

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CRITÉRIOS PARA PROJETO DE REDE DE MONITORAMENTO DE
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ, SP.**

Claudio Luiz Dias

Orientadora: Prof^a. Dra. Dorothy Carmen Pinatti Casarini

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2005

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Dias, Claudio Luiz

Crerios para projeto de rede de monitoramento
de águas subterrâneas – proposta de implantação
na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, SP. / Claudio
Luiz Dias — São Paulo, 2005.

159 p.: il.

Dissertação (Mestrado) : IG/USP

Orient.: Casarini, Dorothy Carmen Pinatti

1. Água subterrânea. 2. Monitoramento: Qualidade
: Quantidade 3. Bacia hidrográfica: São Paulo I.
Título

Conduziu-me então à entrada do templo. Eis que as águas jorravam de sob o limiar do edifício. Fez-me sair e contornar o templo; eu vi a água brotar do lado do meio dia.

O homem com uma corda na mão mediu mil côvados; a seguir fez-me passar a água que chegou até os tornozelos. Mediu mais mil côvados e me fez atravessar a água, que me subiu até os joelhos. Mediu de novo mil côvados e fez-me atravessar a água que me subiu até os quadris. Mediu enfim mil côvados e era uma torrente que eu não podia atravessar, de tal modo que as águas tinham crescido...Estas águas - disse-me ele - dirigem-se para o oriente, elas descem a planície e se lançarão no mar. Tudo o que esta água atingir se tornará são e saudável e em toda parte aonde chegar a torrente haverá vida, por que estas águas vêm do santuário.

**A fonte maravilhosa que jorra do templo.
Ezequiel, cap. 47**

AGRADECIMENTOS

À Prof^a. Dr^a. Dorothy Carmen Pinatti Casarini pela orientação segura durante a elaboração deste trabalho;

Ao Curso de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo conhecimento adquirido;

À CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, que viabilizou a minha participação no curso de pós-graduação;

Às colegas da CETESB, Elzira Dea e Mara Lemos, pelos debates, críticas e sugestões sem pre valiosos e Rosangela Modesto e Marilda pelo apoio técnico em imagens e banco de dados.

Ao Dr. Andreas Scheidleder, do *European Topic Centre on Water (ETC/WTR)*, pelas valiosas informações disponibilizadas;

Aos amigos Fernando Nadal e Fernando Pessoa, pelo auxílio prestado;

Ao companheiro de muitos projetos, Carlo Cury, pelo incentivo e pelas valiosas opiniões;

À dona Alba, minha mãe, pelo incentivo constante em buscar o aperfeiçoamento profissional e às minhas irmãs Juçara e Izilda, pelo carinho;

A todos os amigos, que souberam entender a minha ausência no período final da elaboração desta dissertação.

Sumário

AGRADECIMENTOS	IV
SUMÁRIO	V
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
DEFINIÇÕES	IX
RESUMO	X
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Legislação	3
2.2 Monitoramento de águas subterrâneas no mundo	8
3 - OBJETIVOS.....	42
4 – MATERIAL E MÉTODOS	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Levantamento dos critérios de projeto, implantação e operação de redes de monitoramento	44
5.1.1 Objetivos do monitoramento	47
5.1.2 Atribuições referentes ao monitoramento	53
5.1.3 Áreas prioritárias para monitoramento	54
5.1.4 Seleção e densidade de distribuição de pontos da amostragem	55
5.1.5 Seleção de parâmetros a serem determinados ou mensurados	62
5.1.6 Frequências de amostragem	66
5.1.7 Procedimentos de coleta, preservação, acondicionamento e transporte de amostras	68
5.1.8 Metodologias analíticas	73
5.1.9 Controle de Qualidade e de Confiança	74
5.1.10 Tratamentos Estatísticos	78
5.1.11 Interpretação dos resultados	83
5.1.12 Elaboração de relatórios	85

5.2 Seleção de critérios a serem adotados no estado de São Paulo	86
5.2.1 Objetivos gerais de monitoramento de águas subterrâneas	87
5.2.2 Definição dos órgãos coordenadores, executores e colaboradores	87
5.2.3 Recursos humanos e financeiros	89
5.2.4 Seleção do corpo hídrico a ser monitorado	91
5.2.5 Definição do número de pontos de amostragem	92
5.2.6 Seleção de pontos de amostragem	93
5.2.7 Definição dos parâmetros a serem monitorados	95
5.2.8 Frequência de amostragem	96
5.2.9 Procedimentos de coleta de amostras	97
5.2.10 Metodologias analíticas	100
5.2.11 Gerenciamento das informações	105
5.3 Projeto de rede de monitoramento de águas subterrâneas na Bacia do Alto Tietê.	110
5.3.1 Localização e caracterização da área piloto	111
5.3.2 Objetivos do monitoramento	114
5.3.3 Órgãos de coordenação e operação da rede de monitoramento	114
5.3.4 Recursos financeiros e humanos - Logística	123
5.3.5 Identificação do corpo hídrico a ser monitorado	115
5.3.6 Definição do número de pontos de amostragem	116
5.3.7 Seleção de pontos de amostragem	142
5.3.8 Seleção de parâmetros e frequência de amostragem	144
6 – CONCLUSÕES	146
7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

Lista de Quadros

Quadro 1	Concepção do monitoramento de águas subterrâneas em países da Europa, América do Norte e no Brasil.....	08
Quadro 2	Densidade de pontos de monitoramento em alguns estados da Alemanha, por tipo de monitoramento	13
Quadro 3	Parâmetros a serem determinados em função da frequência de amostragem na Irlanda do Norte.....	21
Quadro 4	Exemplos de objetivos técnicos e os respectivos dados a serem coletados.....	51
Quadro 5	Lista de parâmetros indicadores de qualidade de águas subterrâneas.....	64
Quadro 6	Frequências de monitoramento de qualidade utilizadas na Alemanha em função da vulnerabilidade.....	70
Quadro 7	Equipamentos adequados para coleta de água subterrânea em função das características dos poços e dos parâmetros a serem determinados.....	73
Quadro 8	Frascos utilizados, os métodos de preservação, o volume necessário e o prazo de validade das amostras, por parâmetro.....	75
Quadro 9	Erro analítico máximo permitido em função da condutividade elétrica da água.....	78
Quadro 10	Estabelecimento de índice de qualidade de dados obtidos em monitoramento de águas subterrâneas.....	80
Quadro 11	Etapas, atividades e sub atividades do monitoramento de águas subterrâneas.....	88
Quadro 12	Grupos de parâmetros a serem mensurados ou determinados no monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.....	98
Quadro 13	Métodos analíticos e limites de detecção de interesse.....	103
Quadro 14	Índices de vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas.....	137

Lista de Figuras

FIGURA 1	Distribuição dos pontos da rede de monitoramento de águas subterrâneas no estado de São Paulo.....	39
FIGURA 2	Estrutura organizacional do Proágua.....	42
FIGURA 3	Ciclo de um projeto de monitoramento.....	47
FIGURA 4	Esquema de etapas do desenvolvimento de um projeto de monitoramento	48
FIGURA 5	Perfil esquemático de poço tubular.....	58
FIGURA 6	Esquematização de Gráfico Box-Plot.....	83
FIGURA 7	Mapa esquemático da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.....	115
FIGURA 8	Localização geográfica das bacias de São Paulo e Taubaté.....	119
FIGURA 9	Litoestratigrafia dos depósitos sedimentares continentais terciários da Bacia de São Paulo.....	123
FIGURA 10	Mapa geológico da Bacia do Alto Tietê.....	127
FIGURA 11	Seções geológicas esquemáticas do município de São Paulo.....	131
FIGURA 12	Mapa hidrogeológico da Bacia do Alto Tietê.....	134
FIGURA 13	Mapa de vulnerabilidade natural ao risco de contaminação para das unidades hidrogeológicas da Bacia do Alto Tietê.....	138
FIGURA 14	Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “mecânica-metalúrgica”.....	140
FIGURA 15	Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “eletro-eletrônica”.....	140
FIGURA 16	Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “química”	141
FIGURA 17	Distribuição de poços cadastrados pelo DAEE em municípios da Bacia do Alto Tietê em janeiro de 2005	142
FIGURA 18	Divisão da área da Bacia do Alto Tietê por quadriculas para dimensionamento do número e distribuição dos pontos de amostragem	145

DEFINIÇÕES

Amostra - é um subconjunto cujas propriedades se estudam com o fim de generalizá-las ao conjunto. No caso da água subterrânea, significa um determinado volume de água coletado em poços com o fim de inferir as características físicas, químicas e biológicas do aquífero de onde foi retirada (NBR 9896 ABNT,1993).

Aquíferos Cársticos - São os aquíferos formados em rochas carbonáticas. Constituem um tipo peculiar de aquífero fraturado, onde as fraturas, devidas à dissolução do carbonato pela água, podem produzir aberturas muito grandes, criando, neste caso, verdadeiros rios subterrâneos. É comum em regiões com grutas calcárias, ocorrendo em várias partes do Brasil (ANA,2002).

Aquíferos Fraturados ou Fissurados - Ocorrem em rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas em acumular água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação. No Brasil a importância destes aquíferos está muito mais em sua localização geográfica, do que na quantidade de água que armazenam. (ANA,2002).

Aquíferos Porosos - Ocorrem em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e solos arenosos decompostos. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e por sua ocorrência em grandes áreas. Estes aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e várzeas. (ANA,2002).

Condição da água – expressa a situação global em que se encontra uma determinada massa de águas subterrâneas, definida em função de seu estado qualitativo e quantitativo.

Corpo hídrico subterrâneo - Representa um volume de água subterrânea hidrogeologicamente distinto e delimitado dentro de um aquífero ou sistema aquífero (Diretiva Européia 2000/60/EC).

Ensaio – operação técnica que consiste na determinação de uma ou mais características de um dado produto, processo ou serviço, de acordo com um procedimento especificado. (ABNT ISO/IEC, 1998).

Gestão - forma mais ampla de ação, sendo norteadada por uma decisão política motivada, por exemplo, pela escassez relativa de recursos naturais e pela necessidade de preservação para as gerações futuras (SETTI *et al.*, 2001).

Gerenciamento – ação executiva que subsidia a implementação da gestão de recursos hídricos

Qualidade da Água - é o resultado do conjunto de características físicas, químicas, biológicas e organolépticas dessa água, relacionado para com o seu uso para um fim específico (NBR 9896 - ABNT,1993).

Valores de referência - podem ser definidos como as concentrações naturais sem influências antrópicas. Entretanto, podem também representar uma concentração inicial para um monitoramento contínuo das tendências, e nesta situação, podem já refletir alguma influência das atividades humanas (Uil *et al.*, 1999).

RESUMO

O monitoramento das águas subterrâneas é uma ferramenta de gestão do recurso hídrico e esta dissertação apresenta uma revisão sobre critérios internacionais de projeto, implantação e operação de redes regionais, avaliando o atual monitoramento de qualidade efetuado no estado de São Paulo.

Foram selecionados critérios de dimensionamento de rede de monitoramento, de controle de qualidade, de técnicas de amostragem e de interpretações estatísticas, ressaltando a necessidade de integração entre os órgãos gestores do recurso hídrico e os demais interessados.

Em uma rede de monitoramento, os pontos de amostragem devem ser uniformemente distribuídos nos corpos hídricos subterrâneos priorizados em função da vulnerabilidade natural, fontes de poluição e risco de super exploração. Os parâmetros de qualidade, semestralmente determinados, foram selecionados com base na Portaria MS 518/04. Para o monitoramento da quantidade, os parâmetros são aqueles que caracterizam hidraulicamente os aquíferos e sua interação no ciclo hidrológico, sendo mensal sua frequência de medição. O monitoramento contínuo dependerá de disponibilidade de recursos financeiros.

Foi apresentada uma proposta de projeto de monitoramento para a Bacia do Alto Tietê, considerada prioritária, propondo que a seleção dos pontos de amostragem seja efetuada por um comitê representativo das diferentes entidades interessadas.

ABSTRACT

The groundwater monitoring is a tool of management of this natural resource and it is presented a review about international criteria used on project, implementation and operation of statewide monitoring networks, assessing the actual groundwater quality network of the Sao Paulo State.

It was selected criteria of sizing the monitoring network, of quality control and quality assurance, of sampling techniques and of statistics approaches, pointing out the necessity of interaction between different involved institutions.

In this monitoring network, the sampling points must be uniformly distributed in prioritized groundwater bodies, considering the natural vulnerability of the aquifers and the presence of the quality and quantity stressors.

The quality determinants, biannually sampled, were chosen considering the drink water standards (Portaria 518/04 MS). The parameters of the quantity monitoring network are those one used to characterize hydraulically the aquifer, in relation to the water cycle. The frequency of collecting data will be monthly and the continuous monitoring will depend on the amount of available financial resources.

Considering the selected criteria, it was proposed a project of integrated monitoring network for the Alto Tietê Basin (Sao Paulo Metropolitan Region). Finally, it was proposed that a comite of experts, representing the different involved stakeholders must do the implementation of this monitoring network.

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade concreta da escassez de água doce começa a tornar-se, cada vez mais, a grande ameaça ao desenvolvimento econômico e à estabilidade política do mundo nas próximas décadas. As disputas pelo uso da água poderão, inclusive, desencadear conflitos e guerras em escala imprevisível. Em 2025, cerca de 2,7 bilhões de pessoas, em todo o mundo, enfrentarão a falta d'água (Agência Nacional de Águas, 2004).

A água subterrânea, que se encontra armazenada nos aquíferos, representa quase a totalidade (97,5%) do volume de água doce, na forma líquida, existente no Planeta Terra. No Estado de São Paulo, em 1997, 72% dos municípios dependiam, total ou parcialmente, da água subterrânea para o abastecimento público. Além disso, em todos os municípios, ocorre a captação privada para complementação do abastecimento na agricultura, indústrias, comércio e residências. Em algumas regiões do Estado, o desenvolvimento econômico está diretamente vinculado a exploração de águas subterrâneas, considerando a escassez de águas superficiais (CETESB, 2004). Apesar da importância das águas subterrâneas, suas condições naturais em têm sofrido alterações resultantes do adensamento populacional, do crescimento industrial e da agricultura intensiva (Uil *et al.*, 1999; Pocol e Valentin, 2004).

Segundo Tuinhof *et al.* (2004), estas alterações ocorrem lentamente, sendo identificadas apenas por meio de um monitoramento bem planejado e de longo termo. Segundo (Organização Internacional de Energia Atômica, 2001), o gerenciamento sustentável do recurso hídrico subterrâneo significa utilizá-lo em equilíbrio, tanto em qualidade como em quantidade, com base no conhecimento sobre os impactos potenciais de contaminantes antrópicos ou naturais, as taxas de recarga e de exploração, bem como considerando as prioridades do uso da água. Para Uil *et al.* (1999), o monitoramento é uma ferramenta deste gerenciamento.

No Brasil, estudos realizados entre 1997 e 1998, pelo Ministério do Meio Ambiente, sobre demandas ambientais brasileiras, apontaram o tema dos recursos hídricos como de alta prioridade, principalmente no que se refere ao conhecimento sistemático dos aspectos quali-quantitativos das águas, de forma a apoiar o processo de tomada de decisão relativo ao controle das bacias hidrográficas, constituindo, assim, a base técnica do Programa Nacional do Meio Ambiente (Ministério do Meio Ambiente, 2004).

Apesar deste quadro e dos esforços para a elaboração de sistemas de informações capazes de armazenar, tratar e divulgar informações sobre os recursos hídricos subterrâneos, como o SIAGAS desenvolvido pela Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais (CPRM) e o Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA), no Brasil, as informações são ainda insuficientes, dispersas e as pesquisas existentes são poucas, descontinuadas e inconsistentes (ANA, 2004), sendo que os dados gerados estão pulverizados e, de certa forma, indisponibilizados, sobretudo, pela falta de interação e integração entre os diversos órgãos e empresas que atuam no setor (Agência Nacional de Águas, 2004)

Torna-se, portanto, necessário gerar e sistematizar o conhecimento sobre as condições das águas subterrâneas, sendo o monitoramento, uma das ferramentas possíveis. Esta dissertação traz uma revisão sobre como o monitoramento de águas subterrâneas é abordado em diversos países e apresenta uma proposta de critérios a serem considerados no aperfeiçoamento da rede de monitoramento de qualidade operada, no estado de São Paulo, pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), integrando os aspectos de quantidade, de forma que, as informações geradas possam subsidiar o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

É apresentado ainda, um estudo de caso, onde os critérios selecionados são aplicados no planejamento de uma rede de monitoramento integrado das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Segundo UNEP/WHO (1996), a *International Organization for Standardization* (ISO) define o monitoramento como “um processo programado de amostragem, medições e armazenamento de dados sobre várias características da água”.

Segundo Ward (*apud* SIMONETI, 1999), o monitoramento da qualidade da água, é definido como sendo o esforço para obter uma compreensão das características químicas, físicas e biológicas da água, por meio da amostragem e interpretação estatística. Para Petts (*apud* SIMONETI, 1999) o monitoramento é a coleta de dados com o propósito de obter informações sobre uma característica e/ou comportamento de uma variável ambiental.

Nesta dissertação, adotou-se a definição proposta por UIL *et al.* (1999) para monitoramento de águas subterrâneas, como sendo: a coleta de dados em intervalos regulares de tempo, geralmente relacionados a uma localidade e profundidade, de modo a prover informações sobre as águas subterrâneas, tanto em qualidade como em quantidade.

2.1 Legislação

Segundo o Artigo 21 da Constituição Federal de 1988, a água é um bem público, sendo que o domínio e a gestão dos recursos hídricos é de atribuição dos estados (Ministério do Meio Ambiente, 2004). A Lei Federal nº 9.433, de 08.01.1997, regulamentada pelo Decreto nº 2.612 de 03.06.1998, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, adotando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. Os instrumentos de política desta Lei são: i) os Planos de Recursos Hídricos; ii) o Enquadramento dos corpos d'água em classes de uso preponderantes; iii) a Outorga de Direito de Uso dos Recursos Hídricos;

iv) a Cobrança pelo uso da água; v) o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos; e vi) a Compensação aos Municípios, quando da inundação por reservatórios artificiais. Os organismos que compõem o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos são:

- Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), órgão colegiado mais elevado na hierarquia do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, ao qual cabe estabelecer as macro-diretrizes, desenvolver os Planos Nacionais de Recursos Hídricos, além de dirimir os conflitos de maior vulto;
- Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal (CRH), órgãos consultivos e deliberativos, aos quais cabem, na esfera de suas competências, arbitrar, em última instância administrativa, os recursos relativos às decisões dos Comitês de Bacias Hidrográficas dos rios de domínio de seu Estado ou Distrito Federal, bem como aprovar e acompanhar os Planos Estaduais de Recursos Hídricos;
- Comitês de Bacias Hidrográficas, com a participação dos usuários, das prefeituras, da sociedade civil organizada, dos níveis de governo estaduais e federal, e destinados a atuar como “parlamento das águas”, posto que são o fórum de decisão no âmbito de cada bacia hidrográfica;
- Agências de Água, para atuarem como secretarias executivas de seu(s) correspondente(s) comitê(s), e destinadas a gerir os recursos oriundos da cobrança pelo uso da água, exercitando a administração do sistema;
- Órgãos e entidades do serviço público federal, estaduais, do Distrito Federal e municipais que têm relevante atuação na gestão dos recursos hídricos, devendo promover estreita parceria com os demais agentes previstos na Lei Federal nº 9.433/97 (BRASIL, 2004a).

O CNRH atua por meio de Resoluções, como a de nº 15, de 11.01.2001, que estabelece as diretrizes para gestão integrada das águas e define um corpo hídrico subterrâneo como o volume de água armazenado no subsolo e a de nº 22, de 24.05.2002,

que estabelece as seguintes diretrizes para inserção das águas subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos:

Art 2º Os Planos de Recursos Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando a gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

Art. 3º As informações hidrogeológicas e os dados sobre as águas subterrâneas necessários à gestão integrada dos recursos hídricos devem constar nos Planos de Recursos Hídricos e incluir, no mínimo, por aquífero:

- I – a caracterização espacial;
- II – o cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico;
- III – a estimativa das recargas e descargas, tanto naturais quanto artificiais;
- IV – a estimativa das reservas permanentes exploráveis dos aquíferos;
- V – caracterização física, química e biológica das águas dos aquíferos; e
- VI – as devidas medidas de uso e proteção dos aquíferos.

Art. 4º Os Planos de Recursos Hídricos, elaborados por bacia, devem contemplar o monitoramento da quantidade e qualidade dos recursos dos aquíferos, com os resultados devidamente apresentados em mapa e a definição mínima da:

- I – rede de monitoramento dos níveis d'água dos aquíferos e sua qualidade;
- II – densidade de pontos de monitoramento; e
- III – frequência de monitoramento dos parâmetros.

A Lei Federal nº 9.984/2000 criou a Agência Nacional de Águas (ANA), que é uma autarquia sob regime especial, com autonomia administrativa e financeira, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, integra o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e tem como atribuições, entre outras, participar, em parceria com o CNRH, da elaboração do Plano Nacional de Recursos Hídricos e supervisionar a sua implementação; outorgar, por intermédio de autorização, o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União; implementar, em articulação com os Comitês de Bacia Hidrográfica, a cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio da União; organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos; propor ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos o estabelecimento de incentivos, inclusive financeiros, à conservação qualitativa e quantitativa de recursos hídricos (BRASIL, 2004).

No âmbito do estado de São Paulo, a Constituição Estadual, de 05.10.1989, define, em seu Artigo 205, que o Estado instituirá, por lei, sistema integrado de gerenciamento dos recursos hídricos, congregando órgãos estaduais e municipais e a sociedade civil, e assegurará meios financeiros e institucionais para a utilização racional das águas superficiais e subterrâneas e sua prioridade para abastecimento às populações e para a proteção das águas contra ações que possam comprometer o seu uso atual e futuro. O Artigo 206 dessa Constituição define que as águas subterrâneas são reservas estratégicas para o desenvolvimento econômico-social e valiosas para o suprimento de água às populações, e assim deverão ter programa permanente de conservação e proteção contra poluição e superexploração, com diretrizes estabelecidas em lei.

A Lei Estadual 7.663 de 30.12.1991, estabeleceu as diretrizes da Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento das Águas Superficiais e Subterrâneas. A Lei Estadual 9.034, de 27.12.1994, estabeleceu as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI's) e os Programas de Duração Continuada (PDC), destacando-se o PDC4, que trata do Desenvolvimento e Proteção das Águas Subterrâneas.

Segundo o inciso 3º do artigo 6º do Regulamento da Lei nº 997, de 31.06.1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente, aprovado pelo Decreto Estadual nº 8.468, de 08.09.1976, a programação e a realização de coleta de amostras, análises laboratoriais e de interpretação dos resultados, necessários à avaliação da qualidade dos meios, incluem-se entre as atribuições da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB), para controle e preservação do meio ambiente.

O Decreto Estadual 32.955 de 07.02.1991, que regulamenta a Lei 6.134 de 02.07.1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas, estabelece que, para o gerenciamento das águas subterrâneas são necessárias ações correspondentes à avaliação, planejamento e conservação do uso dos recursos hídricos subterrâneos por meio de outorgas e fiscalização do uso.

Ainda segundo esse mesmo Decreto, cabe ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), a administração das águas subterrâneas do Estado de São Paulo, nos campos de pesquisas, captação, fiscalização, extração e acompanhamento de sua interação com águas superficiais e com o ciclo hidrológico; cabe à CETESB prevenir e controlar a poluição das águas subterrâneas; cabe à Secretaria da Saúde (SS) a fiscalização das águas subterrâneas destinadas a consumo humano; e cabe ao Instituto Geológico (IG) a execução de pesquisa e estudos geológicos e hidrogeológicos, o controle e arquivo de informações dos dados geológicos dos poços, no que se refere ao desenvolvimento do conhecimento dos aquíferos e da geologia do Estado.

O Decreto 41.258 de 31.10.1996, que aprova o regulamento dos artigos 9º a 13 da Lei nº 7.663 de 30.12.1991, atribui ao Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE, os atos de outorga do direito de uso da água, que se fará por concessão quando a água destinar-se ao uso de utilidade pública ou quando a captação ocorrer em terreno de domínio público e por autorização, quando a água extraída destinar-se a outras finalidades. A Portaria DAEE 717, de 12.12.1996, aprovou a Norma que disciplina o uso dos recursos hídricos do estado de São Paulo.

A Resolução conjunta SES-SMA-SERHS nº 1 de 14.10.2003, instituiu um grupo de trabalho intersecretarial para o aprimoramento, compatibilização e integração dos procedimentos técnicos e administrativos para o controle da exploração e uso das águas subterrâneas no estado, relativos a sistemas alternativos de abastecimento (ESTADO DE SÃO PAULO, 2003). Como produto, este grupo elaborou uma minuta de Resolução que estabelece a obrigatoriedade de monitoramento da qualidade da água para consumo humano para os parâmetros constantes da Portaria MS 518/2004, por ocasião da solicitação de outorga ou renovação do direito de uso das águas subterrâneas, bem como em frequências anuais, em locais onde haja fontes pontuais com potencial de poluição de solo e águas subterrâneas, em um raio de até 500 metros do ponto de perfuração do poço.

2.2 Monitoramento de águas subterrâneas no mundo

O Quadro 1 apresenta um resumo sobre a concepção do monitoramento das águas subterrâneas em alguns países da Europa, América do Norte e também no estado de São Paulo. Na seqüência, é apresentada uma descrição mais detalhada, por país.

Quadro 1 – Concepção do monitoramento de águas subterrâneas em países da Europa, América do Norte e no Brasil

País	Órgão coordenador		Sistema de monitoramento		Principais objetivos	Ano de início	
	Qualidade	Quantidade	Abrangência	Ponto de monitoramento		Quali.	Quanti.
Alemanha	Depto de Águas ou órgão ambiental		Estadual Pontos fixos	Poços de monitoramento	Caracterização Subsidiar a gestão	1980	1910
Áustria	Ambiental Agricultura	Órgão de Hidrologia	Nacional Pontos fixos	Poços tubulares	Caracterização Subs.legislação	1991	1930
Espanha	Meio Ambiente e Energia		Nacional Pontos fixos	Poços e nascentes	Monit. Intrusão salina	1971	1967
Finlândia	Meio Ambiente		Nacional Pontos fixos	Nascentes e estações (a)	Detectar alterações	1974	
França	Min. Meio Ambiente		Por bacias Pontos fixos	Poços tubulares	Subs. à gestão Detect. alteraç	1902	
Holanda	Inst. de Meio Ambiente		Nacional Pontos fixos	Poços de monitoramento	Detect alteraç Avaliar gestão	1980	1870
Irlanda do Norte	Meio ambiente		Nacional Pontos fixos	Poços tubulares	Valores de referência	1992	
Itália	Meio ambiente	Companhias abastecimento	Estadual	Poços tubulares	Qualidade para abastecimento	--	--
Noruega	Serviço geológico		Nacional Pontos fixos		Subsidiar abastecimento	1977	
Portugal	Inst. de Águas		Regional pontos fixos	Poços de monitoramento	Avaliar nitrato Caracterizar a hidrogeologia	1977	1970
Rep. Irlanda	Meio Ambiente		Nacional Pontos fixos		tendências Qualid. abastec	--	1974
Suécia	Serviço Geológico		Nacional Pontos fixos	Poços de monitoramento	Caracterizar Detectar alterações	1979	1959
Estados Unidos	Agências de Meio Ambiente Depto de Rec. Hídricos, e Serviço Geológico		Estadual Sistemas de rodízio e mistos (b)	Poço tubular Nascentes	Caracterização Valores de referência Avaliar tendências Subsidiar a gestão	1980/1990	
Canadá	Meio ambiente		Provincial Pontos fixos	Poços tubulares e nascentes	Monitorar áreas vulneráveis à poluição	1946	
Brasil (estado de São Paulo)	Agencia Ambiental e Secretaria Saúde	--	Estadual Pontos fixos	Poços tubulares e nascentes	Caracterização Subsidiar o abastecimento	1991	1980 (c)

(a) – estações de monitoramento são constituídas de vários poços próximos

(b) - sistema misto de monitoramento utiliza uma parte de pontos fixos, complementada por pontos aleatórios

(c) – o monitoramento de nível d'água foi executado na década de 1980 pelo DAEE

A Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do *Global Environment Monitoring System* (GEMS), publicou, em 2004, um manual operacional, descrevendo critérios e metodologias para o estabelecimento e operação de redes globais de monitoramento de qualidade das águas, incluindo as subterrâneas (GEMS, 2004). Este órgão, criado em 1972, tem o propósito de prover bases científicas sobre a avaliação da condição e das tendências da qualidade das águas doces para subsidiar o gerenciamento sustentável destes recursos, viabilizando, por meio de parcerias, a formulação e implantação de programas de capacitação para aquisição e gerenciamento de informações sobre a qualidade das águas em países em desenvolvimento, sendo o Brasil um país membro deste programa (GEMS, 2004).

