ou da bomba. A atuação de uma água de natureza corrosiva pode alargar a abertura dos filtros, permitindo a passagem de areia que vai desgastar o equipamento de bombeamento e diminuir a resistência do filtro, que até poderá vir a se romper.

A deposição de óxidos e hidróxidos de ferro na rede de distribuição em Santarém decorre da baixa eficiência do sistema, cada queda de pressão ou interrupção do fornecimento de água é fator indutor da deposição de óxidos e hidróxidos de ferro nas canalizações e/ou do aparecimento de cor na água.

A corrosão resulta da decomposição química do material do poço ou do equipamento de bombeamento, ou seja, da remoção dos íons da parte metálica do poço ou da bomba. As águas com baixo pH favorecem a solubilização do ferro.

A incrustação pode resultar da deposição química de carbonatos de cálcio ou de ferro, nos seguintes locais: às proximidades da perfuração, no pré-filtro (encascalhamento), ao redor do filtro e sobre superfícies, como as do revestimento do filtro ou da bomba. As características físico-químicas das águas da Formação Alter do Chão não são favoráveis à formação de incrustações.

O acúmulo de partículas sólidas do aquífero nas aberturas do filtro pode resultar em uma incrustação física, que em geral é causada pela não remoção efetiva das partículas do pré-filtro durante o desenvolvimento do poço.

Pode ainda ocorrer uma incrustação devido à ação de bactérias, que para sua nutrição convertem compostos de ferro divalente para ferro trivalente, o qual precipita. Algumas teorias afirmam que estas bactérias estão presentes no aquífero e com a mudança de ambiente, devido ao bombeamento, elas proliferam. Outras teorias dizem que os esporos dessas bactérias são transportados de poço para poço, através dos equipamentos de perfuração e de bombeamento.

Os poços com infestação de ferro-bactérias começam a apresentar obstrução nos filtros, no pré-filtro e no material aquífero circundante, devido aos depósitos de hidrato férrico e limo gelatinoso, resultante da ação metabólica dessas bactérias.

Quando um poço apresenta problemas causados por estas ferro-bactérias eles não podem ser definitivamente resolvidos, devendo ser controlados com a utilização de produtos químicos, como o cloro ou ácido clorídrico (comercialmente conhecido como ácido muriático), ou de outras técnicas, utilizadas para tratamentos periódicos, que podem ser anuais ou de período maior, dependendo das condições apresentadas pelo poço.

A manutenção de poços requer medidas regulares do nível estático, dos níveis dinâmicos, das taxas de bombeamento, da produtividade do poço e análise e

comparações dos dados sobre a qualidade da água. A unidade de bombeamento deve também ser avaliada, quando das manutenções rotineiras. Deve-se verificar o conteúdo de areia bombeado, aquecimento excessivo, consumo do motor, vibrações, ruídos, o rotor da bomba e fendas no terreno ao redor do poço.

Com um programa de inspeção de poços é possível diagnosticar possíveis problemas e efetuar a necessária manutenção. A rotina de manutenção é definida para cada caso com base nos dados de monitoramento da vazão, qualidade da água, nível dinâmico e consumo de energia do conjunto eletro-mecânico.

5.2 - CUSTO DE EXPLOTAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

O custo de exploração da água subterrânea é função das condições hidrogeológicas locais e das condições de infra-estrutura da área. Esse custo compreende a construção de poços tubulares e às instalações hidráulicas e elétricas; aquisição de equipamentos de bombeamento; operação e manutenção desses sistemas e despesas financeiras para amortização dos custos de construção dos poços e aquisição dos equipamentos.

Os custos de exploração obtidos referem-se à água subterrânea liberada na boca do poço. Estes custos aqui indicados foram obtidos entre novembro de 1995 e fevereiro de 1996. O preço do dólar, no final de janeiro de 1996, e aqui citado como indicativo, foi de US \$ 1,00 = R\$ 0,97 (um dólar equivale a noventa e sete centavos de real).

As despesas financeiras correspondem aos valores que amortizam os capitais referentes aos custos fixos. São referidas como despesas financeiras anuais. Aplicou-se no cálculo dessas despesas a taxa de juro de 5% ao ano (0,05), que é

atualmente a taxa da Caixa Econômica Federal para programas de abastecimento de água e outras atividades de saneamento, com utilização dos recursos do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço - FGTS (PRÓ-SANEAMENTO, 1995).

Considerou-se a vida útil dos poços como sendo de 30 anos e das bombas de 6 anos, havendo portanto cinco gerações de bombas para cada poço.

O custo de exploração da água subterrânea está aqui subdividido em custos fixos, nos quais incidem as despesas financeiras e em custos operacionais. A soma desses custos constitui os custos totais de exploração.

5.2.1 - Custos Fixos

Os custos fixos compreendem a construção de poços, a aquisição de equipamentos hidráulicos e elétricos para bombeamento e as instalações. Na análise desses custos adotou-se as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para a construção de poços tubulares que compreendem: a perfuração, a perfilagem elétrica, o revestimento, os filtros, o pré-filtro, o desenvolvimento, a cimentação, o teste de vazão e a análise físico-química da água.

Os revestimentos selecionados foram de PVC, tipo Geomecânico. Os filtros foram também de PVC, tipo Geomecânico, para profundidades menores que 100 m e de aço inoxidável com abertura contínua, para profundidades a partir de 100 m. Os diâmetros especificados para os revestimentos e para os filtros foram de 152,4 mm (6") para profundidades de até 100 m, e 203,2 mm (8") para profundidades de até 200 m; para profundidades maiores, considerou-se redução para 152,4 mm (6") a partir de 110 m de profundidade. A câmara de bombeamento atinge diâmetro de até 444,5 mm (17½ ") para esses poços e sua profundidade

pode atingir até 120m. Nos poços com profundidade até 75 m não se considerou a perfilagem elétrica.

Os custos obtidos desses poços correspondem aos preços médios aproximados de empresas de perfuração de poços tubulares, sediadas em Santarém, Belém e Manaus, nas especificações técnicas anteriormente citadas, estando incluído nesses preços o transporte de ida e volta de equipamentos e de pessoal, no caso de Belém ou de Manaus. Os custos dos poços com profundidade até 75 m são relativamente menores devido à existência de equipamento de perfuração desta capacidade em Santarém. Devido ao transporte do equipamento de perfuração por balsas há uma elevação maior dos custos de poços para profundidades maiores que 100 m.

Os custos de bombas e equipamentos elétricos (do conjunto eletro-mecânico) foram considerados de maneira semelhante, ou seja, orçados para Santarém. Nessas instalações foram incluídos quadros automatizados com dispositivos de ligar e desligar, protegidos contra descargas de raios e queda de tensão.

Os custos de perfuração e dos equipamentos eletro-mecânicos são considerados para poços de alta produtividade, tipo os de abastecimento público.

As despesas financeiras correspondem ao valor da prestação anual que amortiza o capital referente aos custos fixos. Para o cálculo destas despesas utilizou-se a fórmula da matemática financeira:

$$A = \frac{P \times i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

onde:

A = valor da amortização anual

P = custo inicial

i = taxa de juros de 5% ao ano ($i = 0,05$)

n = período de duração ($n = 30$ anos).