Na Europa

Na Comunidade Européia, a Agência Ambiental Européia (EEA), por meio do Centro de Águas Interiores, produziu, em 1996, um relatório sobre os procedimentos e práticas adotados nos monitoramentos de águas subterrâneas realizados nos países membros, em atendimento às legislações nacionais e às diretivas européias (Koreimann *et al.*, 1996). De acordo com este relatório, o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas iniciou-se, na Europa, nas décadas de 1970 e 1980, com exceção da França que opera uma rede de qualidade desde 1902. O monitoramento da quantidade é mais tradicional, possuindo redes que datam de 1845. A área representada por 1 (um) ponto de amostragem variou entre 2 a 330 km² para qualidade e entre 0,14 a 250 km² para monitoramento da quantidade, demonstrando a necessidade de padronização de critérios entre os países membros. No mesmo ano de 1996, a EEA propôs o estabelecimento de uma rede de monitoramento, com base na adequação e integração das redes já existentes nos países membros (Nixon, 1996).

Esta proposta foi consolidada com a publicação, em 1998, pela Agência Ambiental Européia, dos critérios de implementação da EUROWARTERNET, que é uma rede de

monitoramento integrado da qualidade e quantidade das águas (Nixon *et al.*, 1998). As informações obtidas são armazenadas no banco de dados, denominado “Waterbase”, sendo a atualização realizada anualmente, com dados validados (Johannes Grath, informação pessoal).

Em 1999, a Comissão Econômica para a Europa elaborou um relatório sobre monitoramento e avaliação de águas subterrâneas, visando formular critérios para o estabelecimento de redes de monitoramento em aquíferos transfronteiriços, de forma, que os resultados possam ser comparáveis entre si (Uil *et al.*, 1999).

Em 22 de dezembro de 2000, entrou em vigor, na Comunidade Européia, a Diretiva das Águas 2000/60/EC (*Water Framework Directive*), que estabelece ações comunitárias no domínio da política de recursos hídricos para a proteção e melhora das condições da água. Esta Diretriz determina que programas de monitoramento de águas superficiais e subterrâneas, por bacias hidrográficas, devem estar em operação até 22 de dezembro de 2006, e que, até 2015, as águas devem estar classificadas como de “boas condições”.

A principal estratégia para implementação dessa Diretiva é a elaboração de documentos orientadores, detalhando tecnicamente os diversos assuntos técnicos versados. Assim, em 2001, foi publicado o manual “Aspectos Estatísticos da Identificação de Tendências de Poluição em Águas Subterrâneas” (Grath *et al.* 2001), e, em 2003, foi publicado o “Guia de Monitoramento de Qualidade e Quantidade de Águas Superficiais Interiores, Águas Costeiras e Águas Subterrâneas” (European Communities, 2003). Este último estabelece que, independente dos ajustes regionais, um programa de monitoramento deve:

- ter a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento;
- promover a integração entre os monitoramentos efetuados para os diferentes usos da água;
- considerar as inter-relações entre as águas superficiais e subterrâneas, bem como a integração dos aspectos quantitativos e qualitativos; e,
- possibilitar a detecção de alterações das condições de referência;
- possibilitar a detecção de todos os impactos potenciais na qualidade e na quantidade.

Atualmente, a Agência Ambiental Européia está realizando atividades de compatibilização dos critérios utilizados na Eurowaternet com os critérios da Diretiva 2000/60/EC (Johannes Grath, informação pessoal) e produzindo relatórios técnicos como, por exemplo, de implementação do monitoramento de quantidade (Marcuello e Menéndez, 2003) e de controle de qualidade dos dados a serem incluídos no Waterbase (Lack *et al.*, 2003).

A seguir, são apresentados os principais aspectos relativos ao monitoramento de águas subterrâneas em países da Europa, extraídos do levantamento efetuado por Koreimann *et al.* (1996). Cabe ressaltar que, segundo informações pessoais de Andreas Scheidleder, do *European Topic Centre on Water* (ETC/WTR), as condições de densidade de pontos de monitoramento, em 2004, não são muito diferentes daquelas de 1995.

Alemanha

A água subterrânea é responsável por 70% do abastecimento de água potável na Alemanha. O controle da qualidade e quantidade dessas águas é de atribuição dos estados, sendo que o órgão federal das águas (*Länderarbeitsgemeinschaft Wasser – LAWA*) é o responsável pela compilação geral dos dados. Instituições públicas e privadas também colaboram com a coleta de amostras e análises, seguindo Normas DIN e o guia de boas práticas laboratoriais.

No Estado da Bavária, o monitoramento de água subterrânea é desenvolvido pelo “*Bayrisches Landsamt für Wasser Wirtschaft*”, que é o órgão gestor e técnico das águas. O custo de operação da rede de quantidade do estado da Bavária está estimado em DM\$ 2.000.000 ao ano. Nos Estados de Nordrhein Westfalen e de Thuringen os órgãos ambientais estaduais coordenam o monitoramento regional.

As redes de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas, na Alemanha, datam da década de 1980 e as de quantidade têm seus primeiros registros na década de

1910. Estas redes visam caracterizar a condição da água subterrânea nas diferentes unidades aquíferas, estabelecer a relação com as águas superficiais e delimitar espacialmente os aquíferos, subsidiando as autoridades com informações sobre alterações a médio e longo prazo, para que estas possam tomar medidas de proteção e recuperação do recurso hídrico.

O Quadro 2 apresenta a densidade de pontos de monitoramento em alguns estados da Alemanha, que são, em sua maioria, constituídos por poços de monitoramento, havendo também alguns poços de abastecimento e nascentes. A frequência de coleta de amostras de água para análise de qualidade varia de uma a seis vezes ao ano. O nível d'água é mensurado com frequência semanal ou mensal. Em programas especiais, há o monitoramento contínuo do nível d'água e semanal de temperatura.

QUADRO 2 - DENSIDADE DE PONTOS DE MONITORAMENTO EM ALGUNS ESTADOS DA ALEMANHA, POR TIPO DE MONITORAMENTO

Tipos de Aquífero	Estados					
	Bavária 1 ponto a cada:		Nordrhein Westfalen 1 ponto a cada:		Thuringen 1 ponto a cada:	
	Tipos de monitoramento					
	Qualidade	Quantidade	Qualidade	Quantidade	Qualidade	Quantidade
porosos	237 km ²	18 km ²	7 km ²	0,4 km ²	225 km ²	--
cársticos	200 km ²	75 km ²	15 km ²	3 km ²	245 km ²	--
fraturados	289 km ²	63 km ²	54 km ²	167 km ²	--	--

-- não especificado

Modificado de KOREIMANN *et al.*

(1996)

Áustria

Na Áustria, o monitoramento de águas subterrâneas é efetuado em atendimento às leis federais (Act on Hydrology - Federal Law Gazette nº 58/1979 e Ordinance on Water Quality Monitoring – Federal Law Gazette nº 39/1991) e à legislação da Comunidade Européia para nitrato de origem agrícola (Nitrate Directive 91/676/EEC).

A Agência Ambiental Federal e o Ministério Federal de Agricultura e Floresta são responsáveis pela padronização do programa de monitoramento, armazenamento eletrônico de dados, avaliação dos resultados e divulgação de informações. As coletas de amostras e análises são realizadas por empresas contratadas, que seguem procedimentos operacionais padronizados, definidos em contrato.

O início do monitoramento de qualidade das águas subterrâneas, na Áustria, data de 1991 e tem os seguintes objetivos:

- atualizar continuamente as informações sobre a qualidade da água;
- identificar alterações dessa qualidade;
- identificar áreas com poluição das águas;
- supervisionar medidas de remediação;
- fornecer dados básicos para legisladores.

Os pontos de monitoramento são poços de uso industrial, comercial e residencial, assim distribuídos: 1600 pontos em aquíferos porosos (1 ponto para cada 10 km²) e 450 pontos em aquíferos cársticos (1 ponto a cada 50 km²). A maior parte destes poços é amostrada quatro vezes ao ano (trimestralmente), mas a escolha dos parâmetros e frequência de sua determinação é efetuada regionalmente, em função dos riscos de poluição e custos analíticos. Os parâmetros determinados são divididos em 3 grupos:

- (I) substâncias de caracterização geral das propriedades hidroquímicas ou situação de poluição (condutividade elétrica, pH, oxigênio dissolvido, nutrientes e carbono orgânico total e dissolvido)
- (II) metais pesados, hidrocarbonetos e substâncias halogenadas (AOX).
- (III) substâncias com relevância ecotoxicológica: pesticidas, benzeno e hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA's).

O monitoramento da quantidade é de atribuição do Escritório Central de Hidrologia, que opera uma rede desde 1930, constituída de 3.100 pontos de observação, sendo 290 equipados com instrumentos de medição contínua. A densidade é estimada em 30 pontos/100 km² para aquíferos porosos e 0,06 pontos/100 km² para aquíferos cársticos.

O nível d'água e a temperatura são mensurados semanalmente em poços de observação. Em nascentes, são mensuradas, também, a vazão, a condutividade elétrica e a turbidez. O controle da qualidade dos dados é feito pela comparação entre resultados de pontos de monitoramento vizinhos.

Dinamarca

Na Dinamarca, 99% da água potável provem do recurso hídrico subterrâneo. A coordenação do programa de monitoramento é de atribuição da Agência Ambiental, e os municípios são responsáveis pela coleta de amostras, interpretação dos dados e elaboração de relatórios. Além disso, os municípios são responsáveis também pelo monitoramento da qualidade da água de abastecimento, em relação aos padrões de potabilidade. Relatórios nacionais sobre a qualidade e quantidade das águas subterrâneas são elaborados a partir dos relatórios municipais e são comercializados pelo Serviço Geológico da Dinamarca.

O objetivo principal da rede de monitoramento de qualidade é verificar a condição da água subterrânea em relação ao uso do solo e fontes pontuais de poluição. A rede de monitoramento de qualidade é composta por 1.100 pontos de coleta distribuídos de forma a englobar os diferentes aspectos geológicos e hidrológicos do País. Aproximadamente 50% destes pontos são poços especialmente construídos para o propósito de monitoramento.

A frequência de amostragem varia entre 2 a 4 vezes por ano e são mensurados parâmetros descritivos como pH, dureza, temperatura, bem como íons maiores (cálcio, nitrato, amônia), metais (zinco, chumbo, cádmio e outros), hidrocarbonetos e pesticidas. Estes dois últimos são determinados a cada 2 anos. As análises são padronizadas e executadas por 15 diferentes laboratórios. Há inspeções e tomada de contraprovas para assegurar a qualidade dos dados.

Na Dinamarca, há também uma rede de monitoramento de nível d'água operando, mensalmente, desde 1950. Em 1995, esta rede era composta de 200 pontos de observação distribuídos em uma densidade 1 ponto de observação a cada 200 km².

Em complementação aos dados obtidos no monitoramento, todas as empresas de abastecimento, prefeituras e indústrias, que utilizam água subterrânea, enviam ao Serviço Geológico da Dinamarca, os registros sobre as taxas de bombeamento utilizadas. Estes dados são sumarizados e anualmente é publicado um relatório sobre o consumo de água subterrânea.

Espanha

Na Espanha, os aquíferos ocorrem em apenas 1/3 da área do país. Aquíferos porosos ocupam 79.258 km² (16% do território Nacional), aquíferos cársticos ocorrem em 54.628 km (11%) e outros aquíferos em 38.644 km² (8% do território nacional espanhol) e aproximadamente 25% da água consumida provém destes aquíferos.

A “Diretoria Geral de Qualidade das Águas”, que é um Departamento do Ministério de Serviços Públicos, Transporte e Meio Ambiente, e o Instituto de Tecnologia de Geominas da Espanha (ITGE), ligado ao Ministério da Indústria e Energia, são as duas organizações que dividem a responsabilidade pelo monitoramento de qualidade e quantidade de águas subterrâneas.

Um Plano Nacional de Gestão e Conservação de Aquíferos (PNGC) foi estabelecido para estudar a qualidade e quantidade da água subterrânea, bem como a monitorar e gerenciar a intrusão salina. A rede de monitoramento de qualidade é denominada “Red General de la Calidad y Red de Intrusion”. Há um controle de qualidade em todas as etapas do monitoramento, incluindo a padronização de metodologias de coleta e de análise. Há 1.147 pontos de amostragem em aquíferos porosos, 408 em meios cársticos e 1.377 em outros aquíferos isolados. A maioria destes pontos é destinada ao controle

da intrusão salina. Os dados obtidos desde 1971 estão disponíveis em meio eletrônico e em relatórios impressos.

A rede de monitoramento de quantidade é denominada “*Red de Control Piezométrico y Red de Hidrometria*”. Os primeiros registros datam de 1967. Em 1995, havia 6576 pontos de amostragem, constituídos por poços (de vários tipos) e nascentes. O nível d'água e as vazões são mensurados 2 a 6 vezes ao ano.

Finlândia

O Instituto de Meio Ambiente é o coordenador do programas de monitoramento de qualidade e quantidade e o gerenciador do Sistema de Informações. As Agências Ambientais Regionais são responsáveis pela manutenção da rede, coleta de amostras e parte das análises químicas. A rede de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas iniciou-se em 1974 e, em 1995, havia 50 pontos de monitoramento, na maioria formados por nascentes. Os principais objetivos da rede de monitoramento são:

- detectar variações na hidroquímica das águas subterrâneas
- detectar impactos antropogênicos na qualidade das águas
- coletar dados básicos para pesquisa.

As estações de amostragem são localizadas em áreas de diferentes tipos de solo e clima, onde a qualidade das águas subterrâneas não tem sido substancialmente afetada por distúrbios ambientais. A área representada por um ponto de coleta varia entre 0,2 a 3 km². Aproximadamente 30 parâmetros são determinados seis vezes ao ano. Em relação à quantidade, a rede de monitoramento é formada por 54 estações de monitoramento, constituídas por aproximadamente 10 poços de observação cada, sendo que, um destes poços é equipado para monitoramento contínuo. Estas estações são distribuídas em regiões de diferentes condições climáticas e pedológicas, bem como tipo de uso e ocupação do solo. O tamanho das áreas investigadas varia entre 0,2 a 3 km².

França

O monitoramento de qualidade das águas subterrâneas na França iniciou-se em 1902 e, em atendimento à Diretiva Europeia de Potabilidade, foi implementado um programa nacional de monitoramento, denominado *Observatoire National de la Qualité des Eaus Souterraines* (ONQES), que é uma composição de muitas redes de bacias hidrográficas ou locais. Mais de 200 instituições estão envolvidas na amostragem e análise da qualidade destas águas, sob coordenação do Departamento de Águas do Ministério do Meio Ambiente. O Ministério de Assuntos Sociais e Integração é responsável pela padronização dos procedimentos analíticos, que devem ser comparáveis entre si, nas diversas redes de monitoramento. O Serviço de Pesquisa Geológica e Mineraria (BRGM do francês *Bureau de Recherche Geologique et Miniere*) é o responsável pelo gerenciamento das informações e interpretação estatística dos dados, que podem ser obtidos gratuitamente.

Os principais objetivos do monitoramento efetuado na França são: (i) facilitar a aplicação de políticas de gestão; (ii) assegurar as melhores ações das agências de bacia; (iii) detectar variações nas características das águas; e (iv) monitorar a qualidade da água distribuída às populações.

Os pontos de coleta são basicamente constituídos por poços tubulares de abastecimento, localizados em diferentes tipos de aquíferos. A frequência de amostragem varia entre 0,5 e 4 vezes ao ano e os parâmetros determinados são listados em um decreto do Ministério da Saúde, o qual descreve os limites de detecção e os métodos analíticos.

Em relação ao monitoramento de quantidade das águas subterrâneas, o órgão denominado *Direction Régionale de l'Environnement* realizou um inventário das redes locais existentes para compor uma rede nacional, demonstrando a existência de cerca de 1.500 piezômetros que poderiam ser utilizados para medição do nível d'água. Alerta, entretanto, que este número vem caindo, principalmente em função dos custos de coleta de dados e que a automação da medição não se mostrou tão eficiente como era o esperado.

Holanda

A Holanda é um país densamente povoado e muito industrializado, sendo o uso agrícola do solo um dos mais intensos no mundo, com uma carga anual de 260 kg de fertilizantes nitrogenados por hectare, o que tem ocasionado poluição das águas subterrâneas, especialmente em regiões de solos arenosos, já que em 90% do País, o nível da água subterrânea está a menos de 4 metros de profundidade e seu principal uso é para o setor industrial, seguido do residencial.

As redes de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas começaram a ser instaladas no início dos anos 1980 e são operadas pelo Instituto Nacional de Saúde Pública e Proteção ao Meio Ambiente (RIVM), com os seguintes objetivos:

- diagnosticar a qualidade ambiental, em função do uso do solo e das condições hidrogeológicas, subsidiando a política ambiental e a elaboração de legislações;
- aumentar o conhecimento no campo ambiental;
- detectar alterações da qualidade influenciadas por atividades humanas; e,
- avaliar a eficácia das ações corretivas.

Apesar da rede nacional prover dados gerais de qualidade, foram também estabelecidas, desde 1993, redes provinciais para atender a programas especiais de monitoramento. O RIVM centraliza os dados gerados nestes programas.

A rede nacional de monitoramento de qualidade é composta de 380 poços, perfurados especialmente para o monitoramento, distribuídos com uma densidade aproximada de 1 poço a cada 100 km², considerando o tipo e o uso e ocupação do solo. As coletas de amostras e análises são realizadas anualmente. Os controles de qualidade seguem os procedimentos padronizados, desde a perfuração dos poços até a apresentação dos resultados, quando são publicados relatórios anuais com a caracterização e mapeamento da qualidade das águas subterrâneas. O acesso aos dados é gratuito, mas há restrições de disponibilidade.

Em relação ao monitoramento de quantidade, destaca-se que os primeiros registros de nível d'água datam de 1870. Em 1995, a rede contava com 30.000 poços de observação.

A base legal deste monitoramento é a Lei de Gerenciamento de Água, que requer do órgão gestor, a indicação de como a água, de uma certa região, será utilizada e protegida e define os objetivos do monitoramento, a identificação dos usos potenciais, a projeção de cenários de uso, a proposição de medidas de gerenciamento e a avaliação das ações de gerenciamento da água.

Em relação à quantidade, a coordenação do monitoramento é de responsabilidade do Ministério do Transporte, Trabalhos Públicos e Gerenciamento da Água. As Autoridades Provinciais são responsáveis pela coleta de dados e o Instituto de Geociência Aplicada (TNO) coopera com estas organizações, armazenando os dados e desenvolvendo um programa de controle de qualidade, de forma a assegurar a confiabilidade nos dados obtidos pelos diferentes órgãos.

Inglaterra e País de Gales

A Autoridade Nacional de Águas (NRA do inglês *National Rivers Authority*) é o órgão responsável pela avaliação e gerenciamento do monitoramento de qualidade e quantidade de águas subterrâneas. A atuação é efetuada de forma conjunta com o órgão gestor de águas e as diversas companhias de abastecimento de água colaboram na coleta de dados.

A rede de monitoramento de água subterrânea, que é operada em atendimento à Lei de Recursos Hídricos de 1991 (*Water Resources Act, Section 84*), à Lei de Proteção Ambiental de 1991, ao Regulamento para Abastecimento Privado de 1991 (*Private Water Supply Regulation*), à Diretriz Européia de Potabilidade e à Diretriz Européia para Nitrato de origem agrícola, tem os seguintes objetivos:

- identificar tendências de alterações no regime hídrico e de qualidade, causada por eventos naturais ou por fontes de poluição difusa;
- estabelecer referências de qualidade para detectar futuros impactos;
- mapear tridimensionalmente a qualidade da água subterrânea;
- estabelecer sistema de alerta em áreas de recarga, contra fontes difusas de poluição, identificando zonas de vulnerabilidade ao nitrato.

Para avaliação da quantidade, há cerca 5.400 pontos de monitoramento, sendo na maioria, poços de diversos usos. As medições de nível d'água são realizadas por empresas contratadas, com frequências que variam de 2 a 12 vezes ao ano, sendo que 2 a 3% destas medições são auditadas pelo NRA. Em alguns poços há equipamentos automáticos de medição, com dados mensurados semanalmente.

Irlanda do Norte

Na Irlanda do Norte, o Serviço de Patrimônio e Meio Ambiente (EHS) é o responsável pelo monitoramento da água subterrânea, por meio de uma rede constituída de poços e nascentes. Este monitoramento visa o estabelecimento de valores de referências tanto da quantidade como da qualidade (Environmental and Heritage Service, 2000).

Em 1992, o EHS contratou o Serviço Geológico Britânico (BGS) para realizar um estudo de reconhecimento das águas subterrâneas, visando o estabelecimento de uma rede de monitoramento de quantidade e qualidade. Inicialmente, foram investigados 759 poços quanto ao diâmetro, profundidade e nível d'água, sendo que em 351 destes poços, foram coletadas amostras de água para análises químicas. Finalmente, selecionaram-se 109 para compor a rede, com base em sua distribuição geográfica e geológica. Deste trabalho, resultaram mapas hidrogeológico, hidroquímico e de vulnerabilidade, publicados em 1994. Em 2000, foi finalizada uma política para a proteção de águas subterrâneas, sendo o programa de monitoramento de quantidade e qualidade considerado uma ferramenta essencial.

Com a promulgação da Diretiva Européia de Águas, em 2000, a rede de monitoramento que atendia às recomendações da Diretiva de Nitrato, foi reavaliada e foram propostos 79 pontos de monitoramento de águas subterrâneas. Duas séries de parâmetros são propostas, uma para o monitoramento com frequência trimestral e outra para frequência anual, conforme apresentado no Quadro 3.

QUADRO 3 – PARÂMETROS A SEREM DETERMINADOS EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM NA IRLANDA DO NORTE

Parâmetros com frequência trimestral	Parâmetros com frequência anual	
Nível estático	Alumínio	Sílica
Temperatura	Antimônio	Tálio
Alcalinidade	Arsênio	Telúrio
Oxigênio dissolvido	Bário	Titânio
Condutividade elétrica	Berílio	Urânio
pH	Boro	Vanádio
Eh – potencial redox	Cádmio	Zinco
Bicarbonatos	Cobalto	Dureza total
Cálcio	Cobre	Benzeno
Cloreto	Cromo	Tolueno
Ferro dissolvido	Chumbo	Xilenos
Manganês dissolvido	Cianeto	MTBE ⁽¹⁾
magnésio	Fluoreto	Triálometanos
Nitrato	Fósforo	Tetraclorometano
Potássio	Mercúrio	Tricloroeteno
Sulfato	Molibdênio	Tetracloroeteno
Carbono Orgânico total	Níquel	Fenol
Coliformes totais	Nitrito	HPA totais ⁽²⁾
Contagem de colônias viáveis	Prata	Hidrocarbonetos dissolvidos
	Selênio	

(1) Metil Terci Butil Eter (2) Hidrocarbonetos Poliaromáticos

Itália

Um dos principais objetivos das redes de monitoramento existentes na Itália é o controle da qualidade da água para abastecimento. Desta forma, as redes de monitoramento são operadas pelas unidades locais de saúde e pelos serviços de abastecimento das 19 regiões administrativas da Itália. Conseqüentemente, centenas de diferentes organizações têm seus próprios sistemas de monitoramento, cujos resultados não são comparáveis entre si. Em relação à quantidade, as redes de monitoramento são operadas regionalmente pelos serviços de abastecimento, mensurando, apenas, dados de nível d'água.

O Ministério do Meio Ambiente, em conjunto com o Sistema Italiano de Informações Ambientais, estão implementando uma rede de monitoramento ambiental, na qual na distribuição dos pontos de monitoramento serão considerados a extensão dos principais aquíferos a densidade populacional e o uso do solo.

Noruega

Na Noruega, em 1995, havia aproximadamente 80.000 poços de abastecimento, sendo que são perfurados anualmente 4.000 novos poços. A maioria destes poços é utilizada em fazendas ou locais com pequena concentração populacional.

O Serviço Geológico da Noruega (NGU) e a Administração Norueguesa de Recursos Hídricos e Energia (NVE) estabeleceram, em 1977, uma rede nacional de monitoramento da qualidade e quantidade das águas subterrâneas, referenciada como "*Landsomfattende Grunnvannsnnet* (LGN)". Esta rede era composta, em 1995, por 38 pontos de monitoramento, distribuídos em todo o território nacional. Em relação à quantidade, o objetivo é a aquisição de informações para subsidiar o gerenciamento do abastecimento.

A responsabilidade pelas análises laboratoriais e pelo gerenciamento do banco de dados é do Serviço Geológico. A frequência de amostragem para determinação de parâmetros de qualidade varia entre uma a duas vezes ao ano e o nível d'água e a temperatura são medidos de 2 a 4 vezes ao mês e relatórios são publicados anualmente.

Outro programa de monitoramento de qualidade existente é executado pelas autoridades estaduais de controle de poluição (SFT), visando identificar a acidificação das águas subterrâneas em função da deposição atmosférica de poluentes.

Portugal

Aproximadamente 70% do suprimento de água em Portugal provém do recurso hídrico subterrâneo. O principal uso da água subterrânea é na agricultura, seguido do residencial e industrial.

O Ministério do Meio Ambiente é o coordenador geral de todas as atividades de monitoramento de água subterrânea. O Instituto de Águas (INAG) e as Direções Regionais do Ambiente e Recursos Naturais (DRARN's) colaboram nos programas de monitoramento. O INAG publica os relatórios de qualidade de águas subterrâneas. Em alguns casos, a

Administração Regional da Saúde (ARS) também executa o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

Na região de Lisboa e Vale do Tejo, uma rede de monitoramento foi estabelecida em 1977, com 28 pontos de observação, para controlar a intrusão salina. Em 1985, esta rede foi ampliada com 46 novos pontos de observação, para obtenção de informações gerais sobre a qualidade da água subterrânea, principalmente em relação ao nitrato. As amostras são coletadas de uma a quatro vezes ao ano e analisadas em laboratórios públicos.

O monitoramento da quantidade de águas subterrâneas, em operação desde 1970, tem o objetivo de subsidiar o gerenciamento deste recurso, por meio da identificação dos usos da água e da caracterização da recarga natural, influenciada pela ocupação do solo. A rede é formada por aproximadamente 480 pontos de monitoramento (poços e nascentes) localizados em meios porosos e por 143 em aquíferos cársticos. O nível d'água e as vazões são monitorados com frequências mensais a semestrais e há também monitoramento à distância por sonda elétrica.

República da Irlanda

O uso da água subterrânea na República da Irlanda, em ordem decrescente de consumo, é residencial, industrial e agrícola. O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas neste país é executado pela Agência de Proteção Ambiental (EPA), em colaboração com autoridades locais, havendo três tipos de monitoramento:

- I) rede de monitoramento básica: executado pela EPA, busca avaliar a qualidade das águas subterrâneas, determinar tendências e investigar as causas de qualquer alteração. Os 293 pontos de monitoramento são distribuídos em 70.000 km² em função da hidrogeologia e a coleta é efetuada duas vezes ao ano;
- II) monitoramento da água utilizada para abastecimento: é executado pelas autoridades locais que enviam os resultados à EPA, para análise estatística e publicação de relatórios; e

III) monitoramento de fontes potenciais de poluição: de responsabilidade dos empreendedores.

O Setor de Água Subterrânea do Serviço Geológico da República da Irlanda executa, desde 1974, o monitoramento do nível d'água em 22 poços e nascentes localizados em 6 regiões aquíferas, com medições mensais.

Suécia

Mais de $\frac{3}{4}$ da população da Suécia é abastecida com água proveniente de aquíferos glaci-fluviais, que apresentam reduzida extensão espacial. Outros aquíferos cobrem 75% do território nacional, mas suas produtividades não atendem o abastecimento público.

O Serviço Geológico Sueco, financiado pelos Ministérios da Indústria e do Meio Ambiente, é o responsável pelas redes de monitoramento de qualidade e de quantidade das águas subterrâneas em escala nacional. Com os dados obtidos, são elaborados relatórios que são enviados para a Agência de Proteção Ambiental. Os dados de qualidade e quantidade são comercializados ao público interessado.

Os principais objetivos da rede de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas na Suécia são:

- descrever as condições ambientais e detectar alterações causadas pelas atividades humanas (acidificação, eutrofização, metais pesados, etc); e
- avaliar o risco de atividades humanas, visando a formulação de metas ambientais.

De forma geral, há dois pontos de monitoramento em cada uma das 27 províncias geológicas. As análises são realizadas em dois laboratórios estatais. A coleta e as análises de amostras seguem procedimentos padronizados e há controle de qualidade dos resultados obtidos, incluindo o controle do balanço iônico. Os poços de monitoramento são construídos em polietileno, os equipamentos de coleta são de material inerte. Para metais, os frascos são lavados com ácido forte. As amostras são filtradas (0,45 μ m) antes da preservação com ácido. Os dados de qualidade das águas subterrâneas, obtidos

desde 1979, são comercializados. Além disso, o Serviço Geológico publica relatórios anuais com a interpretação destes dados.

O monitoramento de quantidade das águas subterrâneas, em operação desde 1959, visa estudar as variações regionais e temporais, em relação à geologia, topografia e clima. Existem cerca de 360 pontos de monitoramento de nível d'água e de temperatura em aquíferos porosos, sendo a maior parte destes constituída de poços dedicados. As observações são feitas manualmente e os resultados enviados por correio eletrônico ou telefone para o Serviço Geológico.

Na América do Norte

Na América do Norte, existe uma tendência de integração entre as diferentes instituições estaduais ou provinciais que executam monitoramentos de águas subterrâneas, bem como um esforço na esfera federal, em compilar e interpretar as informações regionais em bancos de dados centralizados, mas disponibilizados aos participantes dos programas de monitoramento.

Estados Unidos

Nos Estados Unidos, segundo a Agência de Proteção Ambiental (USEPA), o principal uso da água subterrânea é para irrigação (63%) seguido do abastecimento público (20%). Cerca de 46% da população americana é abastecida com água subterrânea e essa porcentagem cresce para 99% se for considerada apenas a população rural (USEPA, 2000).

A água subterrânea no estado de Idaho abastece 90% da população e fornece 60% da água de irrigação (USEPA, 2000). No Texas, contribui para 58% do volume total da água consumida no estado (Texas, 2003). Em Nebraska, abastece 85% da população e existem 95.000 poços utilizados para irrigação (Nebraska, 2003). No estado de Kentucky,

a água subterrânea representa 30% do abastecimento público e 90% do abastecimento rural (Fischer e Goodmann, 2002). Na Carolina do Sul, abastece 40% da população (South Caroline, 2004) e na Pensilvânia, 50% da população (USEPA, 2000).

Na Califórnia, a água subterrânea é responsável por 40% do abastecimento público, por meio de captação em cerca de 16.000 poços tubulares. Desde a década de 1980, mais de 8.000 poços já foram desativados por contaminação, onde o MtBE, as substâncias cloradas e as “substâncias emergentes” são os principais contaminantes. Substâncias emergentes são aquelas sintetizadas recentemente, das quais se têm poucas informações toxicológicas e de comportamento no meio ambiente (Califórnia, 2003).

O monitoramento de qualidade das águas subterrâneas, nos Estados Unidos, teve início nas décadas de 1980 e 1990, em atendimento as legislações estaduais, que além de determinar os objetivos, atribuem responsabilidades e definem o montante dos recursos financeiros disponíveis (Kentucky, 2000; Idaho, 2001; Texas, 2003; Califórnia, 2003; Wisconsin, 2004).

A Lei Federal *Clean Water Act*, de 1996, em sua seção 305(b), estabelece a necessidade de monitoramento das águas subterrâneas para determinar se o recurso hídrico atende aos critérios e padrões estabelecidos para os diferentes usos. (USEPA, 2000). Em atendimento a esta Lei, os estados Americanos enviam relatórios bianuais com os dados de monitoramento das águas subterrâneas para a Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA) que publica, periodicamente, um relatório sumarizando os dados recebidos. Em 2000 foi publicada a compilação dos relatórios apresentados em 1998 por 41 estados (USEPA, 2000), destacando-se as seguintes conclusões:

- uma avaliação representativa do recurso hídrico subterrâneo depende de um monitoramento bem planejado e bem executado, com critérios bem definidos;
- a abrangência do monitoramento, em número de pontos de amostragem, deve ser aumentada, dependendo da disponibilidade de recursos financeiros;
- há necessidade de maior integração entre as diversas instituições estaduais e federais, incluindo as que monitoram fontes potenciais de poluição;

- o principal indicador de contaminação é o nitrato, cuja presença em concentrações superiores às consideradas como de referência de qualidade é um indício de impacto antrópico na qualidade das águas subterrâneas;
- a presença de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis na água subterrânea também é um indicador definitivo de contaminação por fontes antrópicas; mesmo se os dados disponíveis são limitados, a simples presença destes contaminantes é uma séria preocupação; e
- na maioria dos estados, a seleção de pontos de amostragem é realizada em sistema de rodízio, de forma que, a cada ano, novos poços em diferentes aquíferos ou bacias hidrográficas são amostrados (USEPA, 2000).

Segundo Bolton (1996), Idaho (2001) e Illinois (2004), a coordenação do monitoramento de águas subterrâneas é de atribuição dos órgãos ambientais estaduais e dos departamentos de recursos hídricos, em conjunto com os serviços geológicos. Os departamentos de saúde e de agricultura, também participam do monitoramento, gerando informações que são agregadas em banco de dados centrais, quase sempre associados a um sistema de informação georeferenciado.

Nos estados onde as atividades de monitoramento são executadas por muitos órgãos, são criados comitês interagências ou forças tarefas, com atribuição de integrar os programas existentes, de forma a minimizar custos; propor medidas para aumentar a integração entre os órgãos envolvidos, aumentando a eficiência do monitoramento; projetar banco de dados para armazenamento de informações; estimar os recursos financeiros necessários; e disponibilizar as informações.

Os principais objetivos do monitoramento de águas subterrâneas em operação nos Estados Unidos são:

- caracterizar a qualidade das águas subterrâneas
- identificar as características hidrogeológicas dos aquíferos;
- estabelecer valores de referência;
- obter informações sobre a disponibilidade potencial do recurso hídrico;
- avaliar a condição do corpo hídrico subterrâneo (quantidade e qualidade);
- avaliar as respostas dos aquíferos à sazonalidade climática;

- monitorar a intrusão salina;
- identificar as tendências de alteração de qualidade e quantidade;
- identificar áreas com problemas potenciais
- monitorar fontes difusas de poluição;
- projetar as condições futuras de disponibilidade para planejamento de abastecimento público;
- subsidiar elaboração de planos de qualidade das águas;
- subsidiar tomada de ações; e
- avaliar a eficácia das ações de longo termo dos programas de proteção das águas subterrâneas.

O monitoramento é gerenciado por bacias hidrográficas (West Virginia, 2004) e alguns aquíferos são priorizados em função de sua produção, da vulnerabilidade (Iowa, 2004), do número de poços de abastecimento existentes, e dos usos e ocupação do solo (Belitz *et al.*, 2004).

Para a coleta de amostras, utilizam-se pontos fixos e/ou pontos escolhidos aleatoriamente (New Jersey, 2004). A razão da existência de pontos fixos de amostragem é a necessidade de avaliar as tendências temporais em um mesmo local. Por outro lado, a justificativa de utilizar poços aleatórios é a necessidade de aumentar a distribuição espacial do monitoramento.

Por razões econômicas, os pontos de monitoramento são constituídos principalmente por nascentes e poços tubulares de abastecimento público. Em Iowa, selecionam-se poços, preferencialmente, com menos de 60 metros de profundidade (Iowa, 2004). Existem, também, pontos exclusivos para monitoramento, como por exemplo, no estado de Dakota do Sul, onde a rede é composta de poços instalados especialmente para a avaliação da qualidade das águas dos aquíferos rasos (South Dakota, 2004) e em Montana, a rede de monitoramento de nível d'água do é composta por 30% de poços dedicados ou desativados e o restante são poços domésticos com pouca utilização (Patton, 2004).

Alguns pontos são amostrados em todas as campanhas, mas comumente, utiliza-se um sistema de rodízio, no qual, a cada ano monitora-se uma bacia ou grupo de bacias

(Idaho, 2001; Texas, 2003). O período compreendido entre o monitoramento de uma bacia hidrográfica até esta bacia ser monitorada novamente é denominado de ciclo do monitoramento, que pode ser de 4, 5 ou 10 anos.

O número de pontos de monitoramento e a frequência de amostragem variam bastante de estado para estado. Em Idaho, 100 pontos são monitorados anualmente e outros 400, a cada 5 anos (Idaho, 2001). Em Illinois, a rede é constituída por 362 poços de abastecimento público, randomicamente estratificados, em função das características hidrogeológicas e da profundidade, sendo bianual a frequência de amostragem, por razões financeiras (Illinois, 2004). No Estado de Maryland, a rede é composta por 100 pontos de monitoramento, sendo que 20 são amostrados anualmente e 80 a cada cinco anos (Bolton, 1996). Em Ohio, a rede é composta de 212 poços, sendo 181 de abastecimento público (Ohio, 2004). No estado de Nebraska, são monitorados 570 poços de abastecimento público. Destes, cerca de 150 apresentam concentrações de nitrato acima de 5 mg/L e, por isto, são amostrados trimestralmente. Os demais são amostrados anualmente.

No Texas, há um número de pontos de monitoramento significativamente maior, sendo que, em 2003, foram amostrados 671 poços, em 5 das 21 formações aquíferas priorizadas. Há um sistema de rodízio, de forma que estes poços somente serão amostrados novamente, depois de cinco anos.

Os parâmetros determinados ou mensurados são, além daqueles destinados à caracterização natural da água, os indicadores de contaminação, metais, compostos orgânicos voláteis, pesticidas e, em alguns estados, analisa-se também alguns radionuclídeos. Nem sempre todos os parâmetros são determinados em todos os pontos de monitoramento, havendo seleção em função do histórico de uso e ocupação do solo. Pelos resultados dos monitoramentos estaduais, o nitrato, as substâncias orgânicas voláteis, os pesticidas e as substâncias emergentes tem sido os principais contaminantes nas águas subterrâneas.

Percebe-se um esforço de integração dos dados obtidos por diversos órgãos e para diversas finalidades, incluindo aqueles gerados na avaliação da potabilidade, realizada pelos órgãos de saúde, bem como aqueles gerados nas investigações de áreas

contaminadas. A freqüente participação dos órgãos de agricultura também deve ser destacada.

Em Wiscosin, estima-se um custo de USD\$ 600.000,00 a serem gastos em 3 a 5 anos, na rede de nível d'água, incluindo a perfuração de poços tubulares de monitoramento e aquisição de equipamentos de telemetria. Neste estado, o custo anual das análises de qualidade chega a USD\$ 100.000,00 (Wisconsin, 2004). Em Iowa, a Assembléia Legislativa aprovou, para o ano fiscal de 2002, uma verba de 2,5 milhões de dólares para a operação da rede de monitoramento do recurso hídrico subterrâneo (Iowa, 2004). No estado da Califórnia, o monitoramento da qualidade de águas subterrâneas tem verba de 1 milhão de dólares ao ano (Califórnia, 2003).

Além do monitoramento convencional, alguns estados têm programas especiais de monitoramento. No Estado de Iowa, está sendo implantada uma rede de monitoramento visando definir valores de referência de qualidade e quantidade dos aquíferos daquele estado. A meta é operar cerca de 180 poços tubulares de monitoramento em 60 estações de monitoramento, ou seja, cada estação de monitoramento é formada por dois ou mais poços localizados próximos um dos outros, mas com profundidades diferentes. A cada ano, duas a cinco estações de monitoramento serão instaladas.

Na Califórnia, há um programa de monitoramento denominado GAMA - *Groundwater Ambient Monitoring and Assessment*, desenvolvido em função da preocupação com a detecção de MtBE e solventes clorados em poços de abastecimento. Segundo Moran *et al.* (2004) o Programa GAMA utiliza técnicas avançadas de datação e detecção de substâncias orgânicas voláteis (VOC's) em ultra-baixas concentrações nas águas subterrâneas para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos profundos. Neste programa, o tetracloroetileno foi detectado em 49% dos poços em aquíferos semi-confinados na região de *Central Valley*.

No estado da Flórida, além do monitoramento estadual, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), em cooperação como o Departamento Estadual de Agricultura e Serviços ao Consumidor (DACs) desenvolveram uma rede de monitoramento de longo termo de aquíferos rasos para monitorar a qualidade das águas subterrâneas em áreas

agrícolas. Este monitoramento visa ocupar o espaço existente entre os monitoramentos de escala local (de curtos períodos, exigidos para licenciamento de pesticidas) e os de aquíferos profundos (operados em escala estadual), servindo como uma rede de alerta contra contaminações do recurso hídrico subterrâneo de origem agrícola e subsidiando a elaboração de implantação de melhores práticas agrícolas, como forma de diminuir a aporte de contaminantes nas águas subterrâneas. A área piloto para implantação desta rede foi uma região produtora de frutas cítricas (United State Geological Survey, 2000).

Canadá

No Canadá, o Setor de Ciências da Terra (ESS, do Inglês *Earth Science Sector*), subordinado ao Ministério de Recursos Naturais, desenvolve o Programa de Águas Subterrâneas, que visa mapear e estudar os principais aquíferos do país, avaliando a condição de qualidade e quantidade do recurso hídrico subterrâneo, sua dinâmica e vulnerabilidade, estruturar o sistema nacional de informações e divulgar os dados, de forma a subsidiar o governo federal, as agências de bacia e usuários deste recurso, na tomada de decisões de gerenciamento. Em 2001, foi constituído o Comitê Ad-hoc Canadense de Águas Subterrâneas, com a missão de promover uma estratégia nacional de integração das entidades gestoras e usuárias das águas subterrâneas. Um dos produtos deste Comitê é o relatório intitulado *the Canadian Framework for Collaboration on Groundwater* (Natural Resources Canada, 2004).

Província de Ontário

A água subterrânea é a principal fonte de abastecimento para a agricultura, comércio, indústrias e abastecimento público na Província de Ontário, além de ser essencial para a vida aquática nos corpos de águas superficiais (Ministry of Environment, 2001).

Em 1995, o Ministério do Meio Ambiente da província de Ontário (MOE) realizou um levantamento sobre os programas de monitoramento existentes, concluindo que: (1) os diversos monitoramentos existentes entre 1946 e 1979 tinham como objetivo mensurar

as flutuações de nível d'água e identificar rebaixamentos provocados pelos bombeamentos nos sistemas de abastecimento de água; (2) de modo geral, o monitoramento de qualidade era conduzido como parte de uma avaliação específica caso a caso; e (3) havia a necessidade de informações sistematizadas, associadas a um banco de dados, para a caracterização da localização, qualidade e capacidade sustentável dos recursos, descrevendo onde, como e por que o recurso estava sendo alterado, bem como subsidiar medidas de proteção e recuperação.

Segundo (Ministry of Environment, 2001), uma rede de monitoramento, estrategicamente distribuída na Província, pode fornecer estas informações e o projeto da rede de monitoramento deve ser flexível e ajustado às condições geológicas regionais, de uso e ocupação do solo e das demandas atuais e futuras de água. Além disso, o sucesso do programa depende da cooperação entre os diversos órgãos federais, provinciais e municipais, agências de bacia, universidades, indústrias e o público em geral, maximizando informações e minimizando custos.

O estabelecimento de um banco de dados geral deve envolver a síntese de dados já existentes em outros bancos, bem como a coleta de novos dados. Informações relacionadas à qualidade e à quantidade dos recursos hídricos são disponíveis em várias formas, tanto no setor público como no privado, como por exemplo:

- cadastro de poços do Ministério de Meio Ambiente (WWIS)
- programa de monitoramento da potabilidade (DWSP)
- rede provincial de monitoramento de qualidade (PWQMN)
- programas municipais de abastecimento de água
- trabalhos sobre remediação de áreas contaminadas
- estudos de avaliação de Impactos
- plano diretor de gerenciamento de resíduos e monitoramento de aterros
- outorgas de perfuração de poços e uso de água para abastecimento
- resultados bacteriológicos e análises químicas de amostras coletadas pelo Ministério da Saúde.
- informações obtidas pelo Ministério de Assuntos Municipais e Habitação na urbanização de locais.

Para a qualidade, o requerimento mínimo é a determinação de parâmetros convencionais e alguns metais selecionados. Adicionalmente, pesticidas devem ser determinados em áreas agricultura intensiva e compostos orgânicos voláteis em áreas urbanas. Como a coleta de amostras é feita por diferentes agentes, é necessário um rígido protocolo de controle de qualidade, na forma de um Guia de Campo para uniformização dos procedimentos. Para evitar erros de digitação, os resultados laboratoriais devem ser enviados eletronicamente para o banco de dados.

Segundo (Grey Sauble Conservation Authority, 2004) em 2001, foi aprovada uma verba de seis milhões de dólares Canadenses para ser utilizada no estabelecimento de uma rede provincial de monitoramento de águas subterrâneas em Ontário. Nesta província, a rede de monitoramento iniciou-se na região Sul, onde se concentram 90% dos poços perfurados. Para o projeto de rede de monitoramento, foi realizado, inicialmente, um extenso levantamento de mapas hidrogeológicos e de informações básicas no cadastro de poços, com o objetivo de priorizar aquíferos, em função de sua importância em termos de tipo, capacidade específica, vulnerabilidade à poluição e uso da água, com os seguintes procedimentos:

- a) os poços cadastrados, independentemente do aquífero explorado, foram plotados em mapas hidrogeológicos específicos ;
- b) o número e a porcentagem de poços em cada formação aquífera foram estimados, sendo que as formações com menos de 5% dos poços foram consideradas “não significativas”;
- c) as capacidades específicas dos poços foram calculadas ;
- d) os mapas com a localização dos poços e suas capacidades específicas, em L/min/m, foram elaborados , com a seguinte classificação:
 - < 5 (mínima produção)
 - 5 – 25 (produção abaixo da média)
 - 25 – 50 (produção média)
 - > 50 (produção acima da média);
- e) as seções geológicas foram preparadas com base nos perfis litológicos; e
- f) as áreas foram classificadas segundo sua vulnerabilidade, com os índices alta, média e baixa suscetibilidade à poluição das águas subterrâneas.

As áreas priorizadas para monitoramento da água subterrânea foram aquelas com alta vulnerabilidade e poços com produções media e acima da média. Além disso, recomendou-se monitorar também aquelas áreas com média vulnerabilidade e poços com produções media e acima da média. As áreas com média vulnerabilidade e poços com produções abaixo da média foram consideradas opcionais para monitoramento, dependendo dos recursos disponíveis.

Na América Latina

Na América Latina, a Organização Internacional de Energia Atômica (OIEA) por meio do Acordo Regional de Cooperação para a Promoção da Ciência e Tecnologia Nucleares na América Latina e Caribe (ARCAL) tem coordenado estudos de caracterização da qualidade e da quantidade dos aquíferos, por meio de técnicas isotópicas e convencionais, visando de subsidiar o gerenciamento do recurso hídrico. Entre 1997 e 2000, foi desenvolvido o projeto RLA/8/023 – “Caracterização de aquíferos para a gestão sustentável em áreas urbanas”, do qual participaram Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Cuba, Equador, México, Nicarágua, Panamá, Peru e Venezuela. A coordenação, no Brasil, coube ao Centro Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) de Belo Horizonte, MG. Entretanto, segundo (Conselho Nacional de Energia Nuclear, 2000), as dificuldades técnicas para realização de amostragem nos piezômetros instalados na área de estudo levaram o Brasil a abandonar o projeto em 1999.

O Banco Mundial, por meio do Fundo para o Meio Ambiente Mundial (FMAM) (ou GEF, do inglês *Global Environment Facility*), tem financiado projetos regionais na América Latina, devendo ser destacado o de “Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani”, coordenado pela Organização dos Estados Americanos (OEA). O objetivo é apoiar a Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai na elaboração e implementação coordenada de uma proposta comum de modelo institucional, legal e técnico, para o gerenciamento do Sistema Aquífero Guarani (Agência Nacional de Águas, 2005). Este projeto e terá, entre outros, os seguintes produtos:

- redes de monitoramento planejadas e coordenadas entre os quatro países para o controle conjunto do comportamento do sistema;
- sistema de Informação sobre o Sistema Aquífero Guarani (SISAG), institucionalizado e funcionando nos quatro países, com bancos de dados, protocolos estabelecidos e formas de comunicação e acesso definidas e ativas para a difusão dos conhecimentos;
- melhor conhecimento dos usos atuais e futuros da água do aquífero, devidamente localizados e caracterizados, quanto aos seus possíveis impactos negativos sobre a disponibilidade e qualidade das águas, delimitação de áreas vulneráveis e críticas, e suas características; e
- fortalecimento das capacidades institucionais e melhor intercâmbio entre instituições similares inter e entre países, com a participação de comunidades e organizações chaves envolvidas.

Brasil

No Brasil, o Banco Mundial financia, também, o Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA), coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, que tem o objetivo de atuar na melhoria da qualidade ambiental, por meio do incentivo à gestão integrada dos recursos naturais e do fortalecimento das instituições que compõem o Sistema Nacional do Meio Ambiente (Ministério do Meio Ambiente, 2004). A segunda fase deste programa (PNMA II), está estruturada em dois componentes: (i) **Gestão Integrada de Ativos Ambientais**, que estimula práticas sustentáveis e de gestão integrada dos recursos ambientais no País; e (ii) **Desenvolvimento Institucional**, que tem como subcomponente, o “Monitoramento da Qualidade da Água”, concebido com os objetivos gerais de: (a) contribuir para eliminar a fragmentação institucional, incentivando a parceria e a cooperação técnica entre entidades de meio ambiente e gestoras de recursos hídricos; e (b) ampliar e fortalecer a operação de rede de monitoramento da qualidade das águas no País, estabelecendo indicadores de qualidade da água, produzindo e disponibilizando informações necessárias ao controle ambiental (fiscalização, licenciamento, outorga) e à identificação de ações prioritárias a serem desenvolvidas nas bacias hidrográficas.

Estado de São Paulo

Na execução do PNMA II no estado de São Paulo, são desenvolvidos dois projetos, ambos na Bacia do Alto Tietê. No Componente “**Gestão Integrada de Ativos Ambientais**”, é desenvolvido, pelas Secretarias de Meio Ambiente e de Agricultura, o projeto “Proteção dos Mananciais de Abastecimento no Alto Tietê-Cabeceiras”, com três linhas principais: (i) gestão integrada de resíduos sólidos; (ii) agricultura sustentável; e, (iii) proteção e recuperação de nascentes e áreas de preservação permanente (APP’s). O monitoramento da qualidade da água subterrânea será uma das formas de mensurar a eficácia das medidas implantadas. No componente “**Desenvolvimento Institucional**”, está sendo desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), o Catálogo Eletrônico, com organização, sistematização e integração das informações provenientes do monitoramento qualitativo de águas superficiais e subterrâneas, de cadastros de outorgas e de fontes de poluição, bem como do uso e ocupação do solo, como suporte as ações de controle e licenciamento.

No estado de São Paulo, existem dois monitoramentos de qualidade de águas subterrâneas de caráter regional. O primeiro refere-se ao monitoramento ambiental executado pela CETESB, que monitora os principais aquíferos do estado. O segundo é o monitoramento de vigilância, executado pelos Centros de Vigilância Sanitária, com o intuito de avaliar a qualidade da água consumida pela população, principalmente de águas de bicas e poços cacimba, utilizados como fonte alternativa de abastecimento. Em relação à quantidade, atualmente, não existe monitoramento no estado de São Paulo, apesar do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) ter operado, na década de 1980, um monitoramento de nível d’água (informações pessoais de Gerônimo Rocha – DAEE).

Deve ser mencionado que a Câmara Técnica de Águas Subterrâneas do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) do Estado de São Paulo instituiu, no final de 2004, um grupo de trabalho para elaborar as diretrizes para o projeto de uma rede de monitoramento integrado de quantidade e qualidade das águas subterrâneas.

Monitoramento ambiental

O monitoramento executado pela CETESB tem seu histórico iniciado em 1977, em atendimento ao regulamento da Lei 997/76, aprovado pelo Decreto Estadual 8468/76, quando foi publicado um relatório sobre a poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo, elaborado com base em dados disponíveis nos cadastros da CETESB e do Departamento de Águas e Energia Elétrica.

Um dos objetivos deste relatório foi a obtenção de um panorama geral da qualidade e da contaminação das águas subterrâneas no estado e uma de suas recomendações foi a implantação de uma rede fixa de monitoramento das águas subterrâneas em poços e nascentes, com execução de um programa de amostragem regular nestes pontos, de forma a obter, armazenar e disponibilizar os dados necessários ao controle de fontes potenciais de poluição, previsões de tendências de qualidade, planejamento e tomada de decisões, além de subsidiar estudos e pesquisas (CETESB, 1977).

Em 1979, a CETESB, em convênio com o DAEE e a empresa Israelense ENCO-TAHAL, concluiu um projeto relativo ao controle de poluição das águas subterrâneas na Bacia do Taubaté, enunciando recomendações para a preservação da qualidade das mesmas, dentre as quais se destaca aquela relativa ao monitoramento, visando identificar, precocemente, focos de contaminação, pois segundo o relatório, uma vez contaminada, aquela parcela do aquífero tornar-se-ia praticamente irrecuperável (CETESB, s.d).