Para as bombas, devido à sua vida útil especificada ser de 6 anos, não é econômico e muito menos recomendável sob o ponto de vista tecnológico a aquisição de todo o conjunto de bombas no início da implantação de um projeto, devendo ser adquirida de imediato a primeira e de 6 em 6 anos as seguintes. Para isso, efetua-se o cálculo do valor principal das bombas com a seguinte fórmula da matemática financeira:

$$R = \frac{P}{(1 + i)^n}$$

onde:

R = valor principal do conjunto de bombas

P = custo inicial

i = taxa de juros, de 5% ao ano ($i = 0,05$)

n = período de duração (anos); $n = 6$ para a 2ª bomba, $n = 12$ para a 3ª bomba; $n = 18$ para a 4ª bomba e $n = 24$ para a 5ª bomba.

Estes valores, que incluem o valor da primeira até a quinta bomba, são somados, constituindo-se no valor principal do conjunto de bombas, no qual é calculado o valor da amortização anual.

A Tabela 5.1 apresenta os custos de construção de poços tubulares, os custos unitários de perfuração desses poços e os valores das amortizações anuais, associados às respectivas profundidades e vazões, para a região de Santarém.

A Tabela 5.2 apresenta os custos de bombas, o valor principal para o conjunto das mesmas, os valores das amortizações anuais, associados às suas vazões e potências, para a região de Santarém.

A Tabela 5.3 apresenta os custos das instalações elétricas e hidráulicas, os valores das amortizações anuais, associados às vazões e potências das bombas, para a região de Santarém.

Tabela 5.1- Custo de poços tubulares, custo unitário dos poços e valor da amortização anual desses poços, associados às suas profundidades e vazões, na região de Santarém.

Profundidade (m)	Vazão (m ³ /h)	Custo (R\$)	Custo Unitário (R\$/m)	Valor da Amortização Anual (R\$)
40	15	10.000,00	250,00	650,60
50	20	14.000,00	280,00	910,80
75	40	25.000,00	333,33	1.626,30
100	70	55.000,00	550,00	3.577,90
150	120	80.000,00	533,00	5.204,20
200	160	110.000,00	550,00	7.155,70
250	250	130.000,00	520,00	8.456,70
300	320	155.000,00	516,66	10.083,00

Tabela 5.2 - Custo de bombas submersas, valor principal do conjunto de bombas e valor da amortização anual, associado às suas vazões e potências, na região de Santarém.

Vazão (m ³ /h)	Potência (H.P.)	Potência (kW)	Custo (R\$)	Valor Principal (R\$)	Valor da Amortização Anual (R\$)
15	5	3,8	3.500,00	10.600,60	689,60
20	7,5	5,6	5.500,00	16.657,60	1.083,60
40	25	18,6	7.500,00	22.714,90	1.477,70
70	35	26,1	11.200,00	33.920,80	2.206,60
120	62	46,2	16.000,00	48.458,30	3.152,30
160	75	55,9	18.000,00	54.515,60	3.546,40
250	125	93,2	25.000,00	75.716,10	4.925,50
320	150	111,9	35.000,00	106.002,50	6.895,70

Tabela 5.3 - Custo das instalações eletro-mecânicas, valor da amortização anual associado à vazão e potência das bombas, na região de Santarém.

Vazão (m ³ /h)	Potência (H.P.)	Potência (kW)	Custo da Instalação Completa (R\$)	Valor da Amortização Anual (R\$)
15	5	3,8	20.000,00	1.301,00
20	7,5	5,6	20.000,00	1.301,00
40	25	18,6	25.000,00	1.626,30
70	35	26,1	25.000,00	1.626,30
120	62	46,2	34.000,00	2.211,80
160	75	55,9	43.000,00	2.797,30
250	125	93,2	55.000,00	3.577,90
320	150	111,9	65.000,00	4.228,40

Observa-se nessas Tabelas que os custos das instalações elétricas e hidráulicas são mais altos do que o custo da perfuração dos poços com profundidades de até 75 m e correspondem a aproximadamente 40% do valor do poço para as profundidades maiores. As bombas representam mais de 40% do custo dos poços mais rasos e chegam a pouco mais de 20% dos custos para os poços profundos.

5.2.2 - Custos Operacionais

Os custos operacionais compreendem as despesas para bombeamento, manutenção e reparos.

Na determinação da potência das bombas e consumo de energia, considerou-se colunas manométricas de 50 m para poços de 40 m e 50 m de profundidade; de 70 m para poços com 75 m de profundidade e de 75 m para poços de 100 m de profundidade. Para poços mais profundos, considerou-se a coluna manométrica de 100 m. Nessas colunas manométricas incidem as perdas de cargas desses sistemas.

A potência da bomba é o trabalho realizado pela mesma para o deslocamento de um peso (F) (que corresponde a um volume - V de água) a uma altura (manométrica - H) na unidade de tempo (t).

Assim, temos:

$$P = \frac{FH}{t} = \frac{V\gamma H}{t} = QH\gamma$$

onde:

P = potência (W).

F = peso (N).

H = coluna manométrica (m).

t = tempo (seg).

V = volume (m^3).

Q = vazão (m^3/seg).

γ = peso específico da água (N/m^3).

Com a transformação de unidades e considerando no consumo de energia as bombas elétricas submersas, a potência necessária em kW varia entre 12QH e 15QH.

Assim temos:

$$P = \alpha QH$$

onde:

α = coeficiente (compreendido entre 12 e 15)

P = potência (kW)

Q = vazão (m^3/seg)

H = coluna manométrica (m).

O regime de bombeamento adotado foi de 16 horas por dia, nos 365 dias do ano.

Na avaliação dos custos de energia elétrica, para os bombeamentos, utilizou-se o valor de R\$ 0,15 o kWh, segundo informações das Centrais Elétricas do Pará - CELPA em Santarém, mais uma taxa adicional de R\$ 5,51 (mensal). Adotou-se ainda um valor anual adicional de R\$ 264,48 para ajustes.

As despesas anuais com manutenção e reparos de poços e de bombas foram estimadas em 5 % do preço do poço.

O custo de manutenção é relativamente pequeno em relação ao custo de energia, o qual representa cerca de 90 % do custo operacional.

A Tabela 5.4 de custos operacionais apresenta a potência de consumo das bombas (em kW), os custos anuais de manutenção, os custos anuais de energia elétrica e os custos totais anuais, associados às vazões e potências nominais das bombas (em HP e kW).

Tabela 5.4 - Custo de manutenção, custo anual de energia elétrica e custo operacional anual de poços tubulares, associado à vazão e potência das bombas na região de Santarém.

Vazão (m ³ /h)	Potência (H.P.)	Potência (kW)	Potência de Consumo (kW)	Custo de Manutenção (R\$)	Custo Anual de Energia (R\$)	Custo Operacional Anual (R\$)
15	5	3,8	3,2	500,00	3.133,80	3.633,80
20	7,5	5,6	4,2	700,00	4.009,80	4.709,80
40	25	18,6	11,7	1.300,00	10.579,80	11.879,80
70	35	26,1	21,9	2.800,00	19.515,00	22.315,00
120	62	46,2	40,0	4.000,00	35.370,60	39.370,60
160	75	55,9	53,3	5.500,00	47.021,40	52.521,40
250	125	93,2	83,3	6.500,00	73.301,40	79.801,40
320	150	111,9	106,7	7.800,00	93.799,80	101.599,80

5.2.3 - Custos Totais de Exploração

Os custos totais anuais de exploração da água subterrânea correspondem à soma dos custos fixos com os custos operacionais. Os valores da amortização anual dos poços, dos conjuntos de bombas e das instalações, somados, perfazem os custos fixos anuais. Os custos fixos anuais adicionado aos custos operacionais anuais, compõem os custos totais anuais.

Os custos totais anuais divididos pelos volumes anuais bombeados fornecem os custos unitários anuais.