Com base naquele estudo, no início da década de 1980, foi elaborada uma proposta para o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas na Bacia Sedimentar de Taubaté, selecionando 65 poços tubulares e 12 piezômetros, localizados em função da vulnerabilidade ao risco de poluição, do uso e ocupação do solo (agrícola, urbano, industrial), da proximidade de fontes potenciais de poluição (indústrias, aterros e lagoas de tratamento de efluentes e esgotos) e considerando ainda, as distintas regiões do aquífero (área de recarga, intermediária e descarga), alinhando os poços perpendicularmente às linhas piezométricas. As amostragens seriam semestrais (março e setembro), com parâmetros de campo e de laboratório, além de substâncias inorgânicas específicas, selecionadas em função da fonte potencial de poluição mais próxima (CETESB s.d). Entretanto, esta rede não chegou a ser implementada.

Somente em 1990, a rede estadual de monitoramento ambiental começou a ser efetivamente implementada, em atendimento ao Decreto Estadual 32.955 de 07.02.1991, que regulamenta a Lei 6.134 de 02.07.1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas. Este monitoramento visa caracterizar e avaliar a qualidade das águas subterrâneas brutas do estado, de modo a subsidiar a CETESB, na tomada de ações de controle da poluição. Os primeiros pontos de amostragem foram selecionados nas áreas de afloramento do Aquífero Guarani e no Aquífero Bauru, no centro-oeste do estado (CETESB, 2004).

Atualmente, os pontos de amostragem de águas subterrâneas são distribuídos de forma a abranger os diferentes aquíferos porosos e fraturados do estado de São Paulo, em suas diversas áreas e formas de ocorrência, conforme apresentado na Figura 1. Os aquíferos cársticos ainda não são monitorados devido à reduzida área de ocorrência, em comparação com os demais tipos de aquíferos. Esta rede contava, em 2004, com 162 pontos de coleta semestral de amostras, constituídos, principalmente, por poços tubulares de abastecimento público, selecionados em função da avaliação dos perfis estratigráfico e construtivo. Em 2003, iniciou-se a coleta também em nascentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Apesar da seleção de pontos de monitoramento ser realizada com critérios definidos, onde o poço deve captar água de um único sistema aquífero, observa-se que não há critérios estabelecidos para definir a densidade de pontos de amostragem.

A coleta de amostras de água é feita por técnicos de 22 Agências Ambientais e da Sede da CETESB. Em cada ponto de amostragem, as amostras da água são acondicionadas em diferentes frascos, para determinação de diferentes substâncias. O conjunto de frascos é encaminhado, pelos coletores, para 5 (cinco) laboratórios regionais da CETESB. Os frascos relativos a metais e substâncias orgânicas voláteis são encaminhados para os laboratórios da Sede da CETESB, sendo o transporte das amostras, entre laboratórios, efetuado por transportadora especializada, como forma de controle de qualidade. Os laboratórios da CETESB seguem a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO/IEC 17025/98 - requisitos gerais para competência de laboratório de ensaios e calibração.

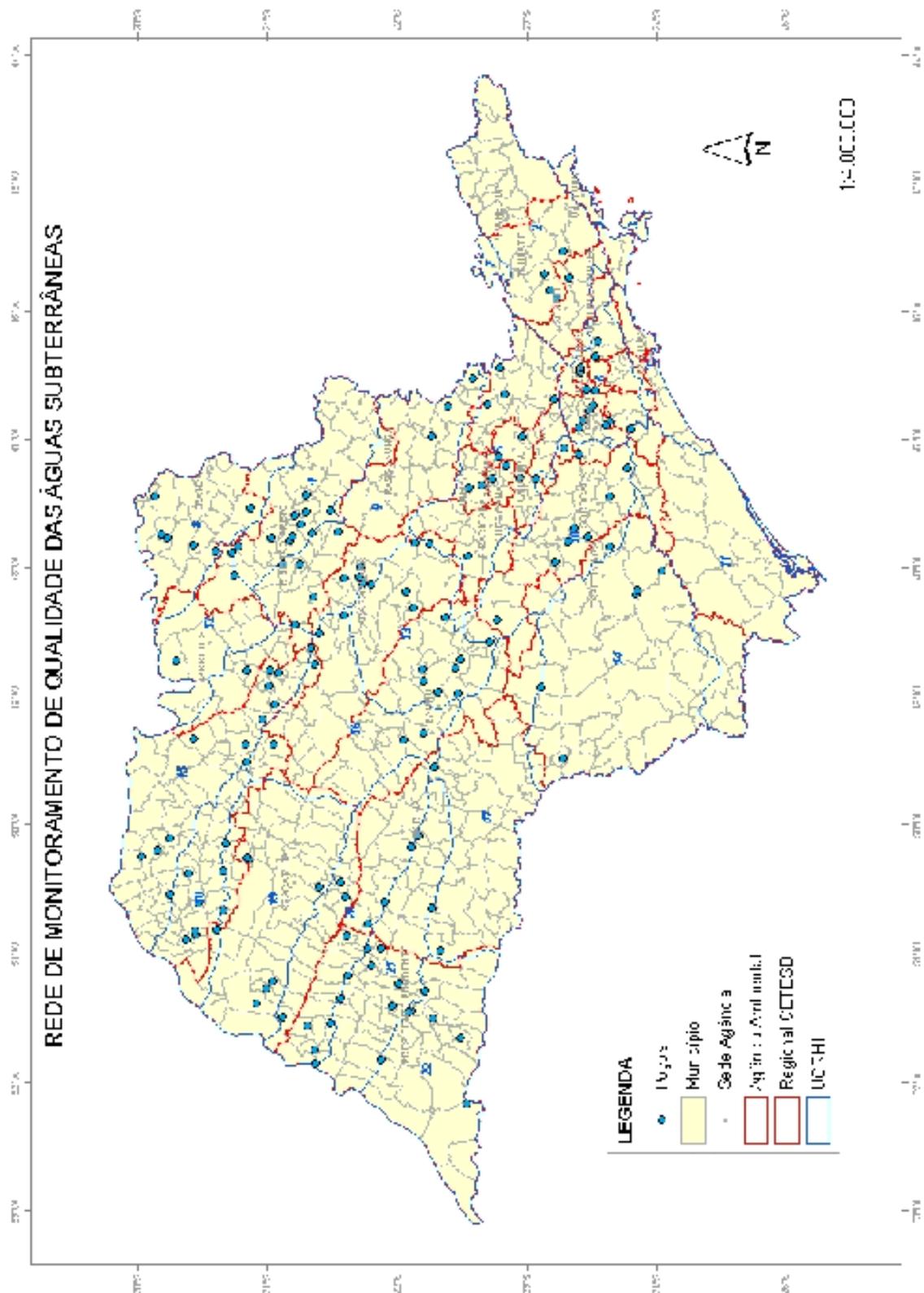


FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Fonte: CETESB, 2004

Os parâmetros monitorados, utilizados para a caracterização da hidroquímica natural, bem como indicadores de efeitos antrópicos, são: pH, temperatura, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, resíduo seco, alcalinidade, carbono orgânico dissolvido, dureza total, alumínio, arsênio, bário, cálcio, cádmio, cloretos, chumbo, cromo, ferro, fluoreto, magnésio, manganês, mercúrio, nitrogênio Kjeldhal total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato, potássio, sódio, contagem de bactérias heterotróficas, coliformes totais e coliformes fecais (termotolerantes). A partir da campanha de amostragem de setembro de 2002, iniciou-se a determinação também de cobre, níquel, selênio, zinco, cobalto, vanádio, cianeto e boro. Em 2004, iniciou-se a realização de ensaios toxicológicos de Teste de AMES e Microtox, em alguns pontos selecionados em função das concentrações de nitrato e cromo. Para os pontos da RMSB, também estão sendo determinados 1,2 dicloroetano, tetracloroetileno, cloreto de vinila, clorofórmio e benzeno, tendo em vista o histórico da industrialização regional.

Para que se possa aumentar o número de pontos de monitoramento e atender às demandas da rotina do controle de poluição, é preciso equipar os laboratórios regionais. Para isto, a CETESB está investindo em equipamentos analíticos, com financiamento do FEHIDRO. Em 2004, os laboratórios da Sede foram reformados e estão sendo acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO), para a maioria dos parâmetros determinados rotineiramente.

Na análise estatística, os dados discrepantes são retirados, de forma a minimizar possíveis erros. Para os resultados não detectados, adota-se o limite de detecção como a concentração do parâmetro na amostra. A CETESB utiliza, na interpretação dos dados do monitoramento de águas subterrâneas, a mediana e o 3º quartil (75%) dos resultados obtidos, bem como a comparação com padrões de potabilidade para identificar contaminações. Um relatório é elaborado a cada três anos, apresentando a caracterização química da água dos aquíferos e uma avaliação dos resultados que não atendem aos padrões de potabilidade. Este relatório é disponibilizado no endereço eletrônico www.cetesb.sp.gov.br. O custo da operação da rede de monitoramento de águas subterrâneas no estado de São Paulo foi, em 2004, de aproximadamente R\$ 400.000,00.

As informações referentes aos pontos de coleta e aos resultados do monitoramento são atualmente armazenadas em um banco de dados em Microsoft Access. Entretanto, está sendo elaborado pela CETESB, em conjunto com o Instituto Geológico (IG), um Sistema de Informações Georeferenciadas, em SQL, e com rotinas de controle de qualidade. Neste sistema, os resultados obtidos nos laboratórios serão transferidos automaticamente para o banco de dados, evitando-se erros de digitação e poderão ser armazenadas outras informações tais como, a delimitação de áreas de proteção de poços, registros de acidentes envolvendo cargas perigosas, resultados de monitoramentos particulares (exigidos pelo DAEE na concessão ou renovação de outorgas de direito de uso da água, ou ainda, por exigência da CETESB de auto-monitoramento das fontes potenciais de poluição), localização de áreas contaminadas e bases cartográficas.

Monitoramento de vigilância

O monitoramento executado pela Secretaria de Saúde, denominado Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano do Estado de São Paulo (Proágua), foi implantado, em 1992, pela Resolução Estadual SES 45 de 31.01.1992 da Secretaria de Saúde. A coleta de amostras de água para fins de avaliação da potabilidade e a adoção de medidas legais decorrentes de situações de não conformidade foram transferidas para a esfera municipal em 1999. As análises laboratoriais e a emissão dos laudos aos municípios permaneceram com a esfera estadual (Pocol e Valentin, 2004).

O Proágua consiste em um conjunto de ações contínuas, por parte da autoridade sanitária, para verificar o atendimento aos padrões de potabilidade da água e avaliar o risco que as diversas formas de abastecimento representam para a saúde humana. As principais ações desenvolvidas pelo programa são:

- cadastramento dos sistemas e das soluções alternativas de abastecimento de água;
- seleção de pontos de monitoramento segundo critérios de risco e vulnerabilidade da rede de distribuição nos diversos sistemas de abastecimento de água;
- monitoramento da qualidade da água para consumo humano por meio de coletas de amostras e análises de vigilância, nos parâmetros básicos de rotina: bacteriológicos e físico-químicos (cloro residual livre, pH, turbidez, cor e flúor);

- avaliação de risco das diversas formas de abastecimento por meio de (i) análises de informações ambientais e de recursos hídricos, associando os fatores de risco aos sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água, (ii) avaliação do processo de captação, tratamento e distribuição da água por meio de inspeções, (iii) avaliação dos relatórios de controle de qualidade e (iv) análise do perfil epidemiológico da população, relacionando a ocorrência de agravos com o consumo da água; e
- atuação junto aos responsáveis pelos sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água para a adoção de medidas corretivas frente às situações que possam comprometer os padrões de potabilidade da água.

A Figura 2 ilustra a estrutura organizacional do Proágua, onde a coordenação nacional do Proágua compete à Secretaria de Vigilância à Saúde do Ministério da Saúde, a coordenação estadual é realizada pelo Centro de Vigilância Sanitária e a execução das ações é atribuição da instância municipal.

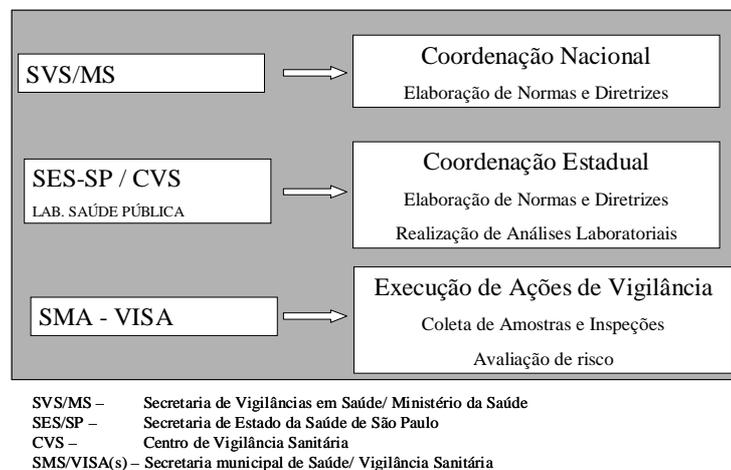


FIGURA 2 - ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DO PROÁGUA Fonte: Pocol e Valentin (2004)

A Secretaria de Estado da Saúde dispõe de uma rede de 19 laboratórios de saúde pública, sob administração do Instituto Adolfo Lutz ou da DIR. Os profissionais dos laboratórios estão envolvidos diretamente nas ações do Proágua, atuando na qualificação dos profissionais responsáveis pela coleta de amostras de água para fins de vigilância, na avaliação conjunta dos resultados analíticos obtidos e seus impactos na saúde da população e no planejamento das ações do programa.

O Proágua abrangia, em 2003, 97% dos municípios do estado, ou seja, 625. Destes, 176 realizaram análises de amostras de água provenientes de soluções alternativas coletivas, ou seja, toda modalidade de abastecimento coletivo de água, distinta do sistema de abastecimento para consumo humano sob responsabilidade do poder público. Além do acompanhamento da qualidade da água consumida, avaliação e intervenção na captação, tratamento e distribuição da água, cabe ao programa fomentar ações conjuntas com as diversas instituições afins, para tornar mais efetivos os procedimentos voltados à melhoria dos sistemas e soluções alternativas de abastecimento de água.

Minas Gerais

No estado de Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão da Águas (IGAM), por meio do Projeto “Águas de Minas”, está implantando uma rede de monitoramento para controle da qualidade das águas subterrâneas em áreas identificadas como mais vulneráveis e com riscos reais ou potenciais de contaminação. A primeira bacia hidrográfica a ser monitorada é a do rio São Francisco, onde o uso dos recursos hídricos subterrâneos é de extrema relevância social, econômica e ambiental. Naquela área, foram selecionados cerca de 40 poços tubulares e as amostras serão coletadas trimestralmente para determinação de parâmetros físico-químicos, incluindo metais e pesticidas. O primeiro relatório deverá ser publicado no segundo semestre de 2005 e o programa de monitoramento será ampliado para outras áreas, após um período de experiência, quando serão definidos os parâmetros de interesse e as frequências ideais de coleta (Assessoria de Comunicação do IGAM).

Outros estados do Brasil

Nos demais estados do Brasil, não há um monitoramento de águas subterrâneas em caráter regional, ocorrendo apenas em áreas específicas, como no caso do Pólo Petroquímico de Camaçari na Bahia, desenvolvido pela CETREL, ou na avaliação da intrusão salina em estados da Região Nordeste, realizada por instituições de pesquisa. Os recursos do PNMA II estão sendo investidos, pelos órgãos ambientais, na instalação de redes de monitoramento de qualidade de águas superficiais.

3 - Objetivos

Apresentar a situação atual do monitoramento de águas subterrâneas em diferentes países e no Brasil.

Propor critérios para projeto, implantação e operação de uma rede de monitoramento de qualidade e quantidade das águas subterrâneas, visando subsidiar o gerenciamento integrado do recurso hídrico subterrâneo por bacias hidrográficas e aperfeiçoar o monitoramento efetuado no estado de São Paulo.

Elaborar proposta de implantação de uma rede de monitoramento para a região compreendida pela Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, com base na aplicação dos critérios selecionados.

4 – Material e Métodos

Foram compilados da literatura, avaliados e adaptados para as condições do Estado de São Paulo os critérios internacionais para projeto, implantação e operação de rede de monitoramento de qualidade e quantidade de águas subterrâneas.

Foi adotada, como premissa, que estes critérios considerassem a necessidade do gerenciamento integrado dos recursos hídricos, de forma a contemplar tanto os aspectos de qualidade e quantidade, como também possibilitar a integração com o monitoramento dos recursos hídricos superficiais.

Foi escolhida a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê como área piloto, avaliando-se a aplicabilidade dos critérios selecionados para a implantação e operação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas.

Foram compiladas informações referentes ao recurso hídrico subterrâneo nesta bacia, tais como, geologia, hidrogeologia, uso das águas subterrâneas, distribuição das fontes potenciais de poluição de solo e águas subterrâneas e informações sobre possíveis pontos de monitoramento.

Foi realizada uma consulta nas páginas eletrônicas de todos os órgãos estaduais de meio ambiente, na tentativa de se obter informações quanto à existência de redes de monitoramento de águas subterrâneas. Foi também enviada uma mensagem eletrônica para os órgãos ambientais de outros os estados do Brasil, solicitando informações sobre a existência de redes de monitoramento e em caso positivo, quais os critérios adotados na seleção e distribuição de pontos de monitoramento, quais os parâmetros monitorados.

5 Resultados e Discussão

5.1 Levantamento dos critérios de projeto, implantação e operação de redes de monitoramento

Simoneti (1999); Fetter (2001) e European Communities (2003) enfatizam que, a primeira etapa do **projeto** de monitoramento deve ser a definição apropriada dos objetivos, providenciando respostas às perguntas: “por que e onde monitorar?”, e “que informações se espera do monitoramento da água?”. Na prática, a definição dos objetivos não é uma tarefa fácil e requer a consideração de vários fatores, incluindo os aspectos sociais, legais, econômicos, políticos, administrativos e operacionais.

Segundo *et al.* (1983) e Fetter (2001), outras etapas do **projeto** de rede de monitoramento compreendem a **seleção dos pontos** de amostragem, da **frequência** e duração da amostragem e seleção das **variáveis** a serem medidas.

Para Harmancioglu *et al.* (1998) e Ward (1999) (*apud* Simoneti, 1999), a **operação** de uma rede de monitoramento da qualidade compreende todas as atividades de coleta dos dados, incluindo a **amostragem**, **análises** laboratoriais, processamento e **interpretação** dos dados obtidos e produção de informações necessárias para atender aos objetivos da rede de monitoramento.

Uma visão ampla das etapas do monitoramento é fornecida Uil *et al.* (1999), onde um sistema de monitoramento efetivo das águas subterrâneas deve iniciar-se pela especificação das informações que serão necessárias para a caracterização do corpo hídrico subterrâneo a ser monitorado e para atingir aos objetivos do monitoramento e terminar com a utilização das informações obtidas. Por sua vez, as informações obtidas subsidiarão uma redefinição das informações necessárias e como obtê-las. Além disso, é preciso definir preliminarmente uma **estratégia de monitoramento** que possibilite definir os responsáveis pelo monitoramento e otimizar os recursos técnicos, legais, financeiros e humanos disponíveis e garantir a obtenção dos produtos esperados. A Figura 3 apresenta o ciclo de atividades do monitoramento, segundo Uil *et al.* (1999).

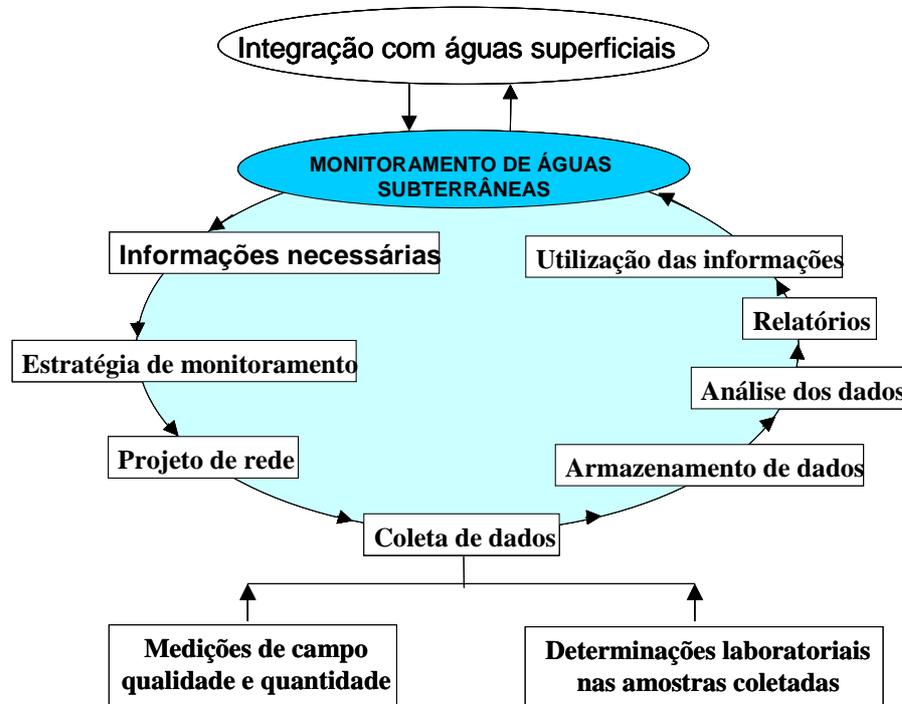


FIGURA 3 – CICLO DE UM PROJETO DE MONITORAMENTO

FONTE: UIL *ET AL.* (1999)

Segundo European Communities (2003), em função dos custos, uma rede de monitoramento deve ser implantada gradualmente, passo a passo, primeiramente com base em um modelo conceitual sobre a delimitação tridimensional do corpo hídrico a ser monitorado, suas características químicas e hidrológicas e sua vulnerabilidade a fontes de poluição e super exploração. Com a avaliação dos dados obtidos, é possível melhorar o modelo conceitual e também o próprio monitoramento. Este processo continua até que os objetivos propostos sejam atingidos com elevado nível de confiança, a um custo possível, conforme apresenta a Figura 4.

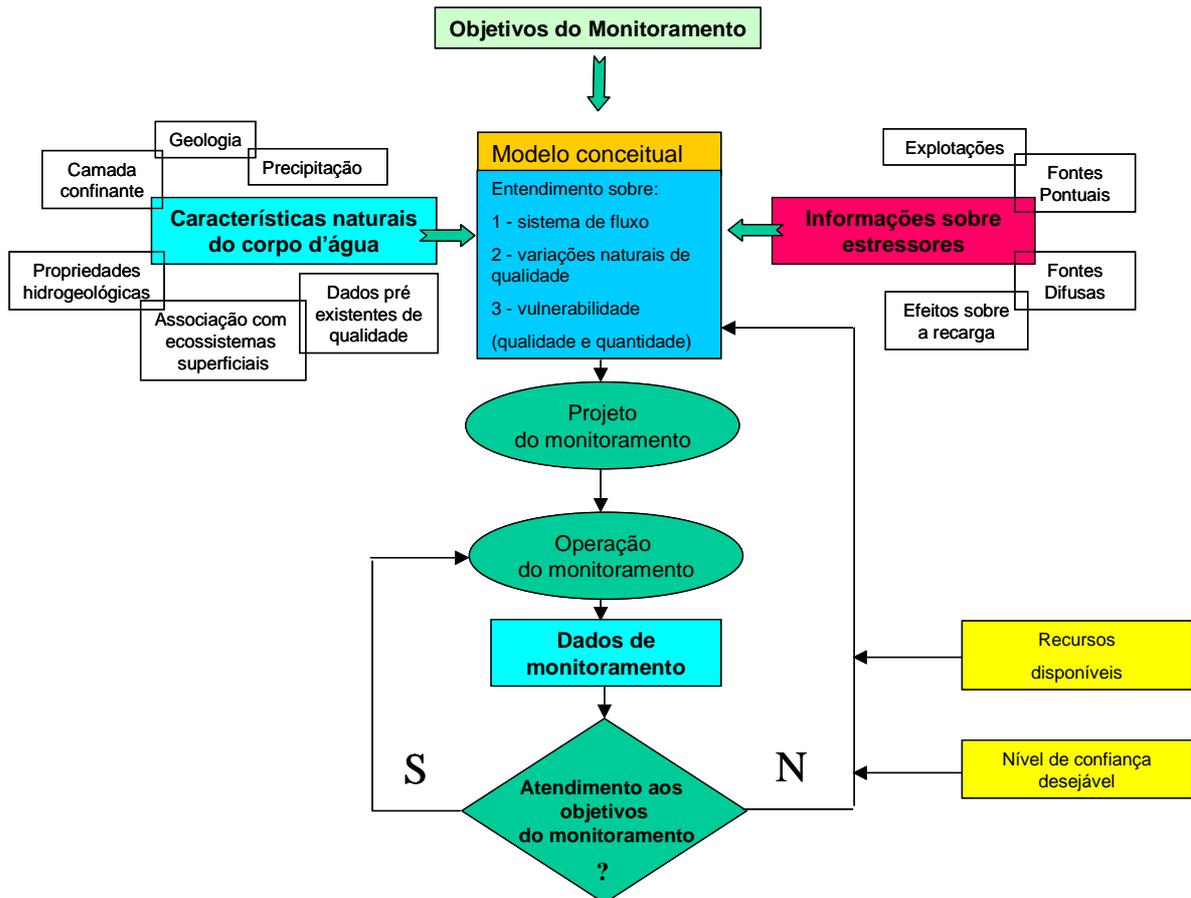


FIGURA 4 – ESQUEMA DE ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE MONITORAMENTO Adaptado de European Communities (2003)

Assim, pode-se afirmar que as etapas gerais do monitoramento são: (i) definição dos objetivos do monitoramento; (ii) projeto de rede (seleção de pontos de monitoramento, parâmetros a serem determinados, frequência de amostragem); (iii) operação do monitoramento (coleta, análise, interpretação, controle de qualidade); e (iv) avaliação dos resultados frente aos objetivos para validação do monitoramento.

Entretanto, uma pergunta deve, ainda, ser respondida: “**Quem** terá a atribuição de coordenar e executar a implantação e a operação da rede de monitoramento?” A resposta está diretamente ligada aos objetivos do monitoramento e à legislação vigente.

5.1.1 Objetivos do monitoramento

A atividade de monitoramento faz parte do sistema de gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo. Segundo UNEP/WHO (1996) e California (2003), o monitoramento da qualidade e da quantidade da água é a base para o gerenciamento deste recurso, subsidiando a tomada de decisões e avaliando a eficácia dessas decisões na proteção, manutenção, melhoria e remediação dos recursos hídricos.

Entretanto, grande parte da literatura tradicional sobre hidrogeologia, ao tratar de redes de monitoramento de água subterrânea refere-se, ainda, ao acompanhamento da evolução de plumas de contaminação frente às ações de remediação. Os critérios técnicos para o estabelecimento de redes regionais de monitoramento de qualidade e quantidade permanecem circunscritos a relatórios técnicos de agências ambientais, serviços geológicos e órgão gestores do recurso hídrico. Em contraste, o monitoramento regional de águas superficiais está mais bem descrito na literatura e, mesmo para a Agência Nacional de Águas (ANA), a “rede de monitoramento de qualidade das **águas**” tem como objetivo manter um banco de dados de referência com informações **apenas** sobre a qualidade da água dos **rios**.

Segundo Derizio (1992), um dos objetivos de avaliação da qualidade e quantidade é verificar se a condição da água é adequada para um determinado uso ou conjunto de usos. Os dados para esta avaliação podem ser obtidos de três formas básicas: (i) monitoramento, que prevê o levantamento sistemático de dados em pontos de amostragem selecionados, de modo a acompanhar a evolução das condições de qualidade da água ao longo do tempo; (ii) vigilância, que implica em uma avaliação contínua da qualidade da água e procura detectar alterações instantâneas de modo a permitir providências imediatas, tendo como exemplo as avaliações de qualidade realizadas pelas companhias de abastecimento de água e pela Vigilância Sanitária; e (iii) estudo especial, que é projetado para atender às necessidades de um evento específico. Geralmente é feito por meio de campanhas intensivas e de limitada duração. Exemplos deste tipo de estudo são

as avaliações de qualidade em uma área contaminada ou suspeita de contaminação ou as análises efetuadas nas águas de um poço para obtenção de outorga de uso.

Para Whitfield (1998) (*apud* Simoneti, 1999), os objetivos de um monitoramento da qualidade da água são: descrever a qualidade num contexto espacial (vigilância geral); descrever tendências de qualidade ao longo do tempo, identificando alterações causadas pelas atividades humanas e avaliando a eficácia das medidas corretivas; verificar o atendimento aos critérios e padrões de qualidade, identificando se as desconformidades representam uma degradação antrópica ou uma variação natural; e, avaliação de impactos pontuais, onde se utiliza um número maior de pontos de amostragem em uma área restrita, visando delimitar as plumas de contaminação. Normalmente este tipo de monitoramento é realizado durante um tempo definido, sendo na maioria dos casos de curta duração.

Para Nixon (1996), os objetivos de uma rede de monitoramento de qualidade e quantidade incluem a obtenção de informações básicas que poderão ser utilizadas para subsidiar a elaboração de legislações; planejar novos sistemas de captação de água para abastecimento em função da localização de fontes pontuais e difusas de poluição e do controle de rebaixamento de nível d'água; subsidiar modelagens matemáticas; identificar tendências na concentração de parâmetros indicadores, detectando indícios de alteração de qualidade ou super-exploração; mapear a qualidade natural das águas subterrâneas; e proporcionar dados para pesquisas científicas. Segundo Nixon *et al.* (1998), a rede de monitoramento Européia EUROWATERNET, projetada em 1998, tem o objetivo de prover informações para a Comissão Européia, órgãos reguladores, legisladores e público em geral, sobre a condição atual e tendências de qualidade e quantidade dos recursos hídricos na Europa e como os recursos hídricos respondem às pressões ambientais (relações causa-efeito).

Uil *et al.* (1999), observam que, freqüentemente, os objetivos de um monitoramento são descritos em termos gerais, como por exemplo “detectar alterações na qualidade das águas subterrâneas em um período de tempo. Para identificar quais informações serão necessárias para atingir este objetivo, é preciso traduzir o objetivo genérico em um objetivo técnico, com parâmetros quantificáveis como, por exemplo, “detectar alteração de 10%

na média anual da concentração de nitrato em um período de 5 anos, com um nível de confiança de 95%”. Entretanto, estes autores reconhecem a dificuldade de estabelecer objetivos técnicos em alguns casos, como por exemplo, no estabelecimento de concentrações de referências ou aquisição de dados para calibração de modelos numéricos de fluxo de águas subterrâneas. O quadro 4 apresenta exemplos de objetivos técnicos e os respectivos dados a serem coletados para alcançar estes objetivos.

QUADRO 4 - EXEMPLOS DE OBJETIVOS TÉCNICOS E OS RESPECTIVOS DADOS A SEREM COLETADOS

Objetivo Geral	Objetivos técnicos		Dados a serem coletados
Caracterização de um corpo hídrico subterrâneo	Determinar isolinhas de nível d'água para diferentes aquíferos	• Tendência temporal	Nível d'água em diversos anos
		• Média anual • Média na estação seca • Média na estação chuvosa	Nível d'água de pelo menos um ano de monitoramento freqüente
	Distribuição da qualidade natural das águas subterrâneas (sem influência de fontes pontuais de poluição)	Distribuição de macros elementos	Pelo menos uma campanha de amostragem e análise para Ca, Mg, K, Na, Cl, SO ₄ , HCO ₃ e NO ₃
	Exploração de diferentes aquíferos	• Explorações anuais • Sazonalidade de explorações	Localização, profundidade e volume mensal explorado.

Fonte: Uil *et al.* (1999)

Ainda segundo Uil *et al.* (1999), os objetivos técnicos de um monitoramento podem ser divididos em dois grupos: (i) caracterização, que significa obter dados de médias anuais ou espaciais, tanto de qualidade como de quantidade; e (ii) representação contínua, que significa obter dados para calcular tendências temporais e espaciais nas águas subterrâneas. Estas tendências podem ser desejáveis (recuperação da qualidade) ou indesejáveis (poluição). Além disso, um monitoramento deve prover informações sobre a dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e efeitos antrópicos, sendo que para a modelagem, deve haver a integração das atividades de monitoramento de águas subterrâneas e superficiais.

Segundo a Diretriz Européia da Água 2000/60/EC, denominada “Water Framework Directive”, o monitoramento das águas subterrâneas tem os seguintes objetivos:

- fornecer uma visão geral da qualidade dos corpos d’água em cada bacia hidrográfica, de forma a permitir a classificação das águas subterrâneas em 2 classes (boa e má condição).
- prover uma avaliação confiável sobre a condição quantitativa dos aquíferos ou sistemas aquíferos (balanço entre recarga e exploração, influência sobre corpos hídricos superficiais e sobre ecossistemas dependentes);
- estimar a direção e taxa de fluxo das águas subterrâneas
- validar procedimentos de avaliações de impactos;
- estabelecer a condição qualitativa das águas subterrâneas; e,
- identificar tendências significativas de aumento ou diminuição das concentrações de poluentes.

Para Fetter (2001), há pelo menos quatro grandes objetivos de monitoramento: (i) determinar a qualidade da água e a hidroquímica de um aquífero; e (ii) determinar a qualidade e a composição da água de um poço ou campo de poços de abastecimento; (iii) determinar a extensão de uma contaminação; e (iv) monitorar uma fonte potencial de poluição identificando uma eventual contaminação, se esta ocorrer.

Segundo Foster *et al.* (2002), os monitoramentos de nível d’água e de qualidade das águas subterrâneas são necessários para:

- conhecer a qualidade natural das águas subterrâneas;
- coletar novos dados sobre os sistemas aquíferos, melhorando a modelagem conceitual e numérica;
- avaliar a eficácia das medidas de proteção das águas subterrâneas; e
- avaliar o risco de poluição das águas subterrâneas.

Estes autores citam, além do monitoramento regional de qualidade de águas subterrâneas, o monitoramento defensivo realizado nas áreas de proteção de poços de abastecimento, com o objetivo de detectar a chegada de poluentes a montante da captação; o monitoramento realizado a jusante de empreendimentos potencialmente

poluidores, com o objetivo de avaliar possíveis impactos causados pelas atividades desenvolvidas no local; e o monitoramento em áreas reconhecidamente contaminadas, onde o objetivo é avaliar a eficácia das medidas de remediação ou os efeitos da atenuação natural.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) identificou dois tipos de monitoramento em função do seu objetivo: o ambiental e o de vigilância referente ao atendimento a padrões de qualidade (California, 2003). O monitoramento ambiental é uma ação de longo termo e tem como foco a avaliação geral da qualidade de um aquífero e das tendências de alterações (naturais ou devido ao uso do solo), avalia a eficácia de programas de gerenciamento do recurso hídrico e deve atender a múltiplos propósitos e a várias escalas (local e regional). O monitoramento de verificação de atendimento aos padrões de qualidade tem um foco mais específico em atividades humanas que possam influenciar a qualidade das águas subterrâneas utilizadas para consumo humano.

Segundo UNEP/WHO (1996), o monitoramento para estabelecimento de valores de referência também é amplamente realizado e seus resultados subsidiam a avaliação de áreas potencialmente impactadas. Concordantemente, Schroeter *et al.* (2004), afirmam que, para proteger e gerenciar adequadamente os recursos hídricos subterrâneos é imperativo o estabelecimento de valores de referência de qualidade das águas subterrâneas e o seu uso para cada bacia hidrográfica. Estes valores podem ser utilizados como referência para gerenciamento local, monitoramento de tendências de qualidade, comparação entre bacias, bem como o estabelecimento de prioridades na remediação de áreas contaminadas.

No estado de São Paulo, o monitoramento de qualidade de águas subterrâneas teve, como objetivo inicial, a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas. Atualmente, tem-se buscado caracterizar a qualidade natural para o estabelecimento de valores de referência para as substâncias de interesse, incluído os metais, considerando os diferentes aquíferos, identificar contaminantes prioritários e suas áreas de ocorrência e, ainda, estabelecer tendências de comportamento para estes contaminantes prioritários (CETESB, 2004).

Com relação à quantidade, observa-se na literatura que os principais objetivos de um monitoramento são estabelecer a potenciometria em uma região e identificar tendências de rebaixamento destes níveis. Segundo relatório não publicado do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), o estabelecimento de uma rede piezométrica no Estado de São Paulo teria os seguintes objetivos:

- determinar a interação da pluviometria com as variações de nível da água dos aquíferos;
- definir a interação águas superficiais-águas subterrâneas;
- avaliar a situação do armazenamento subterrâneo;
- estabelecer a resposta dos aquíferos às extrações;
- determinar as características hidráulicas dos aquíferos;
- determinar o grau de confinamento do aquífero; e
- determinar a extensão territorial dos aquíferos.

Segundo California (2003), as informações sobre o uso da água e capacidade de armazenamento, exploração e recarga dos aquíferos são componentes essenciais para o entendimento, proteção e otimização do recurso hídrico subterrâneo, sendo que, na Califórnia (EUA), este tema é de atribuição do Departamento de Recursos Hídricos (DWR), que publicou um relatório sobre o tema em 1975 (*Bulletim 118 – Califórnia's Groundwater*) e uma atualização em 2003, com base na compilação de dados existentes. Estima-se que apenas 20% das bacias hidrográficas naquele estado possuem informações completas sobre as águas subterrâneas em relação à quantidade.

Esta informação é interessante, tendo em vista que similarmente à Califórnia, no Estado de São Paulo o órgão responsável pelas informações de quantidade é o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), que no mesmo ano de 1975 publicou um excelente trabalho sobre as águas subterrâneas nas diferentes Regiões Administrativas do Estado (DAEE, 1975).

5.1.2 Atribuições referentes ao monitoramento

As atribuições legais dos diferentes órgãos estaduais referentes ao monitoramento foram apresentadas no item 2.1 desta dissertação. Do mesmo modo, observa-se da literatura internacional que, muitos órgãos executam diferentes tipos de monitoramento da água subterrânea, mas, de uma forma geral, o monitoramento da qualidade é coordenado pelos órgãos ambientais e de saúde, enquanto que o monitoramento de quantidade é coordenado pelos órgãos gestores dos recursos hídricos e geológicos.

A integração de redes de quantidade e de qualidade torna o monitoramento mais efetivo tanto técnica como financeiramente. Isto implica também na necessidade de integração organizacional quando estes monitoramentos são de responsabilidade de instituições diferentes (Uil *et al.*,1999).

Para Pocol e Valentin (2004), a integração interinstitucional e a apropriação de informações disponíveis em diferentes áreas do conhecimento são fundamentais para a tomada de decisões no sentido da prevenção de riscos à saúde e melhoria de qualidade de vida da população. Desta forma, um programa de vigilância da qualidade da água para consumo humano no estado de São Paulo deve ter por base uma atuação interinstitucional e integradora .

O relatório de Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo (SABESP/CEPAS-IGc,1994) identificou a necessidade de monitoramento das águas subterrâneas naquela região e recomendou, com base no modelo internacional, as seguintes atribuições às diferentes entidades públicas e privadas:

- órgãos gestores dos recursos hídricos ou ambientais: desenvolvimento de monitoramento de qualidade dos principais sistemas aquíferos por unidades hidrográficas, utilizando poços de produção, selecionados com base em suas características construtivas, regime de utilização e nível d'água.
- empresas de abastecimento público: realização de monitoramento dos sistemas de abastecimento, operacionalizado segundo normas estabelecidas pelos órgãos gestores de recurso hídricos, ambientais e de saúde, incluindo além do poço produtor, uma rede de poços de monitoramento implantada nos perímetros de proteção, com

- vistas a detectar a chegada de contaminantes potenciais; e
- responsáveis por fontes de poluição: execução de monitoramento de fontes potenciais de poluição, com rede implantada com base em critérios hidrogeológicos locais, sob rigoroso controle dos órgãos de proteção ambiental.

5.1.3 Áreas prioritárias para monitoramento

Segundo Uil *et al.* (1999), as bacias hidrográficas são consideradas, na Europa, desde 1996, como unidade base para estruturar redes de monitoramento de águas subterrâneas. No Brasil, a Lei Federal nº 9.433, de 08.01.1997, também estabelece a bacia hidrográfica como unidade de planejamento. Entretanto, pode ser necessário, ainda, priorizar áreas dentro de uma bacia hidrográfica. Isto pode ser feito utilizando o conceito de corpo hídrico subterrâneo, definido como um volume de água armazenada no subsolo e hidrogeologicamente interconectado ao ciclo hidrológico.

Com efeito, para (Ministry of Environment, 1998), um programa de monitoramento deve iniciar-se pelas áreas mais críticas de uma bacia hidrográfica, definidas em função do uso da água subterrânea, das características hidrogeológicas e do uso e ocupação do solo. Segundo Nixon *et al.* (1998), o monitoramento de caracterização da água deve ser realizado em todos os corpos hídricos subterrâneos considerados prioritários.

Segundo Uil *et al.* (1999), para caracterizar e priorizar o corpo hídrico subterrâneo a ser monitorado é necessário o levantamento de informações preliminares sobre o sistema de fluxo das águas subterrâneas, a extensão dos aquíferos, aquitardes e aquicludes, os usos potenciais da água subterrânea, a vulnerabilidade ao risco de poluição, as fontes potenciais de poluição, os problemas de superexploração e a qualidade da água.

Nixon *et al.* (1998) e Uil *et al.* (1999) citam que para o estabelecimento de valores de referência, a rede de monitoramento deve representar a unidade hidrogeológica que se deseja caracterizar, mas, na locação dos pontos de coleta, deve-se evitar locais impactados por fontes de poluição ou superexploração. Por outro lado, para avaliação da condição

da água subterrânea, as estações de monitoramento devem estar em locais próximos a agentes de pressão.

Locais facilmente acessíveis são escolhidos em detrimento daqueles localizados em áreas remotas (Kentucky Geological Survey, 2000). E para Fetter (2001), devem ser amostrados poços localizados em áreas de recarga e descarga dos aquíferos.

Segundo CETESB (2004), a implantação da rede de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas no Estado de São Paulo iniciou-se nas áreas de afloramento do Aquífero Guarani, nas áreas de ocorrência do Sistema Aquífero Bauru, bem como nas áreas do Sistema Aquífero Serra Geral, considerando a vulnerabilidade à poluição, a produtividade e a profundidade dos aquíferos.

Segundo GEMS (2004), para a escolha das estações de monitoramento, os seguintes tipos de uso do solo devem ser considerados prioritários:

- áreas irrigadas, sujeitas à salinização e utilização de águas de reuso;
- uso intensivo de fertilizantes e agrotóxicos com potencial de contaminação;
- áreas de mineração com geração de efluentes; e
- indícios de acidificação em função do transporte atmosférico de poluentes.

5.1.4 Seleção e densidade de distribuição de pontos da amostragem

Seleção de pontos de amostragem

As estações de monitorando podem ser nascentes, poços existentes e poços perfurados especialmente para monitoramento UNEP/WHO (1996) e Uil *et al.* (1999). Segundo (Kentucky Geological Survey, 2000), grandes nascentes, protegidas das enxurradas, são preferíveis em relação aos poços, pois representam uma área maior de drenagem e são mais sensíveis às fontes difusas de poluição. Segundo European Communities (2003), para monitoramento da vazão em meios fraturados de baixa permeabilidade, é melhor optar por nascentes ou fluxo de base dos rios, do que instalar poços de monitoramento.

Segundo Bender e Einsiedl (2004), o monitoramento em nascentes é preferível, pois estas definem melhor uma zona de captura, sendo mais fácil correlacionar uma alteração de curto prazo nas condições da água com as atividades antrópicas e ao uso do solo e apresentam os seguintes critérios para seleção de nascentes a serem monitoradas: ter vazão permanente; representar os principais aquíferos; localização em áreas com ou sem pressão antrópica; ser provida de obras de captação de água; boa acessibilidade para coleta de amostras; e proximidade de fontes de energia, no caso de instalação de equipamentos de medição contínua.

Segundo (Ministry of Environment, 1998), no estabelecimento de redes de monitoramento, todos os esforços devem ser feitos para utilizar poços já existentes. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) editou a NBR 12.244/92, que padroniza a construção de poços para captação de águas subterrâneas e a Norma NBR 12.212/92 que fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto de poço de captação de águas subterrâneas para abastecimento público. A Figura 5 apresenta um perfil esquemático de um poço tubular.

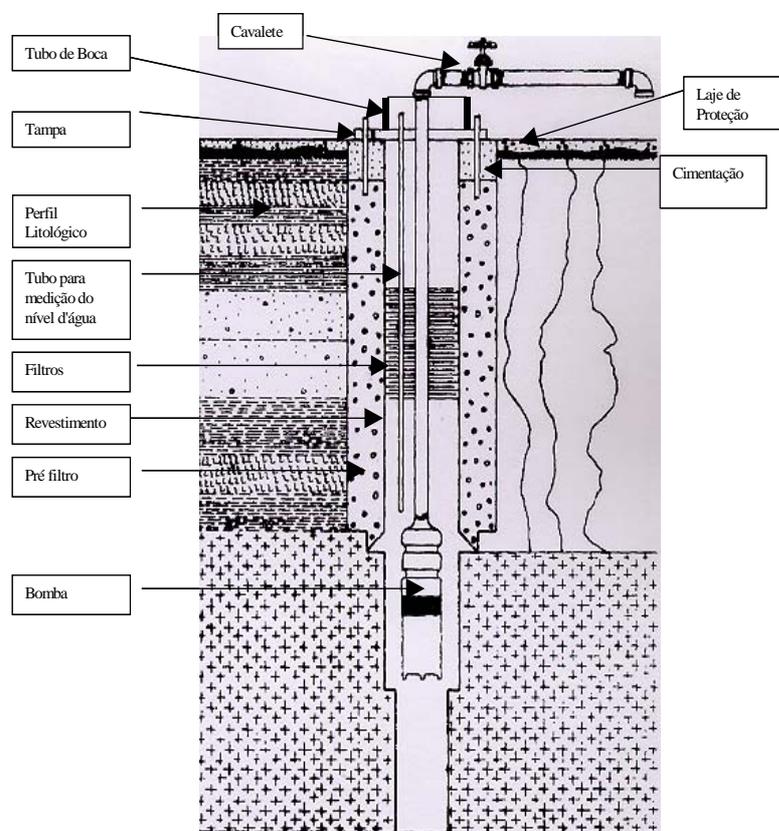


FIGURA 5 - PERFIL ESQUEMÁTICO DE POÇO TUBULAR

Quando os pontos de monitoramento são poços tubulares, aqueles destinados a abastecimento público são preferíveis aos poços privados, devido ao seu potencial de maior longevidade e também porque bombeiam um maior volume de água, sendo assim, as amostras coletadas, representativas de uma porção maior do aquífero. Além disso, os poços de abastecimento público são distribuídos em todas as regiões onde haja um centro populacional (Belitz *et al.*, 2004; Kentucky Geological Survey, 2000).

Para o monitoramento da qualidade, os poços tubulares com potencial de compor a rede devem ser avaliados em função de critérios pré-definidos. De modo geral, devem ter geologia local definida; apresentar detalhes construtivos documentados, possuir filtros em um único aquífero, ter a menor profundidade possível, ter sido construído com materiais que não interfiram na qualidade da água, como cloreto de polivilila (PVC), politetrafluoretileno (PTFE) ou aço inoxidável, estar em fase operacional e ter de autorização do proprietário para coleta de amostras (Nixon, 1998 e United States Geological Survey, 2000). Fetter (2001) alerta, que é necessário conhecer também os detalhes da bomba.

Segundo (South Caroline, 2004), os dados de qualidade já existentes não devem ser considerados na seleção dos pontos de monitoramento, para evitar tendências na escolha de um poço, por este apresentar concentrações maiores ou menores do que aquelas inicialmente esperadas.

Entretanto, segundo Foster *et al.* (2002), poços de abastecimento apresentam algumas limitações para utilização em monitoramento. Em sua maioria, estes poços têm filtros longos, promovendo uma mistura de águas de diferentes profundidades, origens e evolução hidroquímica. Segundo Nixon *et al.* (1998), em sistemas multi-aquíferos, a qualidade da água pode ter grandes variações em função da profundidade de captação. Isto inevitavelmente limita a interpretação e extrapolação dos dados obtidos. Assim, (Ministry of Environment, 1998) recomenda que, quando possível financeiramente, devem ser selecionados vários poços próximos entre si, com diferentes profundidades, para delinear o gradiente vertical e verificar alterações verticais na qualidade. Para Nixon (1996), a rede de monitoramento não deve ser composta exclusivamente por poços de

abastecimento, pois na Europa, são locados em áreas menos impactadas, não refletindo a condição geral dos aquíferos.

Segundo CETESB (2004), na rede de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, os pontos de amostragem são constituídos principalmente de poços tubulares de abastecimento público. Em 2003, iniciou-se a coleta de amostras de água também em poços de extração de água mineral e em nascentes.

Para UNEP/WHO (1996); (Ministry of Environment, 1998); Uil et al. (1999) e Foster *et al.* (2002), o custo restringe a utilização de poços dedicados, exceto em situações de nível d'água raso, quando são instalados poços de monitoramento (100 ou 50 mm de raio). Neste caso, alguns cuidados devem ser tomados, principalmente com a posição da seção filtrante. Geralmente, para a caracterização da tendência geral do aquífero freático, o tamanho típico da seção filtrante dos poços de monitoramento uninível deve estar entre de 3 a 6m. Seções filtrantes de até 2 m são utilizadas para acompanhamento de plumas de contaminação (Puls e Barcelona, 1996).

A norma técnica que deve ser seguida para a instalação de poços de monitoramento é a ABNT NBR 13.895/97 – Construção de poços de monitoramento e amostragem.

Segundo Parisot (1983), nos poços cacimba localizados, sobretudo, nas zonas periféricas dos municípios, as precárias características construtivas e condições de uso, não possibilitam obtenção de dados hidrológicos e amostras de água representativas do aquífero.

Densidade de distribuição dos pontos de amostragem

Segundo UNEP/WHO (1996), uma amostra é suficiente para caracterizar a qualidade do aquífero, para Feitosa e Manoel Filho (2000), afirmam que, em um aquífero homogêneo e isotrópico, uma amostra d'água tomada em qualquer ponto é representativa deste aquífero e segundo Grath *et al.* (2001), deve haver um número mínimo de 3 pontos de

monitoramento para cada corpo hídrico subterrâneo. Entretanto, para Foster *et al.* (2002), a representatividade e a confiabilidade de um monitoramento de águas subterrâneas é dependente do número de estações de monitoramento e, segundo Comunidade Européia(2003), quanto maior a vulnerabilidade e a complexidade hidrogeológica do corpo hídrico, maior deverá ser a densidade de pontos de monitoramento.

Segundo Fetter (2001) e Tuinhof *et al.* (2004), em uma rede de monitoramento, os pontos de monitoramento devem ser uniformemente distribuídos, em função da hidrogeologia e do tipo de uso e ocupação do solo. Uil *et al.* (1999) afirmam que a distribuição dos pontos da rede de monitoramento deve ser tal que permita estimar, com certo nível de precisão, o valor de um parâmetro em qualquer lugar do corpo hídrico monitorado, por meio da interpolação de dados mensurados nos pontos de observação. A diferença entre um valor estimado e um valor medido é denominada de erro de estimativa. A abordagem estatística com base na variância, usualmente conhecida por Krigagem, provê uma interpolação espacial, incluindo a estimativa de erro de variância, auxiliando na identificação do melhor padrão de distribuição (quadrado, triangular ou outro) e a melhor densidade, ou seja, o número de pontos por unidade de área.

Para o monitoramento da qualidade, Koreimann *et al.* (1996) e Nixon *et al.* (1998), sugerem uma densidade de 1 ponto de amostragem a cada 25 km² para áreas altamente impactadas e um ponto a cada 100 km² em outras áreas, com geologia homogênea e baixa variação de concentração para as substâncias analisadas. Não há uma definição do que seja uma área “altamente impactada” e os autores ressaltam que esta densidade está sendo testada em um estudo piloto.

Segundo (Califórnia, 2003), no estado da Califórnia (EUA), para programas de monitoramento de qualidade, foram adotados os seguintes critérios de densidade de poços:

- 1 poço a cada 25 km²;
- para bacias hidrográficas com menos de 500 km², deve haver pelo menos 20 pontos de monitoramento, em função de se obter significância estatística; e

- para Bacias Hidrográficas com mais de 1.500 km², não mais de 60 pontos de monitoramento devem ser selecionados, em função do custo-benefício.

Segundo Grath *et al.* (2001), para que os resultados obtidos de uma rede de monitoramento possam ser agrupados espacialmente, uma rede necessita ser estatisticamente projetada de forma a se obter homogeneidade na distribuição de pontos de amostragem. Esta homogeneidade é mensurada pelo Índice de Representatividade R_u , calculado em função da média das distâncias mínimas entre qualquer ponto na área de estudo e a estação de amostragem mais próxima e é expresso em porcentagem relativa a uma distribuição ideal. Para uma rede ser considerada homogênea, este índice não deve ser inferior a 80%. R_u pode ser calculado pela fórmula [1].

$$R_u = \frac{37,7}{\text{distméd} \times \sqrt{k / \text{Área}}} \quad [\%] \quad [1]$$

Onde:

- k = número de estações de amostragem
 dist méd = média das distâncias mínimas entre qualquer ponto na área de estudo e a estação de amostragem mais próxima (m)
 Área = tamanho da área monitorada (m²).

Para corpos hídricos com poucas estações de amostragem e o quadrado do comprimento deste corpo hídrico for maior do que o produto do tamanho da área pelo número de estações de amostragem ($\text{comprimento}^2 > K \times \text{área}$), então o índice de representatividade pode ser escrito em [2].

$$R_u = \frac{\sqrt[25]{\left(\frac{\text{Área}}{\text{comprimento}}\right)^2 + \left(\frac{\text{comprimento}}{k}\right)^2}}{\text{distméd}} \quad [\%] \quad [2]$$

No entanto, o procedimento mais utilizado na prática para determinação da localização dos pontos de amostragem é uma abordagem hidrogeológica, com base em julgamentos de especialistas. Há ainda a possibilidade de combinar as abordagens estatísticas com a hidrogeológica, dependendo do nível das informações disponíveis Uil *et al.* (1999).

Em relação a redes de monitoramento de nível d'água, Uil *et al.* (1999) descrevem que a caracterização do sistema de fluxo da água subterrânea é a primeira informação necessária para a distribuição horizontal dos pontos de observação. A localização vertical (profundidade) dos pontos de observação dependerá de informações litológicas do subsolo, identificando as camadas de aquíferos e de aquíclides.