A Tabela 5.5 apresenta os custos fixos anuais para os poços, as bombas e as instalações eletro-mecânicas, os custos fixos totais anuais, os custos operacionais anuais e os custos totais anuais, associados às profundidades e vazões dos poços para a exploração da água subterrânea, na região de Santarém.

Tabela 5.5 - Custo anual de amortização de poços, de bombas e de instalações eletro-mecânicas, amortização do custo fixo total anual, custo operacional anual e custo total anual, para captação de água subterrânea, na região Santarém.

Prof. (m)	Vazão (m³/h)	Amortização Anual do Poço (R\$)	Amortização Anual das Bombas (R\$)	Amortização Anual da Instalação (R\$)	Custo Fixo Total Anual (R\$)	Custo Operacional Total Anual (R\$)	Custo Total Anual (R\$)
40	15	650,60	689,60	1.301,10	2.641,30	3.633,80	6.275,10
50	20	910,80	1.083,60	1.301,10	3.295,50	4.709,80	8.005,30
75	40	1.626,30	1.477,70	1.626,30	4.730,30	11.879,80	16.610,10
100	70	3.577,90	2.206,60	1.626,30	7.410,80	22.315,00	29.725,80
150	120	5.204,20	3.152,30	2.211,80	10.568,30	39.370,60	49.938,90
200	160	7.155,70	3.546,40	2.797,30	13.499,40	52.521,40	66.020,80
250	250	8.456,70	4.925,50	3.577,90	16.960,10	79.801,40	96.761,50
300	320	10.083,00	6.895,70	4.228,40	21.207,10	101.599,80	122.806,90

Pode-se notar que os custos das bombas e das respectivas instalações eletro-mecânicas somados é maior que o custo dos poços para todas as profundidades (e vazões).

A Tabela 5.6 apresenta o volume anual explotado, o custo total anual, o custo de exploração unitário anual, associado às profundidades e vazões dos poços, para a água subterrânea, na região de Santarém.

Tabela 5.6 - Volume anual explotado, custo total anual e custo unitário anual de exploração da água subterrânea associado à profundidade e vazão dos poços, na região de Santarém.

Profundidade (m)	Vazão (m ³ /h)	Volume Anual Explotado (m ³)	Custo Total Anual (R\$)	Custo de Explotação Unitário Anual (R\$/m ³)
40	15	87.600	6.275,10	0,0716
50	20	116.800	8.005,30	0,0685
75	40	233.600	16.610,10	0,0711
100	70	408.800	29.725,80	0,0727
150	120	700.800	49.938,90	0,0713
200	160	934.400	66.020,80	0,0707
250	250	1.460.000	96.761,50	0,0663
300	320	1.868.800	122.806,90	0,0657

Os custos unitários de água subterrânea nessa região decrescem com o aumento da profundidade (e vazão) dos poços, no aquífero livre e nos aquíferos confinados. Estão compreendidos entre R\$ 0,0657/m³ e R\$ 0,0727/m³. Para regimes de bombeamento com mais de 16 horas por dia esses custos unitários tornam-se ainda menores.

5.3 - COMPARAÇÃO DE CUSTO DE EXPLOTAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E DA ÁGUA SUPERFICIAL

Os estudos comparativos de custos entre a água subterrânea e a água superficial são poucos no Brasil, não constando ainda na rotina das avaliações técnicas e econômicas para a maioria dos sistemas de abastecimento de cidades. Estudos dessa natureza resultam em grande economia, tanto para as empresas que exploram recursos hídricos para abastecimento, como para os usuários que teriam um menor custo da água.

Entre as razões da utilização da água subterrânea pode-se citar:

- As águas subterrâneas encontram-se naturalmente melhor protegidas, sendo muito menos vulneráveis aos agentes de poluição que facilmente atingem as águas superficiais.
- As reservas de águas subterrâneas são relativamente grandes e muito menos afetadas pelas variações sazonais.
- Os custos de captação são baixos em relação aos da água superficial por dispensarem a construção de obras como barragens, adutoras de recalque e estação de tratamento.
- O prazo de construção de um poço é de poucas semanas em relação ao prazo de meses e anos no caso de construção de obras para a captação de água superficial de um rio ou lago.
- A construção de poços pode ser melhor ajustada ao aumento da demanda de água, possibilitando um parcelamento das inversões financeiras.

- A água subterrânea é acessível no meio urbano e rural, tornando-se disponível no local onde são geradas as demandas sem causar restrições às demais formas de ocupação do terreno, como no caso de áreas de barragens e reservatórios.

A utilização da água subterrânea deve ser considerada no conjunto das demais alternativas e sua viabilidade deve ser precedida de um estudo hidrogeológico que indicará os locais e profundidades mais favoráveis para a locação de poços de captação, o que no final resultará no menor custo do m³ de água explotado.

5.3.1 - Custo de Explotação da Água Superficial

A região de Santarém possui condições favoráveis de captação de água, tanto superficial como subterrânea. Além da grande reserva da água subterrânea dos aquíferos da Formação Alter do Chão (item 4.5), as descargas líquidas médias anuais dos rios Tapajós e Amazonas perfazem nessa localidade mais de 179.280 m³/seg (MOLINIER et al, 1992). Não há um projeto de exploração de água superficial programado para essa área, embora já possa ter sido cogitada essa possibilidade. Para possibilitar a comparação de custo da água subterrânea com a água superficial adotou-se os custos da água subterrânea da região de Santarém comparados ao custo da água superficial de Manaus (AM) e de Oriximiná (PA). As condições de exploração da água superficial em Oriximiná captada do rio Trombetas e em Manaus captada do rio Negro apresentam completa semelhança com as condições de exploração da água superficial em Santarém que seria captada do rio

Tapajós, podendo-se, portanto, tomar como termo de comparação. Na hipótese de outra alternativa para a captação da água superficial em Santarém, como por exemplo a do igarapé São Brás que possui descarga suficiente para atender à demanda, esse custo seria ainda mais elevado devido principalmente a obras de barragem.

Atualmente está em construção na cidade de Manaus uma estação de captação e tratamento da água superficial do rio Negro. As informações obtidas para a avaliação dos custos da água superficial de Manaus foram gentilmente cedidas pela Cia. de Saneamento do Amazonas - COSAMA (COSAMA, 1995a, 1995b). A construção dessa estação foi iniciada em 1988, estando prevista sua conclusão para 1996. Sua capacidade é de $3,0 \text{ m}^3/\text{seg}$ ($259.200 \text{ m}^3/\text{dia}$) e o custo de construção, orçado de R\$ 42.000.000,00 (quarenta e dois milhões de reais). Apresenta-se ainda o custo da água superficial do rio Trombetas na cidade de Oriximiná, baseado em informações gentilmente cedidas pela Cia. de Saneamento do Pará - COSANPA (COSANPA, 1994).

A estação de captação e tratamento de água de Oriximiná é constituída por uma adutora de 850 m de comprimento, de ferro fundido, sendo 500 m com diâmetro de 300 mm e 350 m com diâmetro de 250 mm; pela estação de captação e tratamento e por duas bombas, as quais funcionam com vazões de $218 \text{ m}^3/\text{h}$ cada uma. A diferença de cota altimétrica entre a tomada de água e a estação é de 56 m. Essa estação faz um tratamento de água reduzido, utilizando por dia 120 kg de sulfato de alumínio e 60 kg de cloro, durante o período de cheia do rio Trombetas é utilizado algumas vezes cal. Em Belém, o preço do sulfato de alumínio é de R\$ 231,80 a tonelada, do cloro R\$ 1.229,00 o cilindro de 900 kg e o do cal hidratado de R\$ 181,90 a tonelada.

Esta estação está funcionando desde 1990 e seu custo foi baseado em um projeto de uma estação com capacidade e características técnicas semelhantes, em Belém (PA), orçada em R\$ 600.000,00 (Seiscentos mil reais). O custo atual da adutora em ferro fundido, também em Belém para o diâmetro de 300 mm é de R\$ 648,75/m e para o diâmetro de 250 mm de R\$ 482,72/m. Considerou-se nestes preços um adicional de 10 % para seu custo em Oriximiná, pois cimento e ferro, para construção desse sistema são transportados a partir de Belém, além da supervisão de obras e outros custos adicionais.

Assim, temos:

- custo da estação: R\$ 600.000,00
- custo da adutora: R\$ 493.327,00
- adicional de 10%: R\$ 109.333,00
- total: R\$ 1.202.660,00

Nas despesas financeiras para amortização dos custos fixos no cálculo do custo de exploração da água superficial, tanto de Manaus como de Oriximiná, foi aplicada a taxa de juros de 5 % ao ano (0,05), taxa esta utilizada pela Caixa Econômica Federal para programas de abastecimento de água e outras atividades de saneamento, com a utilização de recursos do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço - FGTS (PRÓ-SANEAMENTO, 1995), e o período de 30 anos. Para Oriximiná considerou-se, de maneira semelhante ao utilizado para a água subterrânea de Santarém, a vida útil de cada bomba de 6 anos, havendo portanto cinco gerações de bombas para cada conjunto nesse período. Para o valor principal do conjunto dessas bombas, utilizou-se no seu cálculo de maneira semelhante como

o utilizado para os poços. O preço de cada bomba em Oriximiná foi avaliado em R\$ 18.000,00, com potência nominal de 75 H P. Portanto o valor principal dos dois conjuntos das bombas resultou em R\$ 109.031,20. Esta importância considerada no cálculo da amortização anual forneceu o valor de R\$ 7.092,80, que somado ao valor anual das obras da estação e da adutora forneceu o valor do custo fixo anual. Nestes cálculos, foram aplicadas as fórmulas da matemática financeira, de maneira semelhante ao utilizado nos custos da água subterrânea na região de Santarém.

O custo unitário fixo anual resulta da relação do valor de amortização anual pelo volume de água explotado. A Tabela 5.7 apresenta o custo anual de amortização da estação, do conjunto de bombas, as amortizações dos custos fixos totais anuais, o volume de água explotado anualmente e o custo fixo unitário anual para as estações de captação de água superficial de Manaus e Oriximiná. Para Manaus, como as informações obtidas foram de custos unitários, considerou-se o custo das bombas e da manutenção incluído no custo da estação, pois a mesma já está operando com sua construção ainda não concluída.

Tabela 5.7 - Custo anual de amortização da estação, do conjunto de bombas, dos totais anuais, volume de água superficial explotada e custo fixo unitário anual para a estação de captação de Manaus e de Oriximiná.

Estação	Custo de Amortização da Estação (R\$)	Custo de Amortização do Conjunto de Bombas (R\$)	Custos de Amortização Total Anual (R\$)	Volume Anual de Água Explotada (m ³)	Custo Fixo Unitário Anual (R\$/m ³)
Manaus	2.732.160,30		2.732.160,30	63.072.000	0,0433
Oriximiná	78.234,80	7.092,80	85.326,60	2.546.240	0,0335

Na avaliação do custo operacional, adotou-se o regime de 16 horas de bombeamento por dia, nos 365 dias do ano. Estes fatores, foram os mesmos utilizados nos custos de águas subterrâneas de Santarém, a fim de se poder efetuar comparações.

O custo operacional da estação de captação e tratamento de água de Manaus (COSAMA, 1995a) apresenta os seguintes custos unitários:

produtos químicos: R\$ 0,0763/m³

energia elétrica: R\$ 0,0514/m³

Assim, o custo operacional anual unitário para a água superficial dessa estação que corresponde à soma dos custos unitários de produtos químicos e de energia elétrica, é de R\$ 0,1277/m³.

Para Oriximiná, considerou-se o valor de manutenção anual de 3 % do valor da estação, ou seja, R\$ 36.079,80. Na avaliação do consumo de energia elétrica e custo da mesma, procedeu-se de maneira semelhante ao utilizado para as bombas dos poços, e considerou-se a altura manométrica de 80 m, incluindo perdas de carga, resultando no valor anual de R\$ 102.627,60 considerando 16 horas de bombeamento por dia e no valor de R\$ 153.610,80 para as 24 horas de bombeamento por dia.

A relação de produtos químicos para as massas desses produtos foi estimada em 20 horas de bombeamento por dia, para o cálculo do preço unitário de produtos químicos. Esse regime de 20 horas de bombeamento por dia é utilizado normalmente nessa estação. Acrescentou-se 10% do valor do preço desses produtos para o transporte até Oriximiná e como o valor do cal é relativamente pequeno não

se considera o mesmo nos custos. O valor unitário anual resulta em R\$ 0,0139/m³ para os produtos químicos.

Assim, o custo operacional anual unitário para a água superficial do rio Trombetas em Oriximiná é de R\$ 0,0684/m³.

A Tabela 5.8 apresenta o custo fixo unitário anual, o custo operacional anual e o custo de exploração da água superficial em Manaus e Oriximiná, considerando o regime de 16 horas de bombeamento por dia.

Tabela 5.8 - Custo fixo unitário anual, custo operacional unitário anual e custo de exploração unitário anual, da água superficial de Manaus e Oriximiná.

Estação	Custo Fixo Unitário Anual (R\$/m ³)	Custo Operacional Unitário Anual (R\$/m ³)	Custo de Exploração Unitário Anual (R\$/m ³)
Manaus	0,0433	0,1277	0,1710
Oriximiná	0,0335	0,0684	0,1019

O custo unitário total anual resulta na soma dos custos unitários fixos, ou seja, das obras, com os custos operacionais unitários, dessas estações.

A Tabela 5.9 apresenta os custos unitários de exploração da água superficial para os regimes de 16 hora de bombeamento por dia e 24 horas de bombeamento por dia para essas duas estações.

Tabela 5.9 - Custo de exploração unitário anual das estações de captação da água superficial de Manaus e de Oriximiná, para regimes de bombeamento de 16 horas por dia e 24 horas por dia.

Estação	Custo de Exploração Unitário Anual	
	Regime de 16 h/dia (R\$/m ³)	Regime de 24 h/dia (R\$/m ³)
Manaus	0,1710	0,1566
Oriximiná	0,1019	0,0971

5.3.2 - Comparação de Custos

A comparação de custo de exploração entre a água superficial e a água subterrânea é uma das melhores alternativas para seleção de projetos de abastecimento.

O custo da água subterrânea de Santarém (Tabela 5.6) varia de 38,4 % a 42,5 % do custo da água superficial de Manaus, e de 64,5 % a 71,3 % do custo da água superficial de Oriximiná. Convém ressaltar que apenas o custo do tratamento da água superficial de Manaus (custo unitário de produtos químicos), não necessário para a água subterrânea em Santarém é maior que o custo unitário total da água subterrânea de Santarém. Este custo contudo é bastante elevado provavelmente devido ao transporte. Nota-se também que o custo da estação e da adutora de Oriximiná equivale ao custo de 15 poços de 150 m de profundidade e vazão de 120 m³/h cada, da região de Santarém; 4 desses poços já produziram vazão maior que a atualmente bombeada através desse sistema.