Segundo (Kentucky Geological Survey, 2000), no estado Norte Americano de Kentucky, além dos pontos fixos de amostragem, a cada ano, 30 pontos diferentes são selecionados para complementar o monitoramento. Esta seleção é feita da seguinte forma:

- cada Unidade de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica (BMU do inglês Basin Management Unit) é dividida em quadrículas de 7,5 minutos (12,5 km) e cada quadrícula recebe um número. São sorteados 30 números aleatoriamente. Quadrículas nas quais já existam pontos de monitoramento são desconsideradas. Se não houver poços ou nascentes em uma quadrícula sorteada, seleciona-se uma quadrícula adjacente.
- em cada quadrícula sorteada, potenciais pontos de amostragem (poços e nascentes) são priorizados em função das suas condições construtivas e acessibilidade.
- a seleção final é feita apenas após a inspeção de campo, para assegurar a viabilidade de amostragem e obter permissão dos proprietários.

De modo geral, a caracterização de sistemas freáticos sedimentares necessitará de uma rede de monitoramento relativamente mais densa enquanto que para aquíferos profundos confinados ou semiconfinados, uma rede de monitoramento muito menos densa será suficiente. Para aquíferos fraturados, o nível de complexidade aumenta e a especificação da representatividade dos pontos de monitoramento será difícil, mesmo com intenso trabalho de especialistas (Uil *et al.*, 1999).

5.1.5 Seleção de parâmetros a serem determinados ou mensurados

Além dos parâmetros básicos, tradicionalmente utilizados para caracterização química da água como pH, temperatura, alcalinidade, condutividade elétrica, cloretos, sulfatos, cálcio, magnésio, sódio e parâmetros bacteriológicos, devem ser considerados os metais e semi-metais que são encontrados naturalmente nas águas subterrâneas em função do contato água-rocha, e também as substâncias que não ocorrem naturalmente e são advindas das atividades humanas potencialmente poluidoras, como os compostos orgânicos voláteis ou VOC's (do inglês *volatile organic compounds*).

Nixon *et al.* (1998), propõem uma lista de parâmetros indicadores de qualidade de águas subterrâneas, conforme apresentado no Quadro 5.

QUADRO 5 - LISTA DE PARÂMETROS INDICADORES DE QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Grupos	Parâmetros
Descritivos	temperatura, pH, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica
Íons maiores	Ca, Mg, Na, K, HCO ₃ , Cl, SO ₄ , PO ₄ , NH ₄ , NO ₃ , NO ₂ e carbono orgânico total.
Metais pesados	Hg, Cd, Pb, Zn, Cu, Cr.
Substâncias Orgânicas	Hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos halogenados, fenóis e clorofenóis
Pesticidas	Seleção em função do uso local e relatos de ocorrência na água subterrânea
Microbiológicos	Coliformes fecais e totais

Fonte: Nixon *et al.* (1998)

O Ministério do Meio Ambiente de Ontário (Canadá) estabeleceu grupos de substâncias a serem monitoradas semelhante ao proposto por Nixon *et al.* (1998), mas detalhando a lista de possíveis substâncias a serem monitoradas dentro de cada grupo. A escolha dos parâmetros deve variar em função do histórico da região (Ministry of Environment, 1998).

Segundo Belitz *et al.* (2004), os parâmetros a serem determinados no monitoramento da qualidade de águas subterrâneas podem ser assim agrupados:

1. proteção ao uso pretendido: potabilidade ou irrigação;
2. interpretação hidrogeológica: isótopos, traçadores para datação e substâncias orgânicas voláteis em baixas concentrações; e
3. detecção de substâncias não legisladas: contaminantes emergentes.

Estes autores propõem que nas amostras de todos os poços da rede de monitoramento sejam determinadas as substâncias do grupo 1. Em 75% dos poços, determinam-se também as substâncias do grupo 2 (com preferência para poços em aquíferos freáticos com nível d'água raso de forma a avaliar a idade da água de recarga e conseqüentemente a vulnerabilidade ao risco de poluição) e em 25% dos poços, as amostras devem ser analisadas também para os parâmetros do grupo 3.

Para Uil *et al.* (1999), a seleção dos parâmetros a serem determinados deve considerar (i) os usos e funções da águas subterrâneas; (ii) os riscos a que o aquífero está exposto e (iii) os problemas já existentes (contaminação). Neste último caso, é corrente o uso de parâmetros indicadores.

Segundo Foster *et al.* (2002), os parâmetros normalmente monitorados na rotina de sistemas de abastecimento, apesar de serem indicadores de potabilidade, provêm pouquíssimas informações em relação à presença ou ausência dos contaminantes mais freqüentemente encontrados nas águas subterrâneas, os metais e os solventes clorados.

Concordantemente, para Pocol e Valentin (2004), a vigilância da qualidade da água para consumo humano, que por muito tempo se pautou no monitoramento biológico e na análise laboratorial de alguns parâmetros básicos, já não responde às necessidades atuais. O contexto exige novas interpretações, tais como a avaliação das relações entre disponibilidade e demanda dos recursos hídricos, implicações da ocupação do território na qualidade dos mananciais, evolução dos processos tecnológicos de tratamento, além das situações que resultam na eutrofização dos mananciais ou na contaminação da água por *trihalometanos*, *cryptosporidium*, giárdias, metais e cianobactérias.

Com visto, a seleção de parâmetros a serem determinados no monitoramento pode ser realizada considerando-se as diferentes fontes potenciais de poluição de águas subterrâneas. Segundo Foster *et. al.* (2002), a classificação das atividades potencialmente poluidoras pela sua distribuição espacial dá uma impressão direta do tipo de perigo da contaminação provocada por esta atividade, bem como indica as metodologias de controle necessárias. Assim os autores classificam:

- fontes difusas de poluição geram plumas de contaminação não claramente definidas, mas geralmente impactam uma área e volume maiores ; e
- fontes pontuais de poluição normalmente causam uma pluma bem definida e mais concentrada, o que torna mais fácil sua identificação e às vezes o seu controle. Entretanto, quando atividades pontuais são pequenas e numerosas, elas representam essencialmente uma fonte difusa.

Os autores apresentam como exemplos de fontes difusas as fossas sépticas, pequenas oficinas e serviços (incluindo mecânicas, postos de serviço, etc.) que freqüentemente manipulam substâncias tóxicas, como solventes clorados e hidrocarbonetos aromáticos e atividades agrícolas com uso de pesticidas (inclusive em áreas urbanas), principalmente em cultivo de monoculturas.

Na maioria das cidades de países em desenvolvimento, o crescimento rápido da população urbana tem resultado em grandes áreas com fossas sépticas para tratamento de esgotos. Os contaminantes comumente associados a estes sistemas são os compostos nitrogenados (inicialmente há a formação de amônia que normalmente se oxida a nitrato), contaminantes microbiológicos (bactérias patogênicas, vírus e protozoários) e em alguns casos, substâncias orgânicas sintéticas. Dentre estes, o nitrato é o mais móvel e estável (persistente), dadas as condições normalmente oxidantes dos sistemas aquíferos superficiais (Foster *et al*, 2002). Segundo USEPA (2000), vastas contaminações de nitrato causadas por fossas sépticas individuais e lagoas de tratamento de esgoto é um significativo problema nos estados de Colorado e Arizona (EUA), demonstrando que isso não ocorre apenas nos países em desenvolvimento.

No passado, era prática, de algumas indústrias, o lançamento de efluentes brutos em poços tubulares perfurados no próprio terreno industrial. Apesar deste tipo de descarte estar totalmente proibido, restam os passivos ambientais decorrentes das atividades industriais pregressas. Além disso, tanques enterrados contendo produtos ou resíduos também têm provocado contaminação de águas subterrâneas. Na Região Metropolitana de São Paulo, a CETESB têm identificado contaminação nas águas subterrâneas por hidrocarbonetos de petróleo, solventes halogenados e diversos outros contaminantes. A relação de áreas contaminadas no estado de São Paulo pode ser acessada no endereço eletrônico www.cetesb.sp.gov.br.

Nitrato, cromo, bário, ferro, manganês, fluoretos e chumbo são outras substâncias que a Cetesb vem encontrando em poços tubulares perfurados no estado de São Paulo, algumas delas com origem antrópica (CETESB, 2004).

Em função do déficit de água que vem se desenhando, existem propostas de instalação de poços de injeção de águas residuárias tratadas para a recarga artificial de aquíferos do Estado de São Paulo. Segundo (Ohio, 1988), poços de injeção são considerados como uma fonte de poluição, de difícil caracterização em um programa de monitoramento em escala estadual. O fato de estes poços injetarem água diretamente nos aquíferos é motivo grande preocupação. Estes poços são também uma via direta para contaminações pontuais pela disposição ilegal de resíduos. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos também lista os poços de injeção entre as fontes potenciais de poluição, com diversos casos já reportados de contaminação comprovada (USEPA, 2000).

Quanto ao monitoramento da quantidade de águas subterrâneas, para Uil *et al.* (1999) e European Communities (2003), as principais informações a serem obtidas são nível d'água, direção e quantidade do fluxo das águas, identificação de áreas de recarga e descarga e ainda o balanço hídrico. Obviamente estas informações não são obtidas exclusivamente na rede de pontos de observação, mas também inferindo dados climatológicos, dados de vazão de poços cadastrados, perda das redes de água e esgoto, irrigação e interação com dados de vazão das águas superficiais.

Os diferentes tipos de aquíferos monitorados não refletem diferenças nos parâmetros de quantidade a serem observados. Entretanto, a interpretação dos dados será mais difícil em meios fraturados ou rochas consolidadas do que em sedimentos inconsolidados. Segundo Marcuello e Menéndez (2003), a rede de monitoramento de quantidade de águas subterrâneas (Eurowaternet Quantity) proposta pela Agência Ambiental Européia pretende obter dados de todo o ciclo hidrológico, havendo correlação entre sub-redes de observação de água subterrânea e sub-redes de monitoramento de dados climatológicos.

5.1.6 Freqüências de amostragem

Segundo UNEP/WHO (1986), para o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, são requeridas, no mínimo, 1 amostragem por ano em aquíferos grandes e estáveis e no máximo 4 amostragens por ano em pequenos aquíferos aluviais. Esta mesma recomendação pode ser observada em GEMS (2004).

Na Província de Ontário, o Ministério de Meio Ambiente estabeleceu, para monitoramento de qualidade, uma freqüência semestral de coleta de amostras em áreas prioritárias e anualmente em outras áreas (Ministry of Environment, 1998).

Segundo Nixon *et al.* (1998), a operação da rede européia de monitoramento de águas subterrâneas (EUROWATERNET) é realizada em bases cíclicas de 5 anos. O primeiro ano é destinado ao monitoramento de avaliação geral, caracterizando, química e hidrogeologicamente, os corpos hídricos subterrâneos, com amostragens, no mínimo, semestrais. Os resultados desta caracterização direcionam o monitoramento de vigilância, que é realizado durante os próximos 4 anos em aquíferos com indícios alteração das condições naturais ou risco de poluição. No monitoramento de vigilância, a freqüência mínima de amostragem é anual. No sexto ano, é realizada uma nova caracterização geral, que redefinirá a continuidade do monitoramento de vigilância.

Segundo Simoneti (1999), se a amostragem for muito freqüente, a informação obtida será redundante e cara, e se por outro lado, for realizada com uma freqüência muito baixa, alguma informação poderá ser perdida.

Para Uil *et al.* (1999), as concentrações de substâncias monitoradas podem ser estimadas entre campanhas de monitoramento, por interpolação. Quanto maior a freqüência de amostragem, menor será a variância dos dados e mais precisa será a estimativa das concentrações ao longo do tempo.

Segundo European Communities (2003), a freqüência de amostragem é dependente do regime de vazão e da vulnerabilidade. Aquíferos com velocidades rápidas de fluxo da água e/ou mais vulneráveis devem ser monitorados com freqüência maior (semestral) do que aquíferos confinados com fluxos mais lentos (anual até trianual). Quadro 6 apresenta as freqüências para monitoramento regional utilizadas na Alemanha, em função da vulnerabilidade.

QUADRO 6 - FREQUÊNCIAS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE UTILIZADAS NA ALEMANHA EM FUNÇÃO DA VULNERABILIDADE

Cenários de vulnerabilidade		Freqüências					
		Mensal	Trimestral	Semestral	Anual	Bianual	A cada 5 anos
aquífero poroso não confinado	Nível d'água < 3 metros	y	X	X	y		
	Nível d'água >10 metros,				y	X	X
aquífero fraturado não confinado	Nível d'água < 3 metros	y	X	X	y		
	Nível d'água >10 metros,		y	X	X		
Aquífero cárstico (sem cobertura impermeável)		X	X	X			
Aquífero cárstico (com cobertura impermeável)		y	X	X	y		
camada impermeável do aquífero confinado	< 2 m de espessura				X	X	y
	> 2 m de espessura				y	X	X
Elevadas taxas de recarga			y	X	X		
Avaliações de tendências				X	X		
Sazonalidade de atividades humanas			y		y		

X indica freqüências mais utilizadas **y** indica a amplitude de freqüências que dependem de circunstâncias particulares.

Fonte: European Communities (2003)

Segundo GEMS (2004), se o número de amostras deve ser limitado por questões de falta de recursos financeiros ou capacidade laboratorial, é preferível reduzir o número de estações de monitoramento do que aumentar o intervalo entre as amostragens (diminuir a frequência de amostragem), pois considera mais apropriado obter informações confiáveis de um ponto de monitoramento do que informações dúbias de vários pontos.

No monitoramento de quantidade de águas subterrâneas, segundo Uil *et al.* (1999), para identificar a alteração de uma variável em função do tempo, por exemplo, nível d'água, com certa confiabilidade, a frequência de medição deve ser ajustada aos possíveis eventos que causam ou causaram esta alteração. Estes eventos podem ser naturais, em função da recarga ocasionada pela sazonalidade de estações chuvosas e secas, ou antrópicas, em função dos regimes de exploração de água. Há a necessidade de várias medições durante o período em que estes eventos ocorrem.

Quando há disponível uma série de medições, é possível utilizar técnicas estatísticas para estabelecer uma frequência ótima. A amplitude de frequências observadas na prática varia de monitoramento contínuo, utilizando equipamentos dedicados, até frequência anual (Uil *et al.*, 1999).

5.1.7 Procedimentos de coleta, preservação, acondicionamento e transporte de amostras

O objetivo da amostragem é obter resultados que reflitam, o mais fielmente possível, as condições de qualidade da água no aquífero (Texas, 2004). A coleta de amostras de água é uma das etapas mais importantes para a correta interpretação hidroquímica, pois dela dependem todas as demais etapas, devendo-se evitar todos os possíveis meios de contaminação e perdas (Feitosa e Manoel Filho, 2000).

Segundo Landim (1979), para obter informações úteis a respeito da população é necessário (i) definir a população; (ii) que as amostras sejam representativas da população definida; e (iii) que as amostras sejam aleatórias, isto é, tenham sido coletadas com imparcialidade.

Um correto procedimento de coleta inicia-se no escritório, preparando-se uma lista para checagem de todos os itens necessários para a execução do trabalho de campo. Devem ser identificados os pontos a serem amostrados e parâmetros a serem determinados, elaborando um roteiro de viagem. Os proprietários dos poços, bem como os laboratórios, devem ser informados sobre a data da coleta. A seguir, deve ser verificado se todos os frascos, necessários para o número de amostras a serem coletadas e diferentes parâmetros a serem determinados, estão devidamente preparados, devendo haver material sobressalente para eventualidades (Texas, 2004). Nesta etapa, preparam-se também as fichas de coleta com as informações de identificação do ponto de coleta, da amostra e do coletor, que constarão do boletim analítico, bem como, os parâmetros que serão determinados nos laboratórios participantes do programa de monitoramento.

Os trabalhos de campo devem seguir um protocolo padronizado de amostragem, que é considerado, por diversos órgãos coordenadores de monitoramento de água, como fundamental para o controle da qualidade dos dados obtidos, principalmente quando esta atividade é desenvolvida por várias pessoas ou instituições diferentes, visando uniformidade de procedimentos.

Para que sejam minimizados os efeitos da água estagnada e que ocorra estabilização das condições do aquífero dentro do poço, há uma recomendação geral de retirada de um volume de água correspondente a no mínimo três vezes o volume da água dentro da obra de captação, ou seja, poço tubular ou poços de monitoramento. No caso de poços tubulares não estejam em operação no momento da coleta, o Departamento de Meio Ambiente e Conservação do estado do Tennessee (EUA), recomenda que se deve deixar a água bombeada escoar por, no mínimo, 20 minutos. (Tennessee, 1998). Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), a coleta de amostras d'água num poço deve ser realizada após o seu bombeamento por 3 a 5 minutos.

Em poços de monitoramento, a purga pode ser efetuada por meio de bombas ou, manualmente, utilizando-se um *bailer*. Normalmente a purga é feita em um dia e a coleta de amostras de água é feita no dia seguinte, após a recuperação do poço. No caso de poços instalados em formações com condutividade hidráulica muito baixa, a aplicação

dos procedimentos normais de purga leva ao completo esgotamento dos mesmos, causando um aumento significativo do gradiente hidráulico em volta do poço, alterando o fluxo natural da água na formação e no pré-filtro, que passa a ser turbulento. O uso de *bailer* para purga e amostragem costuma causar aeração do meio a aumentar a turbidez da água devido ao aumento da concentração de sedimentos. Quando a amostra turva é acidificada (de acordo com as técnicas de preservação de amostras para metais), os íons metálicos, que inicialmente estavam adsorvidos ou faziam parte dos minerais de argila que compõe a formação, são liberados, causando uma elevação da concentração de metais na amostra, tornando-a não representativa. Além disto, o procedimento de purga pode levar a perdas de substâncias voláteis.

Para evitar estes inconvenientes, Puls e Barcelona (1996) descrevem métodos de coleta com purga mínima, aplicáveis principalmente em poços de monitoramento. A purga mínima requer a remoção do menor volume possível de água, previamente ao início da coleta e as vazões de bombeamento devem ser menores do que 1 L/minuto. Uma vantagem deste método é o baixo volume de água gerado na purga, diminuindo problemas de descarte. Mas uma desvantagem é o tempo para realizar a coleta, podendo levar várias horas até que ocorra estabilização dos parâmetros indicadores.

Foster *et al.* (2002) também descrevem que, a amostragem em poços de produção, feita na torneira existente no cavalete durante a rotina de operação de bombeamento, pode levar à modificações nas características físico-químicas das amostras de água subterrânea, que freqüentemente não são consideradas na interpretação dos resultados de monitoramento de qualidade de águas subterrâneas. Isto ocorre devido aos seguintes processos:

- oxidação e precipitação de íons metálicos dissolvidos e outros constituintes sensíveis a mudanças de Eh, devido à entrada de ar no poço, causada pelo bombeamento;
- volatilização, causando perda de compostos como hidrocarbonetos e solventes orgânicos; e
- modificação do pH devido à perda de gases dissolvidos, como o CO₂.

Algumas normas nacionais e internacionais oferecem subsídios para um procedimento de coleta adequado. Assim, pode ser citada a Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13.895/97 – Poços de monitoramento e amostragem, que estabelece os critérios de preservação, transporte e validade de amostras. Segundo (European Communities, 2003), a norma da *International Standardization Organization* (ISO), nº 5667-11 (1993) fornece os princípios para os métodos de amostragem de águas subterrâneas, identificação e transporte de amostras. A norma ISO nº 5667-2 fornece informações gerais sobre a escolha do material dos equipamentos de coleta. Geralmente, são preferíveis os de polietileno, polipropileno, policarbonato e vidro. Frascos opacos devem ser utilizados se o parâmetro a ser determinado degrada com a luz, como por exemplo, alguns pesticidas.

Os equipamentos para retirada de amostras vão variar em função do tipo de ponto de amostrados. No caso de nascentes ou poços tubulares equipados bomba, as amostras podem ser coletadas diretamente nos frascos onde serão acondicionadas. No caso de poços tubulares não equipados ou poços de monitoramento, há a necessidade de equipamentos intermediários para a coleta. O Quadro 7 apresenta os equipamentos que podem ser utilizados, em função das características dos poços e dos parâmetros a serem determinados.

QUADRO 7 – EQUIPAMENTOS ADEQUADOS PARA COLETA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS POÇOS E DOS PARÂMETROS A SEREM DETERMINADOS

Equipamentos de Amostragem	Profu. Máxima (m)	Diâmetro Mínimo do Poço (polegadas)	Inorgânicos							Orgânicos			Bacteriológico
			Cond Elét.	pH	Eh	Íons	Metais Traços	NO ₃ e F	Gases dissolv	Não Voláteis	Voláteis	TOC	Coliformes
Bailer	Sem limite	½	x			x	x	x		x			x
Amostrador Tipo Seringa	Sem limite	1½	x	x	x	x	x	x		x			x
Bomba de Bexiga	124	1½	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bomba Elétrica Submersível	50	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Bomba de Pistão	155	1½	x			x	x	x		x			
Bomba Peristáltica	8	½	x			x		x		x			

Fonte: Fetter (1993)

Cada amostra coletada deve ser acondicionada em frascos devidamente identificados de tal forma que não permita ambigüidade, devendo ser acompanhados por ficha previamente preparada e preenchida com dados da operação de coleta, contendo as informações que a caracterize perfeitamente como data da coleta, condições climáticas e outras informações que possam auxiliar na interpretação dos resultados, bem como medições efetuadas em campo de pH, temperatura, vazão de bombeamento e profundidade do nível d'água (Feitosa e Manoel Filho, 2000).

Segundo (Texas, 2004), no caso de determinação de substâncias dissolvidas na água, a amostra coletada deve ser filtrada em campo, em filtro de papel de 0,45 μm . Em caso de determinação de constituintes inorgânicos totais, deve ser analisado o resíduo retido no filtro ou ainda, outra amostra independente deve ser coletada e preservada sem filtração.

Segundo Puls e Barcelona (1996), amostras filtradas evitam a influência de interferentes, que podem ser sazonais, tornando as amostras coletadas em diferentes épocas comparáveis entre si, e desta forma, representando melhor as tendências reais das concentrações ao longo do tempo. Entretanto, o procedimento de filtração deve ser realizado com muito critério, pois metais podem ser desorvidos do material do filtro, contaminando a amostra. Além disso, no estado de São Paulo, a CETESB utiliza os padrões de potabilidade, definidos em legislações, como limite máximo aceitável na água. Como estes padrões são estabelecidos na forma de concentrações totais, as amostras não são filtradas.

Para acondicionamento, preservação e prazo de validade de amostras de água, a CETESB utiliza os critérios descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, 20th ed., 1998, conforme descritos no Quadro 8.

QUADRO 8 - FRASCOS UTILIZADOS, MÉTODOS DE PRESERVAÇÃO, VOLUME DE AMOSTRA NECESSÁRIO E PRAZO DE VALIDADE DAS AMOSTRAS, POR PARÂMETRO

Parâmetro	Frasco	Preservação	Volume (mL)	Prazo de Validade
Acidez/alcalinidade	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	24 horas
pH	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	2 horas
Condutividade	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	28 dias
Fluoreto	P	Não requerida	500	28 dias
Dureza	P, V	Adicionar HNO ₃ até pH<2	500	6 meses
Metais, Boro, Arsênio e Selênio	P, V ⁽¹⁾	Adicionar HNO ₃ até pH<2 (2)	500	6 meses
Sulfato.	P, V ⁽¹⁾	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	28 dias
Nitrogênio amoniacal, nitrato, kjeldahl. Fósforo total	P, V	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH<2	500	7 dias
Nitrito e Cloreto	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	48 horas
Sólidos totais	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	1000	7 dias
Sólidos filtráveis	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	1500	24 horas
Carbono Orgânico. Dissolvido	Frasco de OD	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH 3,5 - 4,5 e refrigerar à 4°C		
Solventes Halogenados	FA	Preencher totalmente o frasco e refrigerar à 4°C	60 mL	
Benzeno	FA	Preencher totalmente o frasco e refrigerar à 4°C	60 mL	

(1) lavar com solução a 10% de HNO₃ e enxaguar com água tipo III (destilada ou osmose reversa).

(2) Para determinação de espécies químicas dissolvidas, filtrar a amostra no momento da coleta.

P : frasco de polietileno ou equivalente. V : frasco de vidro borosilicato. FA : frasco de âmbar com tampa esmerilhada.

5.1.8 Metodologias analíticas

As metodologias analíticas dependerão principalmente dos limites de quantificação desejados. Deve haver comparabilidade entre resultados obtidos em diferentes laboratórios, quando se pretende criar um banco de dados único para armazenar estes resultados.

Para avaliar a qualidade da água em relação à sua potabilidade, os limites de quantificação devem estar abaixo dos padrões estabelecidos pelas autoridades sanitárias. A legislação que está em vigor no Brasil, desde 2004, é a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde (Ministério da Saúde, 2004).

Entretanto, para a avaliação da qualidade natural, para estabelecimento de valores de referência de qualidade e para identificar tendências de aumento de concentrações, os limites de potabilidade podem ser considerados elevados, visto que em sua maioria, já indicam risco à saúde humana. Assim, os métodos analíticos devem possibilitar a quantificação de concentrações bem menores.

5.1.9 Controle de Qualidade e de Confiança

Erros nos dados de monitoramento levarão a erros na avaliação da condição do corpo hídrico monitorado. Um controle de qualidade em todos os procedimentos, desde a seleção de pontos de amostragem até análises laboratoriais, reduz a possibilidade de ocorrência de erros (European Communities, 2003).

Segundo Grath *et al.* (2001), algumas estratégias na operação da rede de monitoramento para garantir a qualidade dos dados obtidos são:

- deve haver continuidade dos pontos de amostragem e no caso de necessidade de substituição, isto deve ser feito de modo a não alterar o objetivo do monitoramento;
- em uma série temporal, algumas campanhas analíticas podem não ser realizadas, mas a falta de dois ou mais dados consecutivos deve ser evitada;
- em caso de frequências anuais, as amostras devem ser coletadas dentro do mesmo período do ano, para evitar efeitos da sazonalidade; e
- os procedimentos de coleta e análise devem ser uniformizados, de forma a garantir comparabilidade dos dados.

Para um melhor controle de qualidade, no estado Americano de West Virginia, antes do início das campanhas de amostragem, é realizado, com as equipes de campo, um treinamento intensivo sobre os procedimentos de coleta, incluindo a preparação de uma amostras denominadas brancos de campo, para controle laboratorial (West Virginia, 2004).

Segundo Fetter (2001), a amostra “branco de campo” é utilizado para avaliar se os procedimentos de campo estão contaminando a amostra. Para isso, um frasco selado contendo água deionizada é levado ao campo, armazenado junto com as amostras

coletadas e enviado ao laboratório para análise. Caso sejam detectados solutos nesta água, devem ser investigados os procedimentos de campo e laboratoriais.

O controle da qualidade laboratorial é um assunto complexo que foge ao objetivo dessa dissertação. Entretanto, deve ser citada a norma NRB ISSO/IEC 17025/01, que trata dos requisitos gerais para competência de laboratório de ensaios e calibração. Segundo esta norma, o laboratório deve estabelecer, implementar e manter um sistema de qualidade apropriado ao escopo das suas atividades e documentar suas políticas, sistemas, programas, procedimentos e instruções, na extensão necessária para assegurar a qualidade dos resultados de ensaios e calibrações. As políticas e objetivos do sistema de qualidade do laboratório devem estar definidos em um manual da qualidade. A CETESB segue esta Norma e produziu um manual interno de qualidade laboratorial.