A Tabela 5.10 apresenta custo unitário de construção de adutora e de poço tubular em Oriximiná e Santarém, respectivamente.

Tabela 5.10 - Custo unitário de construção de adutoras e poços tubulares em Oriximiná e Santarém.

Tipo de Captação	Local	Custo Unitário (R\$/m)
Adutora de ferro de 250 mm de diâmetro	Oriximiná	530,99
Adutora de ferro de 300 mm de diâmetro	Oriximiná	713,62
Poço Tubular de PVC de 150 m de profundidade	Santarém	533,00
Poço Tubular de PVC de 200 m de profundidade	Santarém	550,00
Poço Tubular de PVC de 250 m de profundidade	Santarém	520,00
Poço Tubular de PVC de 300 m de profundidade	Santarém	516,00

Pode-se notar que o custo unitário da adutora de ferro de 250 mm de diâmetro equivale ao custo unitário de poço tubular de PVC com profundidades compreendidas entre 150 m e 300 m. Para a adutora de ferro de 300 mm de diâmetro, o custo do metro de adutora é até mesmo maior que o custo do metro do poço tubular de PVC para essas profundidades.

A Tabela 5.11 apresenta o custo unitário de exploração da água superficial de Manaus e de Oriximiná e da água subterrânea de Santarém para poços de 200 m, 250 m e 300 m de profundidade. Esses custos são para regimes de bombeamento de 16 horas por dia.

Tabela 5.11 - Custo unitário de exploração da água superficial em Manaus e Oriximiná e da água subterrânea em Santarém, para regimes de bombeamento de 16 horas por dia.

Tipo de Exploração	Local	Custo Unitário (R\$/m ³)
Água Superficial	Manaus	0,1710
Água Superficial	Oriximiná	0,1019
Água Subterrânea	Santarém	0,0713
Poço de 150 m de profundidade		
Água Subterrânea	Santarém	0,0707
Poço de 200 m de Profundidade		
Água Subterrânea	Santarém	0,0663
Poço de 250 m de Profundidade		
Água Subterrânea	Santarém	0,0657
Poço de 300 m de Profundidade		

Deve-se ressaltar ainda, que mesmo quando for pequena a diferença entre os custos unitários de exploração da água superficial e da água subterrânea, essa diferença incide em milhões de m³ da água anualmente explorada, o que resulta em consideráveis valores.

Alguns estudos comparativos de custos da água superficial e subterrânea têm evidenciado o menor custo de água subterrânea. Um estudo detalhado das

alternativas técnicas para ampliação do sistema de água de Araraquara (SP), ampliação esta de 0,432 m³/seg, (LIMA et al, 1975) mostrou, quando comparado sob o aspecto econômico, em valores presentes (de 1974) que a alternativa para ampliação do abastecimento por água subterrânea correspondia a 50,2 % do custo por água superficial. As principais vantagens econômicas deste sistema mostram que a alternativa do abastecimento por água subterrânea é mais concordante com o crescimento populacional, sendo as perfurações de poços feitas parceladamente, acompanhando o aumento da demanda e em consequência os investimentos exigem aplicações financeiras melhor escalonadas e, também, que a captação de água subterrânea dispensa o tratamento químico.

Na região metropolitana de Maceió, em Alagoas (CAVALCANTE, et al, 1995) em um projeto para exploração de água superficial para abastecimento do Polo Cloroquímico de Alagoas, para a produção de 1,2 m³/seg está prevista a construção de uma barragem com um investimento da ordem de US\$ 10.000.000,00 (dez milhões de dólares), não incluindo despesas de desapropriação de terreno, adução, tratamento, reservação e distribuição. Considerando a construção de poços para captação de água subterrânea e a vazão média dos poços dessa área, o custo de construção dos mesmos totalizariam US\$ 2.600.000,00 (dois milhões e seiscentos mil dólares) ou 26% do custo da barragem sendo que o desembolso desse valor não seria de imediato e sim parcelado durante 10 anos, quando toda área do polo estiver ocupada por indústrias e necessitar a oferta de 1,2 m³/seg. Neste estudo é também analisada a implantação da ampliação (de 1,1 m³/seg) do sistema de abastecimento de Maceió com água superficial, com investimentos previstos de US\$ 64.800.000,00 (sessenta e quatro milhões e oitocentos mil dólares) para captação, adução e tratamento. Considerando a alternativa de construção de poços, o investimento total seria de US\$ 5.621.892,00 (cinco milhões, seiscentos e vinte e um mil e oitocentos e

noventa e dois dólares) que representa apenas 8,68 % do custo de implantação em relação à água superficial. A diferença acentuada nesses dois exemplos de Maceió é devido ao fato que no caso do polo cloroquímico a comparação é entre os custos de poços e da barragem, não incluindo os custos com adução, que são menores para poços, que normalmente podem ser locados na área de consumo.

5. 4 - UTILIZAÇÃO PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

A exploração da água subterrânea para abastecimento público deve ser analisada cuidadosamente na locação dos poços, os quais são função das características hidrogeológicas do local, como tipo de aquífero, nível estático, tipo de fluxo, qualidade da água, grau de vulnerabilidade e área de proteção. As condições técnicas e econômicas tendo em vista a rede de adução e elétrica e as interferências causadas pelos rebaixamentos dos cones de depressão de poços já existentes na área são também importantes para a localização dos poços.

No caso particular em que predominarem os fatores técnicos e econômicos deve-se avaliar se há uma razoável possibilidade de sucesso, com base no conhecimento da hidrogeologia do local.

Na análise das alternativas são feitas as comparações do incremento de custo de bombeamento causado pela interferência dos poços com a redução do custo de implantação da adutora e da rede elétrica. A Figura 5.6 apresenta de forma esquemática o comportamento destes custos. A curva (1) representa o incremento de custo devido ao bombeamento em poços com interferência, a reta (2) representa o incremento de custo da adutora e da rede elétrica; e a curva (3) representa a somatória de (1) e (2), ou seja o custo total. O custo mínimo é apresentado no ponto

de inflexão do custo total (ponto C que corresponde ao espaçamento D entre os poços); esses custos são referidos como custo unitário. As partes pontilhadas, na curva (1) e na curva (3) representam a condição sem interferência, não havendo incremento de custo no bombeamento devido à interferência do cone de depressão de poços.

A avaliação dos rebaixamentos com a distância pode ser obtida pela aplicação da fórmula de Theis, como as curvas de evolução teórica dos cones de rebaixamento dos aquíferos apresentadas nas Figuras 5.2 e 5.3.

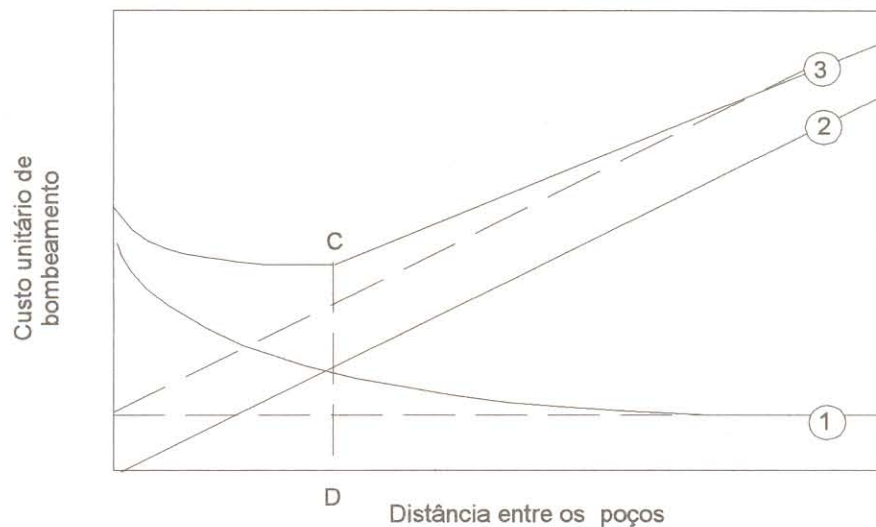


Figura 5.6 - Avaliação do espaçamento ótimo entre poços com interferência para o custo mínimo de bombeamento e adução.