Além disso, podem ser citadas duas técnicas laboratoriais básicas para checar a confiabilidade dos resultados obtidos. A primeira verifica a exatidão analítica, ao comparar os resultados obtidos da análise de uma amostra com concentrações padrões conhecidas. A segunda verifica a precisão, ou seja, a habilidade do laboratório em reproduzir resultados, submetendo para análise, amostras em duplicatas não identificadas. Fetter (2001) recomenda que 10 % das amostras coletadas sejam enviadas em duplicatas para o laboratório.

Um outro método de avaliação da qualidade dos resultados é o cálculo do balanço iônico, onde é calculado o erro prático. Segundo Feitosa e Manoel Filho (2000), em uma análise hidroquímica completa, a concentração total de íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração total de íons negativos (ânions). O desvio percentual desta igualdade é determinado pelo coeficiente de erro da análise (e%), conforme [3]

$$e\% = \left[\frac{r \sum p - r \sum n}{r \sum p + r \sum n} \right] \times 100 \quad [3]$$

onde

= concentração total de cátions em miliequivalente por litro (meq/L)

$r \sum n$ = concentração total de ânions em miliequivalente por litro (meq/L)

Para um coeficiente de erro (e%) não superior a 10, a análise pode ser considerada correta. Elevados valores de e% podem indicar: (i) um erro analítico; (ii) um erro de cálculo; (iii) a presença em concentrações apreciáveis de certos íons não analisados; e (iv) águas muito pouco mineralizadas (Feitosa e Manoel Filho, 2000).

Estes autores alertam, entretanto, que na análise de águas com baixas concentrações iônicas, métodos analíticos menos precisos podem levar a elevados valores de e%, sem que isso indique necessariamente um erro analítico.

Custódio e Llamas *apud* Feitosa e Manoel Filho (2000) definiram o cálculo do erro prático (Ep%) como sendo:

$$Ep\% = \left| \frac{r \sum n - r \sum p}{\frac{1}{2}(r \sum n + r \sum p)} \right| \times 100 \quad [4]$$

Para avaliação do erro prático, os autores estabeleceram um erro teórico máximo permitido, calculado em função da condutividade elétrica da água, conforme apresentado no Quadro 9.

QUADRO 9 - ERRO MÁXIMO PERMITIDO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA

Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	50	200	500	2.000	>2.000
Erro prático Permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fonte: Custódio e Llamas *apud* Feitosa e Manoel Filho (2000)

Quanto ao controle de qualidade no armazenamento dos dados, Bertachini (1987), avaliando as características hidrogeológicas de terrenos Cristalinos na Região de Jundiá, cita que programa “Consistência” verifica a qualidade dos resultados analíticos das águas subterrâneas, por meio dos seguintes procedimentos:

- lista os parâmetros analisados para cada amostra;
- converte as unidades expressas em miligramas por litro (mg/L) para miliequivalente grama por litro (meq/L);
- calcula a soma dos ânions e cátions;
- calcula a diferença em dias entre as datas de coleta e análise;
- verifica se a dureza total é compatível com o conteúdo em cálcio e em magnésio de cada amostra;
- calcula o resíduo seco a partir dos íons analisados e compara com resíduo seco determinado;
- compara o pH de campo com o de laboratório;
- calcula o erro prático e o erro teórico, indicados pelo balanço iônico;
- compara a soma de ânions e cátions com a condutividade elétrica; e
- indica os erros mais prováveis dos parâmetros físico-químicos de cada amostra, possibilitando o aproveitamento dos demais parâmetros.

Uil *et al.* (1999), informam que, na Holanda, há um procedimento de verificações sucessivas dos dados obtidos no monitoramento das águas subterrâneas, antes e após a digitação destes em um banco de dados. O objetivo destas conferências é a diminuição de erros de digitação e excluir dados inconsistentes, como por exemplo, valores acima ou abaixo de um intervalo possível de ocorrência. Uma vez inseridos no banco de dados, os registros são checados automaticamente por uma série de verificações de consistência. Por exemplo, para o monitoramento da qualidade, é calculado o balanço iônico, a diferença entre a condutividade calculada e aquela medida, além de detectar valores discrepantes não realísticos. Para o monitoramento da quantidade, é verificado se o nível d'água não está abaixo da profundidade dos filtros do poço.

Lack *et al.* (2003) desenvolveram um índice de qualidade de dados, que considera as etapas de coleta, de análise e de gerenciamento dos dados e varia de 0 a 12. Quanto maior for o índice, mais confiáveis serão os dados obtidos no monitoramento. Os critérios que compõem este índice são apresentados no Quadro 10.

QUADRO 10 – ESTABELECIMENTO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE DADOS OBTIDOS EM MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Aspectos considerados	Nota em caso afirmativo
amostragem realizada seguindo protocolos e por equipe treinada	1
laboratórios utilizados são acreditados por órgãos nacionais	1
laboratórios sujeitos a auditoria externa	1
existem requerimentos numéricos de acurácia para as substâncias determinadas	2
laboratórios desenvolvem testes, indicando a precisão das análises, a taxa de recuperação e os limites de detecção	1
laboratórios produzem fluxogramas de rotinas de controle de qualidade	3
o programa de monitoramento está incluído na rotina de testes inter-laboratoriais	2
os dados de monitoramento são automaticamente avaliados por programa computacional para detectar dados estatisticamente anômalos ou não usuais, antes de serem armazenados em banco de dados	1

Fonte: LACK *et al.* (2003)

5.1.10 Tratamentos Estatísticos

A análise estatística é uma etapa importante da avaliação da condição de um corpo hídrico. Segundo Yamamoto (2003), esta análise permite sumarizar os dados obtidos, conferir a base de dados, que deve estar isenta de erros de digitação e reconhecer valores anômalos.

Segundo Kitanidis (1997), é importante que o responsável pela análise estatística manuseie os dados, mesmo que sejam utilizados programas computacionais estatísticos. Isto permite a familiarização com os dados, de forma a distinguir valores “suspeitos”.

Assim, antes da análise estatística propriamente dita, é preciso um tratamento prévio dos dados para conhecer a sua distribuição, eliminar aqueles considerados discrepantes e regularizar os resultados menores do que o limite de quantificação ou de detecção (<LQ).

Para resultados expressos como “menor do que o limite de quantificação”, na avaliação da qualidade da água subterrânea, Grath *et al.* (2001) recomendam substituir estes resultados pelo valor deste limite dividido por dois, ou seja, substituir <LQ por $LQ/2$. Entretanto, primeiramente deve ser feito um teste de consistência da seguinte forma: substituir os resultados <LQ por zero e obter a média A do conjunto total de dados; substituir os resultados <LQ por LQ e obter a média B; e calcular a relação A/B. Se o resultado de A/B for $\geq 0,6$ a avaliação da qualidade do corpo hídrico utilizando $LQ/2$ pode ser feita sem restrição. Caso contrário, as afirmações sobre a qualidade serão limitadas. Estes autores recomendam ainda que, nos monitoramentos de verificação da qualidade da água utilizada para um determinado uso, o limite de quantificação não deve ser maior do que 60% do padrão estabelecido para aquele uso.

Segundo UIL *et al.* (1999), os métodos para tratamento estatístico dos dados obtidos no monitoramento podem ser divididos em: (i) estatística clássica; (ii) geoestatística; e, (iii) séries históricas.

A **estatística clássica** pode ser aplicada para determinar um valor de referência (CETESB, 2001), a média, a mediana, os quartis, as medidas de dispersão, a simetria, distribuição e identificação de valores extremos, onde a média representa o centro de conjunto de dados e existem variações como a média aritmética, geométrica e harmônica. A mediana, ou percentil 50%, é o valor central da distribuição dos dados, quando estes são agrupados em ordem crescente de magnitude. Uma importante propriedade da

mediana é que esta, em contraste com a média, é pouco influenciada por um único resultado extremo, ou seja, é mais robusta, principalmente quando há poucos dados.

Para verificar a dispersão dos dados em relação à média, as medidas mais comumente utilizadas são a variância e o desvio padrão. A variância está intimamente ligada com a precisão da estimativa. Mas como é uma função da média, também é fortemente influenciada por valores extremos. Uma medida de dispersão mais robusta é o Interquartil (IQ).

Segundo Nixon *et al.* (1998), a proposta da Agência Europeia de Meio Ambiente EEA, é que os dados de monitoramento de cada País-Membro sejam agrupados por corpo hídrico monitorado, por ano de amostragem e na forma de percentis (10, 25, 50, 75, 90), média, máximos e mínimos e valores extremos. As tendências de comportamento das características de qualidade e quantidade devem ser calculadas e a visualização dos resultados deve ser feita por meio de tabelas, figuras e mapas de isovalores com a localização de pontos de amostragem.

Segundo Helsel e Hirsch apud Fischer e Goodman (2002), medidas estatísticas como média e desvio padrão comumente não representam precisamente a distribuição dos dados de qualidade da água. Assim, o Serviço Geológico do estado de Kentucky (EUA) utiliza medidas estatísticas não paramétricas para sumarizar as concentrações detectadas. A combinação entre listas de valores de quartis (mínimo, 1º quartil, mediana, 3º quartil e máximo) com a visualização gráfica (diagramas de *Box-and-whisker*) parece ser melhor para o público em geral. Estes gráficos facilitam a comparação de resultados analíticos entre bacias hidrográficas ou entre aquíferos (Kentucky Geological Survey, 2000).

Em muitas aplicações o gráfico tipo *Box-and-whisker*, conforme esquematizado na Figura 6, é o melhor método para representar graficamente informações sobre a distribuição experimental de dados, particularmente se o número de medidas é pequeno (menos que 50). O quartil superior (75%) e o inferior (25%) dos dados definem, respectivamente o topo e fundo de um retângulo (a “caixa”) e a mediana (50%) é retratada

por um segmento de linha horizontal dentro da caixa. A partir do quartil superior, segue uma linha reta vertical ligando ao valor máximo e o mesmo procedimento liga o quartil inferior ao valor mínimo. Os valores máximo e o mínimo devem satisfazer à condição de ser menor ou igual a 1,5 vezes o valor do interquartil (IQ). O critério de $1,5 \times \text{IQ}$ é uma convenção útil e é até certo ponto arbitrário. A essência do critério é que para dados com distribuição normal, a probabilidade de uma medida estar fora deste limite é muito pequena.

Pode-se julgar se os dados são distribuídos simetricamente conferindo se a mediana localiza-se no centro da caixa e se as linhas verticais são de aproximadamente o mesmo comprimento. O comprimento das linhas verticais mostra quão alongada seria a cauda de um histograma. Valores superiores ou inferiores aos limites máximos e mínimos, respectivamente, são representados com círculos ou asterisco e são conhecidos como valores extremos ou discrepantes (Kitanidis,1997 e Ohio,2003).

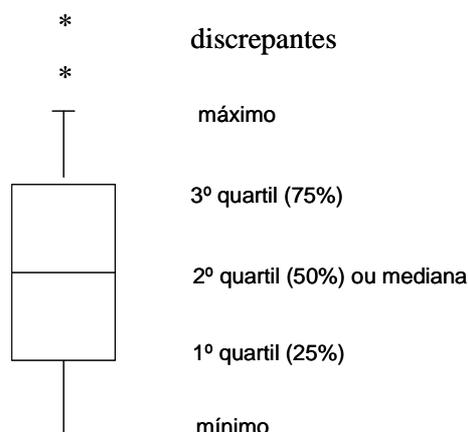


FIGURA 6 – ESQUEMATIZAÇÃO DE GRÁFICO BOX-AND-‘WISKERS

Grath *et al.* (2001), propuseram para a Comunidade Européia a utilização da média aritmética para agregação de resultados analíticos para representar a qualidade de um corpo hídrico subterrâneo. Mas, ao invés de utilizar simplesmente a média dos dados, deveria ser utilizado também o limite de confiança, que é um intervalo entre limites superiores e inferiores à média. A amplitude deste intervalo reflete as incertezas na estimativa da média verdadeira. Quanto menor esta amplitude, mais preciso é o resultado

final. O limite de confiança decresce com o aumento do número de pontos de monitoramento ou com o decréscimo da variabilidade das concentrações de uma determinada substância e é aplicável mesmo para poucas estações de monitoramento, no mínimo 3, assumindo-se uma distribuição normal (nem sempre verdadeira) e variações não extremas dos resultados analíticos. Já para a utilização de médias ou percentis, o requerimento mínimo estatístico é de 10 estações.

A **análise geoestatística** é realizada quando o parâmetro é descrito em função do espaço, em particular e interpolação espacial. Sendo uma função espacial, esta variável tem sido denominada de Regionalizada (Matheron; Journel e Huijbregts, *apud* Uil *et al.*, 1999). Valores de amostras de locais vizinhos tendem a ser mais parecidos entre si do que com aqueles valores obtidos em locais mais distantes. Estas estruturas de correlação são usualmente representadas pela covariância e semivariogramas.

Segundo Yamamoto (2003), após a análise geoestatística, na qual os variogramas experimentais foram calculados e os modelos teóricos foram ajustados, pode-se calcular as estimativas (interpolação) pela técnica de krigagem ordinária. Isto é feito, por exemplo, para gerar mapas de isovalores. Em geral as diferenças entre média aritmética e média de krigagem diminuem se a rede de monitoramento é homogeneamente projetada e representativa dos impactos antrópicos e das condições ambientais. Em função da interpretação geoestatística, é possível reavaliar a distribuição dos pontos de amostragem, diminuindo estações onde a variância é pequena e ao contrário, adensando a malha de amostragem em locais de maior variabilidade (Grath *et al.*, 2001).

A **análise das séries históricas** é realizada quando o parâmetro é descrito em função do tempo, calculando as tendências de aumento ou diminuição dos valores obtidos no monitoramento. Esta análise é dependente da frequência de amostragem e do período considerado. A análise de regressão é uma técnica representante deste tipo de método estatístico. (Grath *et al.*, 2001).

O Comitê Europeu formalizado para detalhar os tratamentos estatísticos a serem aplicados em atendimento à Directiva Europeia de Águas, disponibilizou um modelo

matemático denominado Gwstat, para realizar os cálculos de tendências, agregação de resultados (médias), bem como avaliar a distribuição dos pontos de amostragem. Este modelo pode ser adquirido livremente na página eletrônica: www.wfdgw.net (GRATH *et al.*, 2001).

5.1.11 Interpretação dos resultados

Segundo a Diretriz da Comunidade Econômica Européia para Águas, um corpo hídrico subterrâneo pode ser considerado em boas condições em relação à quantidade quando a reserva disponível não é excedida pela média anual das taxas de exploração, que também não devem afetar negativamente a vazão dos corpos d'água superficiais ou de ecossistemas diretamente dependentes. Por último, as alterações antrópicas na direção de fluxos das águas subterrâneas não devem causar intrusão salina ou outras intrusões (European Communities, 2000).

Em relação à qualidade, a Diretriz da Comunidade Econômica Européia para Águas estabelece que um corpo hídrico subterrâneo pode ter sua condição classificada com “boa” se atender a três critérios simultaneamente:

- i) as concentrações das substâncias monitoradas não devem indicar efeitos de intrusão salina ou outras intrusões, medido pelas alterações na condutividade elétrica;
- ii) as concentrações das substâncias monitoradas não devem exceder os padrões de qualidade; e,
- iii) a concentração das substâncias monitoradas não deve ser tal que afete a qualidade das águas superficiais ou ecossistemas associados.

O controle da quantidade pode ser entendido também com um elemento de garantia da boa qualidade das águas. A superexploração da água subterrânea, em função da interconexão, pode ter impacto na qualidade das águas superficiais para a manutenção da vida aquática e dos ecossistemas terrestres adjacentes.

Grath *et al.* (2001), estabelecendo as bases estatísticas a serem observadas no cumprimento da Diretiva Européia de Águas, propõem um sistema de alerta onde, se o limite de confiança superior da média aritmética atingir um valor maior do que 75% do

padrão estabelecido, então há indício de que a condição da água está sendo alterada e é preciso intensificar as operações de monitoramento.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) utiliza os Padrões de Potabilidade, atualmente estabelecidos pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde para avaliar a qualidade das águas subterrâneas. Considerando que os padrões de potabilidade são estabelecidos com base em risco à saúde humana, estes são adotados como Valor de Intervenção para as águas subterrâneas (CETESB, 2004).

Entretanto, é preciso avaliar não somente os resultados de cada substância isoladamente, mas o conjunto de informações que o monitoramento é capaz de fornecer. Em estudos recentes da Universidade Norte Americana de Wisconsin-Madison, os pesquisadores têm notado que misturas de pesticidas e nitrato podem ter efeitos sinérgicos sobre a biota, mesmo nas concentrações em que estes contaminantes não ofereceriam riscos se considerados isolados. Por exemplo, a mistura de aldicarb, atrazina e nitrato pode influenciar os sistemas endócrino e imunológico e afetar a saúde neurológica. Crianças e fetos são os mais afetados (USEPA, 2000).

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), no estado de São Paulo e a Universidade Federal da Bahia, estão desenvolvendo critérios para o estabelecimento de um Índice de Qualidade de Águas Subterrâneas (IQAS), que considere vários parâmetros simultaneamente e que reflita as condições de tratabilidade da substância em desacordo com os padrões estabelecidos (CETESB, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Segundo o Departamento de Saúde e Controle Ambiental do estado da Carolina do Sul (EUA), as concentrações das substâncias determinadas para uma região ou para um aquífero podem ser utilizadas como um indicador para comparar com as concentrações encontradas em uma área potencialmente contaminada, mas não dispensam o estudo específico para determinar o valor de referência para um local específico, em casos de investigação ambiental (South Caroline, 2004).

5.1.12 Elaboração de relatórios

Segundo Simoneti (1999), toda informação obtida com a rede de monitoramento deve ser analisada e retornada às instâncias de decisão e planejamento por meio de relatórios, sendo importante a definição de freqüência de emissão de relatórios para que seja gerenciado o fluxo de informações.

Para Uil *et al.* (1999), os relatórios são utilizados para fornecer aos diferentes usuários, as informações que respondam às expectativas geradas pelo propósito do monitoramento e devem ser, preferencialmente, padronizados. A utilização de sistemas de informações georeferenciadas (SIG) facilita a análise e apresentação dos dados obtidos no monitoramento.

Segundo (Kentucky Geological Survey, 2000), os mapas de qualidade de águas subterrâneas devem apresentar a distribuição de pontos de coleta e as diferentes unidades geológicas. Os valores de concentração devem ser agrupados em três ou quatro categorias por que, mais que isso, a interpretação visual torna-se difícil. Exemplos de linha de corte podem ser os quartis estatísticos e o padrão de potabilidade para a substância analisada.

5.2 Seleção de critérios a serem adotados no estado de São Paulo

Com base na experiência na operação da rede de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo e na revisão de literatura efetuada, foram estabelecidas as etapas, atividades e subatividades do monitoramento, conforme apresentado o Quadro 11, bem como, os critérios que nortearão o desenvolvimento das sub atividades, descritos em seqüência .

QUADRO 11 - ETAPAS, ATIVIDADES E SUB ATIVIDADES DO MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

ETAPAS	ATIVIDADES	SUB ATIVIDADES
PROJETO DE REDE	CONCEPÇÃO	Objetivos do monitoramento
		Bases Legais
		Órgãos coordenadores e executores
		Recursos financeiros e humanos (Logística)
IMPLANTAÇÃO	DIMENSIONAMENTO	Seleção do corpo hídrico a ser monitorado
		Decisão do número de pontos de amostragem
		Seleção dos pontos de amostragem
		Definição da frequência de amostragem
OPERAÇÃO	REALIZAÇÃO DE COLETA DE AMOSTRAS	Preparação das campanhas de coleta
		Realização das coletas - técnicas de amostragem, preservação e transporte de amostras
	ANÁLISES LABORATORIAIS	Definição de metodologias analíticas
	GERENCIAMENTO DAS INFORMAÇÕES	Controle do erro analítico e consistências
		Armazenamento de informações consolidadas
		Inclusão de informações de outras origens
		Interpretação estatística
		Elaboração de mapas temáticos e boletins
	Divulgação e disponibilização de resultados	
CONTROLE DE QUALIDADE	Necessário em todas as etapas do processo	
VALIDAÇÃO	UTILIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES GERADAS	Avaliação quanto ao atendimento aos objetivos propostos
		Aperfeiçoamento do projeto e/ou operação do monitoramento.

5.2.1 Objetivos gerais de monitoramento de águas subterrâneas

Os objetivos do monitoramento ambiental de qualidade e quantidade das águas subterrâneas em escala regional são:

- caracterizar a qualidade natural das águas subterrâneas dos corpos hídricos subterrâneos prioritários por bacias hidrográficas;
- caracterizar os parâmetros hidrogeológicos os corpos hídricos subterrâneos;
- caracterizar a condição de nível d'água nos corpos hídricos subterrâneos prioritários por bacias hidrográficas;
- determinar a interação da pluviometria com as variações de nível d'água dos aquíferos;
- avaliar as tendências dos parâmetros monitorados, em períodos de 10 anos;
- identificar áreas com alterações de qualidade e/ou quantidade;
- avaliar influência de fontes de poluição na qualidade das águas, subsidiando o seu controle;
- subsidiar a formulação de ações de proteção da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas; e
- avaliar a eficácia dessas ações a longo termo.

Além dos objetivos gerais, na efetivação do projeto de monitoramento, devem ser estabelecidos objetivos específicos como, por exemplo, elaborar mapas potenciométricos para os corpos hídricos monitorados, refinar modelos conceituais de fluxo de águas subterrâneas e estabelecer valores de referência que qualidade para uma determinada bacia hidrográfica.

5.2.2 Definição dos órgãos coordenadores, executores e colaboradores

A coordenação das atividades de monitoramento deve ser de atribuição conjunta entre os órgãos estaduais que emitem licença de fontes pontuais de poluição (órgão ambiental) e os que outorgam a captação das águas subterrâneas (gestores da quantidade dos recursos hídricos). Entretanto, a operação de uma rede de monitoramento, de forma

a atender satisfatoriamente aos múltiplos objetivos estabelecidos, não deve ser executada apenas por estes órgãos, em função das especificidades e dos limitados recursos humanos e financeiros disponíveis, sendo de fundamental importância a participação das prefeituras municipais e da Agência de Bacia.

Assim, propõe-se que a CETESB e o DAEE implantem a rede integrada de qualidade e quantidade, consultando os institutos de pesquisa em geologia, universidades e a Secretaria Estadual de Saúde. A Agência de Bacia deverá ficar responsável pela manutenção da rede, substituindo os pontos de monitoramento desativados ao longo do tempo, bem como utilizará os resultados obtidos, na proposição de ações de prevenção e melhoria da condição da água subterrânea.

Para a integração entre os diversos órgãos que executam monitoramento de água subterrânea deve ser dada ênfase aos seguintes aspectos:

- compartilhamento das informações;
- compartilhamento da responsabilidade de coleta de dados;
- desenvolvimento de um protocolo mínimo de amostragem e análise;
- compartilhamento de treinamentos especializados;
- colaboração na interpretação dos dados;
- compartilhamento das capacidades laboratoriais;
- desenvolvimento de formatos padronizados para envio de dados eletrônicos sobre o monitoramento;
- desenvolvimento de um sistema de informações geográficas que possa ser acessado, pelos órgãos participantes e público em geral, via Internet; e
- os órgãos participantes mantêm a propriedade sobre os dados que coletam e devem realizar esforços para assegurar que os dados compartilhados tenham o máximo possível de padronização.

Para o compartilhamento das informações, propõe-se que a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) seja a gerenciadora do sistema de informação, em função da sua capacidade instalada para execução de ensaios laboratoriais, da sua capacidade de suporte em informática e por controlar as fontes

potenciais de poluição. Deve ser mencionado que a CETESB já está desenvolvendo um sistema de informação para gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo, que poderá ser utilizado de forma compartilhada com as demais instituições envolvidas.

Quanto à responsabilidade pelas coletas, a CETESB e o DAEE devem elaborar protocolos de amostragem e análise para que funcionários das prefeituras municipais sejam treinados para realizar as coletas e as medições necessárias. A Secretaria Estadual da Saúde, que também realiza coletas de amostras de água, deve ser integrada ao sistema de monitoramento ambiental para que, nos pontos de monitoramento em comum, não haja duplicidade de coleta e determinações analíticas. Sugere-se, ainda, que as empresas de abastecimento público enviem, para a CETESB, os dados semestrais de qualidade, segundo uma lista definida de substâncias, bem como os dados mensais sobre o nível d'água e vazões médias. Destaca-se que a obrigatoriedade de monitoramento nos sistemas de abastecimento já consta da legislação, mas não há procedimentos para padronização e centralização das informações geradas.

Outra possibilidade de aquisição de informações hidrogeológicas e hidroquímicas será a aprovação da resolução conjunta entre as Secretarias Estaduais de Meio ambiente, de Saúde e de Recursos Hídricos que torna obrigatório o monitoramento, no mínimo semestral, de poços situados próximos a fontes de poluição. Isto na prática significará que todas as empresas licenciadas pelo órgão ambiental e que possuam poços tubulares deverão enviar, anualmente, boletins analíticos com os mesmos parâmetros e metodologias da rede de monitoramento.

5.2.3 Recursos humanos e financeiros

Como visto, a integração entre órgãos públicos estaduais, municipais e privados é fundamental para viabilizar recursos financeiros e humanos para a realização do monitoramento de águas subterrâneas.

Além dos custos financeiros, a capacidade dos laboratórios em termos de número de amostras/mês e a disponibilidade de equipe técnica para a coleta das amostras são os fatores mais limitantes. Assim, pode ser necessária a contratação de laboratórios regionais terceirizados, acreditados para a determinação dos parâmetros de interesse, com os métodos que atinjam os limites de detecção necessários.

Para isto, no estado de São Paulo, é possível obter recursos junto ao Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO), que tem por objetivo dar suporte a Política Estadual de Recursos Hídricos, financiando projetos enquadrados conforme as prioridades estabelecidas no Plano Estadual de Recursos Hídricos. A base legal para pleitear recursos deste fundo é dada pela Resolução CNRH nº 22, de 24.05.2002, que estabelece que os Planos de Recursos Hídricos, elaborados por bacia, devem contemplar redes de monitoramento da quantidade e qualidade dos recursos dos aquíferos.

A CETESB poderá pleitear recursos FEHIDRO para contratar laboratórios de análise para suprir a demanda extra que o monitoramento trará e também para o aperfeiçoamento do sistema de informação. O DAEE, caso julgue necessário, poderá captar recursos para aquisição e manutenção de equipamento de medição contínua de nível d'água, de vazões e de pluviometria, associada ao ponto de amostragem.

Outra fonte de financiamento para captação de recursos para operação do monitoramento é o Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA), que no estado de São Paulo está viabilizando a elaboração, na CETESB, de catálogo eletrônico sobre informações de qualidade e quantidade de águas superficiais e subterrâneas.

Os principais itens a serem considerados nas planilhas de custos para obtenção de financiamento de projetos de monitoramento de águas subterrâneas são: deslocamentos (combustível e pedágios) e diárias de viagens (refeição e hospedagem) para seleção de pontos e coleta de amostras; material de coleta e acondicionamento de amostras; equipamentos de campo (phmetro, condutímetro, GPS); equipamentos de telemetria; transporte de amostras (veículos especializados), análises laboratoriais; serviços de programação e aquisição de programas computacionais para elaboração de sistemas de

informação; e serviços gráficos (relatórios). Como contrapartida, podem ser citados os salários e encargos dos técnicos que realizarão a coleta, análise de amostras, compilação e interpretação dos dados e divulgação dos resultados.