Considerando que os aquíferos confinados da Formação Alter do Chão, em Santarém, encontram-se naturalmente bem protegidos e os poços com

profundidades a partir de 150 m apresentam menor custo unitário de exploração, os poços de captação de água subterrânea para abastecimento podem ser locados no perímetro urbano, sem restrição, não necessitando de grandes áreas de proteção. Devem contudo ser isolados, com cimentação do espaço anular desde a superfície até a camada confinante, para sua proteção adequada. Estes poços profundos devem constituir a rede básica de captação. Isso possibilita ainda uma boa distribuição desses poços evitando-se ou tornando-se muito pequena a interferência entre os mesmos.

A locação desses poços nas áreas de topografia mais baixas possibilita maior rebaixamento do potencial hidráulico (cone de depressão) e portanto maior produção de água, resultando em menor custo unitário de exploração.

A Figura 5.7 apresenta o esquema de um poço com profundidade de 300 m e capacidade de 320 m³/h. Nesse esquema, de perfil construtivo telescópico, o revestimento apresenta diâmetros de 44,5 mm (1 1/2”), o qual constitui a câmara de bombeamento, de 304,8 mm (12”) e de 152,4 mm (6”), estes dois últimos diâmetros sendo também dos filtros.

Deve-se ressaltar que a cimentação de proteção sanitária é indispensável para a proteção do poço de captação de água para consumo. A colocação dos filtros deverá ser feita com base na perfilagem geofísica, para sua locação captar os estratos mais permeáveis.

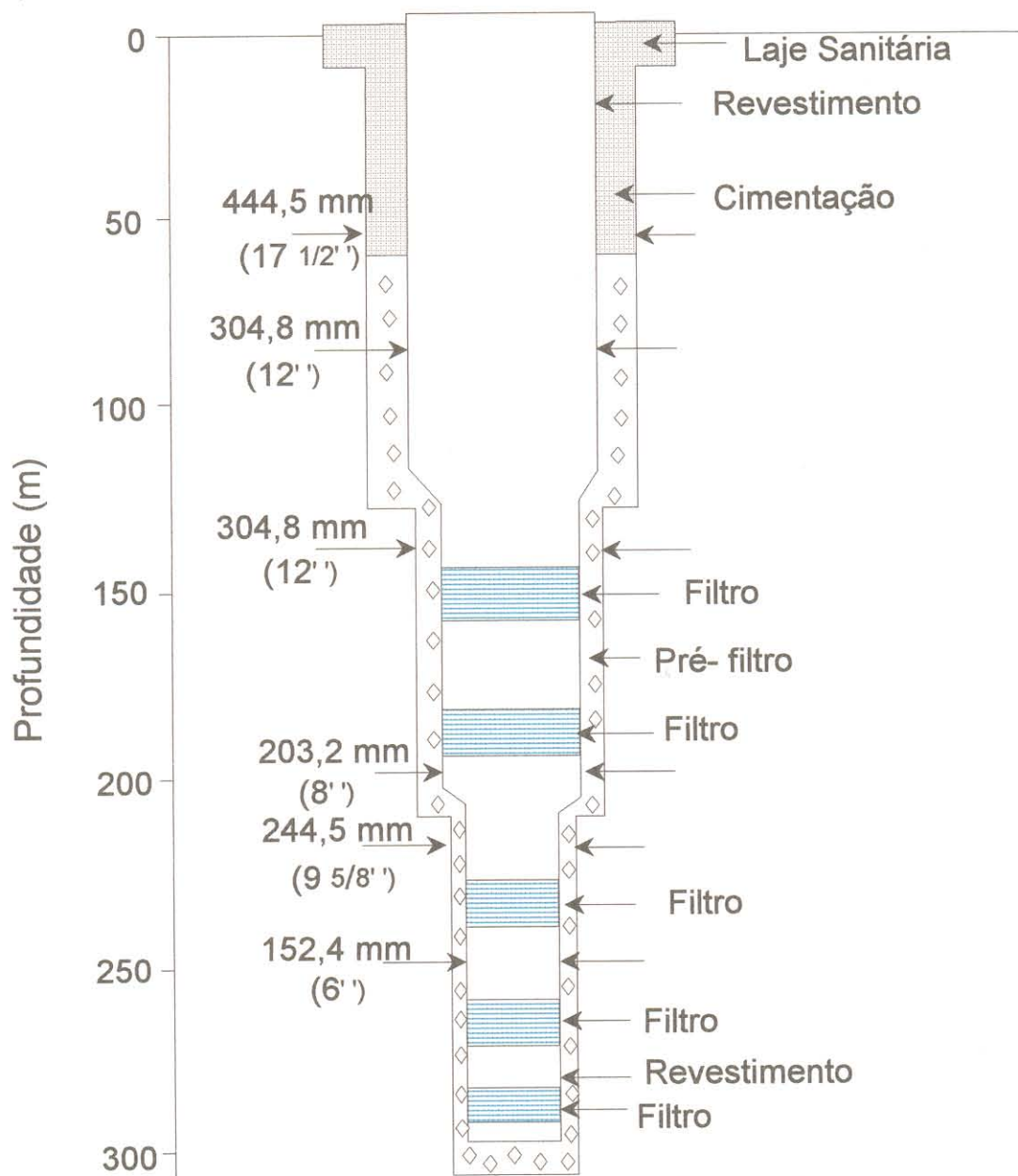


Figura 5.7 - Esquema de um poço tubular de 300 m de profundidade.

Há grande necessidade de oferta de água para a cidade de Santarém. Segundo AQUINO & RODRIGUES (1995) há um déficit de 48,46 %. Deve-se acrescentar que ao longo da linha de praia da cidade há uma série de sistemas de

captações constituídas em geral por 10 poços rasos cada sistema, tendo os poços em torno de 18 m de profundidade. Estes poços ficam submersos pela água do rio Tapajós em uma época do ano e estão situados em áreas onde são lançados dejetos de diversos tipos, potencialmente poluentes e perigosos, por barcos e também provenientes da zona urbana da cidade. Estes sistemas não possuem área de proteção e alguns estão a poucos metros ou mesmo diretamente abaixo da rede de esgotos. A forma de aplicação de poluentes é pois neste caso diretamente no aquífero e junto as captações, estando sujeito estes sistemas a alto risco de contaminação. A substituição destes sistemas por poços de captação profundos aproveitaria a rede adutora e elétrica e mesmo as instalações.

Considerando a população de cerca de 160.000 habitantes (IBGE, 1991), uma rede básica de uma dezena de poços com profundidades de 150 m a 300 m cuidadosamente estudada e projetada seria suficiente para acabar com o déficit da demanda de água em Santarém.

Esta região com grande potencial de água subterrânea deve utilizar de maneira racional este importante recurso com captações adequadas e proteção de sua qualidade.

6 - CONCLUSÕES

As pesquisas dos recursos hídricos subterrâneos da região de Santarém em uma área de 900 km² possibilitaram a avaliação das condições hidrogeológicas e dos aspectos técnicos e econômicos para a utilização racional da água subterrânea.

O igarapé São Brás, em uma área de drenagem de 147,78 km² apresenta descarga líquida anual média de 2,17 m³/seg e o componente do fluxo de base, o volume anual de 37,0 x 10⁶ m³, que corresponde à 12,0 % da precipitação pluviométrica.

Os aquíferos são constituídos por areias aluviais quaternárias, de pequena representatividade espacial e por areias, arenitos e cascalhos cretácicos da Formação Alter do Chão com distribuição em toda área.

O sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão, apresenta em sua parte superior um aquífero livre com espessura média de 50 m e subjacente a este, aquíferos confinados, com espessuras totais de 430 m, os quais estão separados por aquícludes e/ou aquítardos de pequena espessura.

Os aquíferos confinados apresentam maiores produtividades, estão naturalmente bem protegidos e constituem-se por excelência no grande manancial de água subterrânea dessa região. Sua captação através de poços deve ser isolada da parte superior, com cimentação do espaço anular até a profundidade da camada confinante como medida de proteção, a fim de preservar sua qualidade de água. Seus custos de exploração são também menores.

Os parâmetros hidráulicos determinados evidenciam condições de elevada produtividade desses aquíferos, com valores de transmissividades compreendidas entre 132 m²/dia e 790 m²/dia, sempre superiores aos valores indicativos para poços de abastecimento.

A qualidade da água subterrânea apresenta concentrações muito baixas dos constituintes dissolvidos, dentro dos limites de potabilidade. Essas baixas concentrações resultam das características hidrogeológicas da Formação Alter do Chão onde a água subterrânea circula e das condições de clima equatorial úmido, com elevada pluviosidade.

As características hidroquímicas dessas águas são do tipo sódio-cloretadas e em menor proporção do tipo mistas, tanto para os cátions como para os ânions. A predominância dos principais constituintes iônicos dissolvidos, mostra a relação $rNa > rCa > rMg$ e $rCl > rHCO_3 > rSO_4$.

A vulnerabilidade da água subterrânea apresenta baixos índices, devido principalmente à espessura da zona não saturada e à constituição desta, argilosa, na parte sul da área, nos platôs, constituindo-se na eficiente função filtro dos aquíferos da Formação Alter do Chão; na parte norte com maiores índices de vulnerabilidade há maior possibilidade de diluição de contaminantes, devido sua localização em zonas de descarga da água subterrânea.

A grande espessura dos aquíferos da Formação Alter do Chão possibilita o armazenamento de importantes reservas de água subterrânea, com volumes de $0,226 \times 10^9 \text{ m}^3$ para a reserva reguladora e de $86,55 \times 10^9 \text{ m}^3$ para a reserva permanente. Além da grande magnitude das reservas reguladora e permanente, os recursos exploráveis têm grande potencial de recarga induzida, tanto pelo aumento da realimentação pela precipitação pluviométrica, como pela indução de recarga da água superficial.

O sistema hidrogeológico da Formação Alter do Chão nessa área, com grande reserva de água subterrânea armazenada em seus aquíferos e com características hidrogeológicas favoráveis à sua exploração, constitui um recurso importante para o desenvolvimento dessa região.

Os custos de exploração da água subterrânea na região de Santarém (custos estes na boca do poço, antes de sua distribuição) apresentam valores compreendidos entre R\$ 0,0657/m³ e R\$ 0,0727/m³, para poços de até 300 m de profundidade. Estes custos decrescem com o aumento da profundidade (e vazão) dos poços, nos aquíferos livre e confinados.

Estudos comparativos de custo de exploração tem evidenciado ser o custo da água subterrânea, em geral inferior a 50 % do custo da água superficial. Os custos unitários de exploração da água subterrânea de Santarém, considerando as profundidades (e vazões) dos poços até 300 m, equivalem de 38,4 % a 42,5 % do custo unitário de exploração da água superficial de Manaus, e de 64,5 % a 71,3 % do custo unitário de exploração da água superficial de Oriximiná.

Estes estudos mostram que numa região com condições muito favoráveis para captação de água tanto superficial como subterrânea, situada na confluência de dois grandes rios (Tapajós e Amazonas, com descarga média anual de mais de $179 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{seg}$) os custos de exploração da água subterrânea são menores, sua exploração é mais prática, não necessitando de tratamento e o parcelamento dos investimentos se ajusta melhor ao aumento da demanda. A água subterrânea é de superior qualidade sanitária e de menor custo de exploração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINET, M. & MARGAT, J. 1970. *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine*. **Bull. BRGM**, Orléans, 2^{ème}, 3(4):12-22.
- ALBUQUERQUE, O. R. 1922. *Reconhecimentos Geológicos no Vale do Amazonas*. **Bol. Serv. Geol. Miner.**, Rio de Janeiro, (3):1-84.
- AMARAL, S. E. do. 1954. *Nota sobre a Série Barreiras no Vale do rio Tapajós*. **Bol. Soc. Bras. Geol.** 3(1):27-50.
- AMBROGGI, R. P. 1978. *Underground reservoirs to control the water cycle*. **Ground Water** 16(13):158-66.
- APHA. 1980. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 15 ed. New York. 1045 p.
- AQUINO, E. G. T. de & RODRIGUES, J. L. B. 1995. *Diagnóstico Mineral do Município de Santarém - Microregião Geográfica de Santarém*. Belém, DNPM. 18p.
- ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; ROZANSKI, K.; PLATA-BEDMAR, A.; TUNDIS VIDAL, A.; TANCREDI, A.; FRANKEN, C. 1992. *Downward movement of soil moisture in the Central Amazon Region traced by means of hydrogen isotopes*. 13 p. (mimeo.).
- BIERSCHENK, W. H. 1964. *Deforming Well Efficiency by Multiple Step-Drowdown Tests*. Intern. Assoc. of Scient. Hydrology, (Public 64).
- BOUSSINESQ, J. 1904. *Recherches théorétiques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des source*. **J. Math. Pure Appl.**, 15-36.

- CAPUTO, M. V. 1984. *Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil*. Santa Bárbara. California University. Tese (Doutorado) 586 p.
- CAPUTO, M. V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. N. N. 1972. *Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26. Belém, 1972. **Anais..** Belém, SBG. v. 3, p. 35-46.
- CAVALCANTE, A. T.; WANDERLEY, P. R. M.; LIMA, R. C. A. 1995. *Custos de Água Subterrânea na Região Metropolitana de Maceió-Alagoas*. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 9º & MERCOSUL DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1º, Curitiba, 1995. **Anais..** Curitiba: ABAS, p. 14-23.
- CONKLING, H. 1946. *Utilization of Groundwater Storage in stream system Development*. **Trans. Amer. Soc.Civil Eng.** (111):523-540.
- COOPER JR., H. H. & JACOB, C. E. 1946. *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history*. **Trans. Amer. Geophys. Union.** (27):526-534.
- COSAMAA. 1995. *Relatório de Abastecimento de Água e Planejamento*. Manaus. (mimeo.).
- COSAMAB. 1995. *Relatório Gerencial Mensal* (Novembro de 1995). Manaus. (mimeo.).
- COSANPA. 1994. *Relatório mensal da divisão de controle sanitário sobre o tratamento de água*. (Setembro). Belém, (mimeo.).
- CPRM. 1978. *Projeto COSANPA - Relatório Final de Sondagem*. Belém. 21p., (mimeo.).

- CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C.; FEIJÓ, F.J.
1994. 4 - *Bacia do Amazonas*. **Bol. Geoc. PETROBRÁS**. 8(1): 47-56.
- CUSTODIO, E & LLAMAS, R. M. 1976. *Hidrología Subterránea*. Barcelona:
Ed. Omega. Tomo II, p. 2257-2266.
- DAEMON, R. F. 1975 *Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas* **Rev. Bras. Geoc.** 5(2):78-84.
- DAEMON, R. F. & CONTREIRAS, A. 1971. *Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25. São Paulo, 1971. **Anais..** São Paulo, SBG. v. 3, p. 79-88.
- DARCY, H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: V. Dalmont.
- DNMET. 1992. *Normais Climatológicas (1961-1990)*. Brasília. 84 p.
- DNPM. 1974. *Levantamento de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro. v.5.
- DNPM. 1976. *Levantamento de Recursos Naturais*. Rio de Janeiro. v.10.
- DRISCOLL, G. 1987. *Groundwater and Wells*. 2 ed. St. Paul: Johnson Division. 1089 p.
- DUPUIT, J. 1863. *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Paris. Dunod.
- FARVOLDEN, R. N. 1963. *Geologic Controls on Groundwater Storage and base Flow*. **J. Hidrol.** (1):219-249.
- FENZL, N. 1988. *Introdução à Hidrogeoquímica*. Belém. UFPA. 189 p.
- FOSTER, S. 1987. *Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy*. Conf. vulnerab. of soil and groundwater to pollutants. Proc. Noordwijk.

- FOSTER, S. & HIRATA, R. 1968. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima. CEPIS-OPIS-OMM. 81 p.
- HALL, F. R. 1968. *Baseflow Recessions - a review*. **Water Resources Res.**(4):973-983.
- HANTUSH, M. S. & JACOB, C. E. 1955. *Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer*. **Trans. Amer. Geophys. Union**. 36p.
- HEM, J. D. 1970. *Study and Interpretation of the Chemical characteristics of Natural Water*. **Geol. Surv. Water Supply Paper 1473**. Washington. 363 p.
- HILL, R. A. 1940. *Geochemical Patterns in Coachella Valley, California*. **Trans. Amer. Geophys. Union**, 21 p.
- HIRATA, R. 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. 195 p. Tese (Doutorado).
- HORDON, R. M. 1977. *Water Supply as a Limiting Factor in Developing Communities*. Endogenous vs. Exogenous Sources. **Water Res. Bull.**(13):933-939.
- HORTON, R. E. 1933 *The role of infiltration in the hydrologic cycle*. **Trans. Amer. Geophys. Union**, 446-460.
- HUBBERT, M. K. 1940. *The theory of groundwater motion*. **J. Geol.**(48):785-944.
- HUBBERT, M. K. 1956. *Darcy's law and the field equations of the flow of groundwater fluids*. **Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng.** (207):222-239.
- IBGE. 1991. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 1989 - Tabulação Municipal - Pará*. Rio de Janeiro. 122 p.
- IBGE & SUDAM. 1990. *Projeto Zoneamento das Potencialidades dos Recursos Naturais da Amazônia Legal*. Rio de Janeiro. 211 p.

- INESON, J. & DOWNING, R. A. 1964. *The Groundwater Component of River Discharge and its Relationship to hydrogeology*. **J. Inst. Water Eng.** (18):519-541.
- JACOB, C. E. 1946. *Drowdown test to determine effective radius of artesian well*. **Trans. Amer. Soc. of Civil Engineers**. 12:1047-1070.
- KISTLER, P. 1954. *Historical Resume of the Amazon basin*. Belém: PETROBRÁS. (mimeo.).
- KRAUSE, G. G. 1956. *Progress report rio Maués drainage*. Belém, PETROBRÁS. (mimeo.).
- LEHR, J.; HURLBURT, S.; GALLAGHER, B.; VOYTEK, J. 1988. *Desing and Construction of Water Wells*. New York. Van Nostrand Reinhold. 229p.
- LEWIS, W. J.; FOSTER, S. S. D.; DRASAR, B. S. 1982. *The risk of Groundwater pollution by on site sanitation in developing countries*. WHO/IRCD Report 01-82.
- LIMA, D. P. A.; CARNESECA, L. F.; PIERRI, A. B.; SILVA, J. B. 1975. *Estudo Comparativo de Viabilidade Econômica entre Água Superficial e Água Subterrânea para Ampliação do Sistema de Abastecimento de Água de Araraquara*. Araraquara. DAEE. 29 p. (mimeo.).
- MARGAT, J. 1968. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterrainer à la pollution*. Bases de la cartographie. Orléans BRGM, 68 SGL, 198 HYD.
- MEYBOOM, P. 1961. *Estimating groundwater recharge from stream hydrographs*. **J. Geophys. Res.** 66:1203-1214.
- MOLINIER, M.; CUDO, K. J.; GUIMARÃES, V. 1992. *Disponibilidade de água na bacia Amazônica*. In: Simpósio Internacional de Estudos Ambientais em Florestas Tropicais Úmidas (FOREST'92), Rio de Janeiro, 1992. 24-29.

- MORALES, G. 1958. *Geologia geral e possibilidades petrolíferas da bacia Amazônica*. Belém: PETROBRÁS. (mimeo.).
- OMS. 1984. *Guidelines for drinking - Water quality*. WHO, Geneva. v. 1, 128p.
- PACHECO, A. & REBOUÇAS, A. C. 1985. *Aspectos de proteção sanitária dos poços tubulares no Município de São Paulo*. **Rev. Águas Subterrâneas**, 9:51-58.
- PETERS, H. J. 1972. *Ground-water management*. **Water Res.Bull.**, (8):188-197.
- PETROBRÁS. 1955. *Perfil composto do poço 1-AC-1-PA*. Belém. (mimeo.).
- PETROBRÁS. 1985. *Perfil composto do poço 1-BR-1A-PA*. Belém. (mimeo.).
- PIPER, A. M. 1944. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. **Amer. Geophys. Union**. 25:914 – 923.
- PRICE, L. I. 1960. *Dentes de Theropoda num testemunho de sondagem no Estado do Amazonas*. **An. Acad. Bras. Cienc.** 3:451-462. (Supl. Simp. Bras. Paleont.).
- PRO-SANEAMENTO. 1995. Brasília: CEF/Secretaria de Política Urbana. 12p.
- REBOUÇAS, A. da C. 1976. *Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná*. São Paulo: USP. 143p. Tese (Livre Docência), Universidade de São Paulo. 1976.
- ROCHA, G. A. & JORBA, A. F. 1982. *Manual de Operação e Manutenção de Poços*. São Paulo. DAEE. 90p.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. de A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. 1984. *Geologia do Brasil*. Brasília. DNPM, 501 p.
- SCHÖELLER, H. 1962. *Les eaux souterraines*. Paris. Masson & Cie. 642 p.
- SINGH, K. P. 1969. *Theoretical Baseflow Curves*. **J. Hydraul. Div. Proc. Amer.Soc.Civil Eng.** 95:2029-2048.

- STALLARD, R. F. 1980. *Major Element Geochemistry of the Amazon River System*, Woods Hole, MIT 365p. Tese (Doutorado) Woods Hole MIT. 1984.
- SUDAM. 1984. *Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira*. Belém. 125 p.
- THEIS, C. V. 1935. *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*. **Trans. Amer. Geophys. Union.** (2):519-524.
- THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. 1955. *The water balance*. Climatology, Lab. of Climatology, Centerton, N. J. 8(1).
- USEPA. 1987. *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*. Wasington. Office of Groundwater Protection. 185p.