5.2.4 Seleção do corpo hídrico a ser monitorado

Um **corpo hídrico subterrâneo** representa um volume de água subterrânea hidrogeologicamente distinto e delimitado dentro de um aquífero ou sistema aquífero. Em cada UGRHI, devem ser identificados os corpos hídricos subterrâneos prioritários, em função:

- da delimitação tridimensional dos corpos hídricos subterrâneos;
- do modelo conceitual de regime de fluxo das águas subterrâneas e sua interconexão com as águas superficiais;
- da vulnerabilidade natural dos aquíferos ao risco de poluição;
- das fontes potenciais de poluição;
- da densidade de poços tubulares de abastecimento;
- do uso e ocupação do solo e seu histórico; e
- dos resultados prévios de alteração das condições naturais.

Os modelos hidrogeológicos conceituais serão aperfeiçoados à medida que a interpretação dos resultados obtidos no monitoramento fornecer novos dados para a reavaliação. Nestes modelos, as exportações de água mineral para outras bacias, caso significativas, também devem ser consideradas.

Em relação aos aspectos locais, o monitoramento, com objetivo de estabelecer referências de qualidade e de quantidade, deve ser realizado em áreas distantes das fontes potenciais de poluição e de adensamento de obras de captação de água, porém semelhantes hidrogeologicamente às áreas consideradas prioritárias em função de impactos potenciais ou reais. Quando o objetivo do monitoramento for a avaliação de alterações das condições normais, devem ser priorizados locais próximos a adensamentos de atividades antrópicas.

5.2.5 Definição do número de pontos de amostragem

Para início do projeto de monitoramento, cada UGRHI deve ser subdividida em quadrículas. Em corpos hídricos priorizados em função da intensidade das atividades antrópicas e da vulnerabilidade, as quadrículas devem ter dimensões de 10 por 10 km. Nas outras áreas, as quadrículas podem ser de 20 x 20 km. Caso as pressões antrópicas sejam consideradas muito intensas, e havendo disponibilidade de recursos humanos e financeiros, a quadrícula deverá ter dimensões de 5 x 5 km. Após três anos de monitoramento, deve-se reavaliar a distribuição dos pontos de monitoramento, por meio de análises geoestatísticas.

Deve ser selecionado pelo menos um ponto em cada quadrícula, no corpo hídrico subterrâneo que se deseja monitorar, se possível próximo de pontos de monitoramento de águas superficiais e de estações de pluviometria. Dependendo da disponibilidade de monitorar mais de um ponto por quadrícula, deve-se escolher pontos próximos com diferentes profundidades ou posições de montante e jusante em relação às áreas de recarga do aquífero.

Dentro da área de abrangência de uma UGRHI, recomenda-se que o número de pontos de monitoramento deve ser no mínimo 20 e no máximo 60. Entretanto, o número máximo de pontos pode ser maior, dependendo da complexidade do corpo hídrico, das pressões antrópicas e dos recursos disponíveis. Por este critério, a rede de monitoramento do Estado de São Paulo seria constituída de 440 a 1320 pontos de coleta de amostras e medições.

Para monitoramento do nível d'água, que não tem as limitações laboratoriais, o número de pontos de medição pode ser consideravelmente maior, dependendo da disponibilidade dos recursos humanos e financeiros disponíveis, inclusive para aquisição de equipamentos de telemetria.

A opção por pontos fixos de monitoramento, como é feito na Europa, em oposição ao sistema de rodízio adotado na maioria dos estados Norte Americanos, visa a obtenção

de séries históricas de dados, importantes para a compreensão do meio monitorado e também por que o sistema de rodízio demandaria mais recursos humanos, não sendo viável para as condições atuais dos órgãos públicos do Brasil. Quando não for possível utilizar o mesmo ponto para amostragem de qualidade e medições de quantidade, os pontos selecionados para estas finalidades, em cada quadrícula deverão estar o mais próximo possível.

5.2.6 Seleção de pontos de amostragem.

Os pontos de monitoramento podem ser nascentes, poços tubulares de abastecimento público ou privado, ou ainda, poços instalados exclusivamente para monitoramento. Em função dos custos, estes últimos são viáveis apenas para aquíferos rasos. Poços cacimbas podem ser utilizados somente para medição de nível d'água.

Para cadastramento de nascentes, pode-se consultar os serviços municipais de saúde, que operam monitoramento de potabilidade nestas fontes. Recomenda-se os seguintes critérios de seleção:

- ter vazão o ano todo, com preferência para nascentes com vazões maiores;
- a nascente deve estar protegida contra enxurradas;
- devem estar equipadas com obras de captação, para facilitar a coleta; e
- estar em locais de fácil acesso.

Devem ser citados os exemplos das prefeituras de Santo André e de São Bernardo do Campo, que realizaram um extenso levantamento de poços tubulares, poços cacimbas e nascentes, públicos e privados, existentes em suas jurisdições.

A identificação de poços tubulares deve ser executada, consultando-se os cadastros de poços junto aos órgãos outorgantes e avaliando-se os perfis construtivos. Recomenda-se os seguintes critérios de seleção:

- os poços devem ter sido construídos de acordo com as normas ABNT NBR 12.244/92, que padroniza a construção de poços para captação de águas subterrâneas e

NBR 12.212/92, que fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto de poço de captação de águas subterrâneas para abastecimento público;

- os filtros devem estar em uma única formação aquífera, ou, no mínimo, em um único sistema aquífero;
- o material de construção do poço deve ser de PVC ou aço inoxidável;
- deve haver laje de proteção e tubo de boca, de acordo com as normas citadas;
- havendo restrição financeira para a seleção de vários poços próximos, deve ser dada preferência para os mais rasos;
- poços desativados e ainda não tamponados podem ser utilizados para monitoramento do nível d'água;
- Para avaliação da qualidade, poços de abastecimento público ou de mineração de água mineral devem ser preferidos em relação a outros usos; e
- Para avaliação das condições de aquíferos rasos, devem ser selecionados poços tubulares com nível estático da água a menos de 20 metros de profundidade.

No caso de utilização de poços desativados para monitoramento do nível d'água, deve ser regularizada a mudança de uso, para não ferir a legislação do estado que exige que poços de produção desativados sejam tamponados para evitar contaminação da água subterrânea.

O Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) elaborou, na década de 1980, um relatório interno sobre a necessidade de implantação de rede de monitoramento de quantidade. Neste relatório consta um levantamento sobre possíveis pontos de observação de nível d'água (relatório não publicado, cortesia de Gerônimo Rocha).

Poços de monitoramento podem ser especialmente instalados para o propósito do monitoramento e neste caso torna-se mais fácil determinar as características construtivas e locais desejáveis. Outros poços de monitoramento, instalados com diferentes propósitos também podem ser utilizados. Geralmente estes poços são parte integrante de algum outro monitoramento, como por exemplo, para pesquisas, para acompanhamento de nível d'água em grandes obras de engenharia ou ainda como parte integrante de processos de remediação da qualidade da água subterrânea em locais contaminados.

Em casos de poços de monitoramento já existentes, recomenda-se os seguintes critérios de seleção:

- no perfil construtivo, o início da seção filtrante deve estar acima do nível d'água no final da estação das cheias;
- devem estar instalados em locais de fácil acesso, porém protegidos contra vandalismo; e
- dar preferência a poços instalados a montante de fontes potenciais de poluição.

A seleção efetiva dos pontos de monitoramento somente poderá ser efetuada após a vistoria em campo dos pontos pré-selecionados. Assim, devem ser planejados, nesta etapa, mais pontos do que os necessários para a rede de monitoramento. Esta vistoria deve avaliar a existência de torneira no cavalete e de perímetro imediato de proteção devidamente cercado. Se houver sistema de tratamento da água, como cloração e fluoretação, a coleta de amostras deverá ser efetuada a montante deste sistema.

As questões de acessibilidade, uso e ocupação do entorno e obtenção de autorização do proprietário também são considerados nesta vistoria. Como o monitoramento proposto não se destina a avaliar fontes pontuais de poluição, os poços não devem estar próximos das mesmas.

Em caso da possibilidade de instalação de equipamentos de medição automática de nível d'água e/ou de condutividade elétrica, existem outros cuidados que devem ser avaliados, como a proximidade de fontes de energia e a proteção contra furtos.

5.2.7 Definição dos parâmetros a serem monitorados

Com base na Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, são propostos 7 (sete) grupos de parâmetros a serem mensurados ou determinados, conforme apresenta o Quadro 12. Os parâmetros dos Grupos 1 ao 5 são determinados em todos os pontos de monitoramento. Algumas substâncias do Grupo 5 podem ter sua frequência de determinação diferenciada, dependendo da variabilidade demonstrada nos resultados analíticos ao longo do tempo. Os parâmetros dos Grupos 6 e 7 serão determinados por região amostrada, dependendo do histórico de uso e ocupação do solo.

QUADRO 12 – GRUPOS DE PARÂMETROS A SEREM MENSURADOS OU DETERMINADOS NO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Grupo 1 MEDIÇÕES EM CAMPO	Grupo 2 ÍONS MAIORES E INDICADORES:		Grupo 3 NUTRIENTES:	
<ul style="list-style-type: none"> • pH • Condutividade elétrica • Nível d'água • Temperatura da água • Vazão • Tempo de bombeamento • Coordenadas geográficas 	<ul style="list-style-type: none"> • Cálcio • Magnésio • Sódio • Potássio • Sulfato • Cloreto • Alcalinidade • Fluoreto • Dureza total 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxigênio Dissolvido • Carbono Orgânico Total • Sólidos Dissolvidos Totais (a 105° C) • Sólid. Totais (105° C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrato • Nitrito • Amônia • Nitrogênio Kjeldhal • Fósforo 	
		Grupo 4 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS:		
		<ul style="list-style-type: none"> • Coliformes totais 	<ul style="list-style-type: none"> • Escherichia coli 	
Grupo 5 ELEMENTOS TRAÇOS:		Grupo 6 COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS :		
<ul style="list-style-type: none"> • Ferro (filtrado e não filtrado) • Manganês (filtrado e não filtrado) • Alumínio • Antimônio • Arsênio • Bário 	<ul style="list-style-type: none"> • Boro • Cádmio • Chumbo • Cobre • Cromo • Mercúrio • Selênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Benzeno • Etilbenzeno • Tolueno • Xileno 	<ul style="list-style-type: none"> • Tetracloroetileno • Tricloroetileno • 1,2 dicloroetano • Cloreto de vinila • Clorofórmio • 1,2 dicloroeteno • 	
Grupo 7 PESTICIDAS:				
<ul style="list-style-type: none"> • Alaclor • Aldrin e Dieldrin • Atrazina • Bentazona • Clordano • 2,4 D 	<ul style="list-style-type: none"> • DDT (isômeros) • Endossulfan • Endrin • Glifosato • Heptacloro • Hexaclorobenzeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Lindano (g-BHC) • Metolacoloro • Metoxicloro • Molinato • Pendimetalina • Pentaclorofenol 	<ul style="list-style-type: none"> • Permetrina • Propanil • Simazina • Trifluralina 	

5.2.8 Freqüência de amostragem

Em aquíferos livres, a freqüência de coleta de amostras para fins de qualidade deverá ser semestral. Em aquíferos confinados, a freqüência de amostragem será anual. Dependendo da série histórica de 6 anos (dois ciclos) dos resultados analíticos e dos fatores de risco de poluição, referentes ao uso e ocupação do solo, os pontos de monitoramento que não apresentam variações significativas poderão ter a freqüência ampliada para bi-anual.

A freqüência de medições de nível d'água será mensal, independente do tipo de aquífero. Havendo disponibilidade de recursos financeiros, alguns pontos de amostragem poderão ser equipados com registradores automáticos de nível d'água. Neste caso, a freqüência de registro de dados dependerá do equipamento utilizado.

5.2.9 Procedimentos de coleta de amostras

Preparação das campanhas de coleta

As equipes de coleta devem estar familiarizadas com os pontos de amostragem e as vias de acesso, de forma a tornar possível a elaboração de um roteiro lógico para as viagens de amostragem. Neste roteiro, deve ser prevista a necessidade de enviar as amostras para o laboratório no mesmo dia da coleta, em função dos prazos de validade de alguns parâmetros. Um laboratório com controle de qualidade deve recusar o recebimento de amostras com prazo de validade vencido ou, no mínimo deixar esta irregularidade explícita no boletim de análise.

Com o roteiro organizado, os laboratórios executores devem ser consultados sobre a possibilidade de entrada de amostras nas datas propostas e os proprietários dos poços deverão ser informados sobre as datas de coleta para que mantenham alguém responsável para abrir eventuais portões e cadeados. No caso de poços tubulares, este procedimento garante também que o poço estará em funcionamento no dia da coleta, eliminando a necessidade de purga.

As fichas de coleta devem ser elaboradas constando nome, código e endereço completo do ponto de amostragem, coordenadas geográficas, telefone de contato com o proprietário, nome e contato do responsável pelo programa e os parâmetros a serem monitorados, separados por laboratórios executores das análises.

A partir da ficha de coleta, elaborada para cada ponto de amostragem, prepara-se os equipamentos de coleta, os frascos específicos para acondicionamento de amostras e os reagentes de preservação. Deve ser preparado um número maior de frascos do que o realmente necessário, pois podem ocorrer eventualidades de contaminação do frasco durante a coleta. Deve ser previsto também frascos para “branco de campo”, preenchidos com água desmineralizada.

Os equipamentos de medição em campo, como pHmetro, termômetro e condutímetro devem ser testados e calibrados. As soluções de preservação de amostras, calibração de equipamentos em campo e água desmineralizada, para limpeza de equipamentos, devem ser providenciadas em volume suficiente para cada viagem de coleta de amostras.

No caso de coleta em poços de monitoramento, a logística de amostragem é mais complexa e necessita de técnicos mais especializados. Neste caso deve ser prevista a necessidade de bombas, coletores descartáveis (*bailer*) e tambores para armazenamento temporário da água de purga. No caso da escolha por métodos de purga de baixa vazão, deve ser previsto um tempo maior de coleta para cada poço.

Técnicas de amostragem, preservação e transporte

Como critérios gerais que devem ser seguidos, pode-se citar que, o coletor deve estar utilizando luvas cirúrgicas descartáveis e os equipamentos, materiais e frascos a serem utilizados não deverão ter contato com o solo no local da amostragem. As amostras para determinação de substâncias voláteis devem ser as primeiras a serem coletadas, não podendo haver bolhas de ar no frasco. A seguir, coleta-se amostras para medição em campo de temperatura, pH, condutividade e se possível, alcalinidade. Por último, coleta-se amostras para determinação dos demais parâmetros selecionados. Os frascos não deverão estar expostos à luz solar, fumaças, gases e outros contaminantes e devem ser mantidos refrigerados a 4°C, tomando-se o cuidado de evitar que a água derretida do gelo contamine as amostras. O Quadro 8, que contém as recomendações de frascos, preservação, volume de amostra necessário e prazo de validade das amostras de água, é reapresentado a seguir.

QUADRO 8 (REAPRESENTAÇÃO) – FRASCOS UTILIZADOS, MÉTODOS DE PRESERVAÇÃO, VOLUME DE AMOSTRA NECESSÁRIO E PRAZO DE VALIDADE DAS AMOSTRAS, POR PARÂMETRO

Parâmetro	Frasco	Preservação	Volume (mL)	Prazo de Validade
Acidez/alcalinidade	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	24 horas
pH	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	2 horas
Condutividade	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	28 dias
Fluoreto	P	Não requerida	500	28 dias
Dureza	P, V	Adicionar HNO ₃ até pH<2	500	6 meses
Metais, Boro, Arsênio e Selênio	P, V ⁽¹⁾	Adicionar HNO ₃ até pH<2 (2)	500	6 meses
Sulfato.	P, V ⁽¹⁾	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	28 dias
Nitrogênio amoniacal, nitrato, kjeldahl. Fósforo total	P, V	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH<2	500	7 dias
Nitrito e Cloreto	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	250	48 horas
Sólidos totais	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	1000	7 dias
Sólidos filtráveis	P, V	Refrigerar a 4 ± 2 °C	1500	24 horas
Carbono Orgânico. Dissolvido	Frasco de OD	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH 3,5 - 4,5 e refrigerar à 4°C		28 dias
Solventes Halogenados	FA	Preencher totalmente o frasco e refrigerar à 4°C	60 mL	
Benzeno	FA		60 mL	14 dias

(1) lavar com solução a 10% de HNO₃ e enxaguar com água tipo III (destilada ou osmose reversa).

(2) Para determinação de espécies químicas dissolvidas, filtrar a amostra no momento da coleta.

P : frasco de polietileno ou equivalente. V : frasco de vidro borosilicato. FA : frasco de âmbar com tampa esmerilhada.

No caso coleta de amostras em nascentes, pode ser utilizada uma bomba peristáltica e tubos flexíveis de Teflon, devendo-se tomar cuidado para evitar a turvação da água com sedimentos de forma a não incluí-los como parte da amostra. As amostras de água deverão ser transferidas do tubo de Teflon diretamente para o frasco apropriado.

Todos os tubos devem ser descartáveis ou deverão ser descontaminados (tratados) antes e após o uso em cada nascente. Deverá constar na ficha de coleta a origem da amostra (nascente) para procedimentos específicos de filtração pelo laboratório executor das análises.

No caso de poços tubulares, caso a bomba não esteja em funcionamento, esta deverá ser ligada 20 minutos antes da coleta de amostras. A cada 5 minutos são realizadas medições de pH e condutividade, até que seja atingida a estabilidade destes parâmetros. Procede-se então a coleta de amostras para determinação dos demais parâmetros. As amostras de água devem ser coletadas o mais próximo possível da cabeça do poço, normalmente no cavalete, e antes de qualquer tratamento. A torneira do cavalete deverá ser aberta de forma que a água saia com fluxo o mais laminar possível, evitando turbilhonamento.

Em poços de monitoramento, o procedimento de coleta é semelhante com exceção da purga que, nos procedimentos convencionais, recomenda-se a retirada de um volume de água correspondente a três vezes o volume da água existente no poço. Para isto é necessário conhecer o perfil do poço ou ter instrumentos de medição de profundidade e nível d'água. Recentemente, a purga mínima tem sido recomendada. Neste procedimento, a bomba opera com vazões de 1 L/minuto e o nível d'água não deve ser demasiadamente rebaixado, devendo ficar acima da abertura dos filtros. A purga é encerrada quando 3 leituras consecutivas de pH, Eh, condutividade elétrica, turbidez e oxigênio dissolvido não apresentarem variação significativa. Com a mesma vazão de purga, são então coletadas as amostras para ensaios laboratoriais. No caso de procedimentos de purga mínima deve ser seguida a norma ASTM D6771/2002 *“Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Groundwater Quality Investigations”*

Existem diversos manuais que detalham os procedimentos de coleta de amostras e aqui foram citadas apenas as questões mais relevantes desta atividade.

5.2.10 Metodologias analíticas

As metodologias analíticas devem ser selecionadas em função dos limites de quantificação de interesse, que podem ser escolhidos em função de um padrão para um determinado uso, como a potabilidade, ou em função das concentrações naturais esperadas.

No caso de haver mais de um laboratório executando o mesmo ensaio analítico, a metodologia utilizada deverá ser padronizada para viabilizar a comparabilidade entre os dados gerados.

Com base nos resultados do monitoramento de águas subterrâneas realizado pela CETESB e visando atender aos propósitos definidos para o monitoramento, estabeleceu-se os limites de interesse para os parâmetros selecionados e as metodologias analíticas, que são apresentados no Quadro 12.

QUADRO 13 - MÉTODOS ANALÍTICOS E LIMITES DE DETECÇÃO DE INTERESSE

Parâmetros	Unidade	Padrão Potab.	Limite de quantificação	Métodos analíticos 20 th Ed Standard methods for the examination of water and wastewater
pH		6,5-9,5	1,1	Phgâmetro
Temperatura	°C	--	0,1	Termômetro
Condutividade Elétrica	µS/cm	--	0,0	condutivímetro
Sólidos Totais Dissolv.	mg/L	1000	1,0	Sólidos Dissolvidos a 103-105°C Método 2540 D
Sólidos Totais Fixos	mg/L	--		Sólidos Totais Fixos a 180°C Método 2540 D
TOC	mg/L C	--		Método de combustão - infra vermelho. Método 5310, item B
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	500	2,0	Titulometria com EDTA Método 2340
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	--	0,0	Titulometria Potenciométrica Método 2320
Alumínio Total	mg/L Al	0,2	0,01	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Arsênio Total	mg/L As	0,01	0,002	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Bário Total	mg/L Ba	0,7		Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Boro	mg/L B		0,03	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Cálcio Total	mg/l Ca	--	0,08	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Cádmio Total	mg/L Cd	0,005	0,0001	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Chumbo Total	mg/L Pb	0,01	0,002	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Cloro Total	mg/L Cl	250	0,1	Colorimetria automática com tiocianato de mercúrio Método 4500-Cl, Ítem G
Cobalto	mg/L Co	--	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Cobre	mg/L Cu	2	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Cromo Total	mg/L Cr	0,05	0,0005	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Ferro Total	mg/L Fe	0,3	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Fluoreto Total	mg/L F	1,5		Potenciometria com eletrodo íon seletivo Método 4500-F, itens B e C
Magnésio Total	mg/L Mg	--	0,1	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Manganês Total	mg/L Mn	0,1	0,005	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Mercurio Total	mg/L Hg	0,001	0,0001	Espectrometria de absorção atômica com geração de vapor frio Método 3112
Nitrogênio Amoniacal	mg/L N	1,5		Colorimetria automática com salicilato de sódio
Nitrogênio Nitrato	mg/L N	10		Colorimetria automática com N(1-naftil) etilendiamina e sulfanilamida, após redução em coluna de cádmio Método 4500-NO ₃ , ítem E
Nitrogênio Kjeldahl Total	mg/L N	--		Colorimetria automática com salicilato de sódio, após digestão ácida em meio sulfúrico.
Níquel	mg/L Ni	--	0,02	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Potássio Total	mg/L K	--	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Selênio	mg/L Se	0,01	0,002	Espectrometria de absorção atômica-forno de grafite Método 3113
Sódio Total	mg/L Na	--	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Sulfato Total	mg/L SO ₄	250	10	Colorimetria automática com azul de metiltimol Método 4500-SO ₄ , ítem F
Vanádio	mg/L V	--	0,02	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Zinco	mg/L Zn	5	0,01	Espectrometria ótica de emissão com plasma de argônio-ICP/OES Método 3120-B
Coliformes Totais	Nº Colônias	0	0,0	Membrana Filtrante
<i>E. coli</i>	Pres/Ausente	Ausente		Norma técnica CETESB L5.201
1,2 dicloroetano	µg/L	10		EPA Método 8260 A/B Volatile Organics By Gas Chromatography/Mass Spectrometry (CG/MS)
Tetracloroetano	µg/L	40		EPA Método 8260 A/B Volatile Organics By Gas Chromatography/Mass Spectrometry (CG/MS)
Cloro de vinila	µg/L	5		EPA Método 8260 A/B Volatile Organics By Gas Chromatography/Mass Spectrometry (CG/MS)
Clofórmio	µg/L	--		EPA Método 8260 A/B Volatile Organics By Gas Chromatography/Mass Spectrometry (CG/MS)
Benzeno	µg/L	5		EPA Método 8260 A/B Volatile Organics By Gas Chromatography/Mass Spectrometry (CG/MS)

A seguir é apresentado um modelo de boletim analítico que deve ser padronizado entre os diferentes laboratórios que executarão as determinações analíticas. Este modelo foi desenvolvido pelo grupo de trabalho criado pela Resolução conjunta SES-SMA-SERHS nº 1 de 14.10.2003 que trata de sistemas alternativos de abastecimento.

MODELO de BOLETIM ANALÍTICO	
1. IDENTIFICAÇÃO DO LABORATÓRIO	
Razão social:	CNPJ
Endereço	Rua: _____ n° _____ complemento:
Bairro:	CEP: _____ Município:
Telefone:	
2. NÚMERO DA AMOSTRA:	
3. DADOS DO CLIENTE:	
Nome/Razão Social:	_____
CNPJ/CPF	_____
Endereço:	Rua: _____ Complemento:
	Bairro: _____ CEP:
	Fone/fax: _____
Município:	_____
Estado:	_____
4. DADOS DE COLETA DE CAMPO	
Local/descrição	_____
Coletor	Nome: _____ RG: _____
Data e hora da Coleta	____/____/____ ____:____
Tipo de amostra	Água bruta <input type="checkbox"/> Água tratada <input type="checkbox"/>
Chuvas ultim. 24 horas	Sim _____ Não _____
Cloro residual livre	_____ mg/L Cl
pH	_____
Temperatura	do ar: _____°C da água: _____°C
5. DADOS DO RECEBIMENTO DA AMOSTRA NO LABORATÓRIO	
Data e hora do recebimento	____/____/____ ____:____
Observações:	

MODELO de BOLETIM ANALÍTICO							continuação
6. RESULTADOS ANALÍTICOS							
PARÂMETRO	RESULTADO	V.M.P	UNID. MEDIDA	LIMITE DE DETECÇÃO	MÉTODO DE REFERÊNCIA	DATA DO ENSAIO	
6.1 BACTERIOLÓGICO							
Coliformes totais		Ausência /100mL					
Coliformes termotolerantes		Ausência /100 mL					
Escherichia coli		Ausência /100mL					
Contagem de bactérias heterotróficas		500/mL					
6.2 QUÍMICOS INORGÂNICOS							
Alumínio		0,2	mg/L				
Antimônio		0,005	mg/L				
Amônia (como NH ₃)		1,5	mg/L				
Arsênio		0,01	mg/L				
Bário		0,7	mg/L				
Cádmio		0,005	mg/L				
Chumbo		0,01	mg/L				
Cianeto		0,07	mg/L				
Cloreto		250	mg/L				
Cobre		2	mg/L				
Cor Aparente		15	uH(?)				
Cromo		0,05	mg/L				
Dureza		500	mg/L				
Ferro		0,3	mg/L				
Fluoreto		1,5	mg/L				
Manganês		0,1	mg/L				
Mercurio		0,001	mg/L				
Nitrato (como N)		10	mg/L				
Nitrito (como N)		1	mg/L				
Odor		N.O.	-				
Gosto		N.O.	-				
Selênio		0,01	mg/L				
Sódio		200	mg/L				
Sólidos dissolvidos totais		1.000	mg/L				
Sulfato		250	mg/L				
Sulfato de Hidrogênio		0,05	mg/L				
Turbidez		5	UT				
Zinco		5	mg/L				
6.3 QUÍMICOS ORGÂNICOS							
Acrilamida		0,5	µg/L				
Alaclor		20,0	µg/L				
Aldrin e Dieldrin		0,03	µg/L				
Atrazina		2	µg/L				

continua

MODELO de BOLETIM ANALÍTICO				continuação		
PARÂMETRO	RESULTADO	V.M.P	UNID. MEDIDA	LIMITE DE DETECCÃO	MÉTODO DE REFERÊNCIA	DATA DO ENSAIO
Bentazona		300	µg/L			
Benzeno		5	µg/L			
Benzo[a]pireno		0,7	µg/L			
Clordano (isômeros)		0,2	µg/L			
Cloreto de Vinila		5	µg/L			
2,4D		30	µg/L			
DDT (isômeros)		2	µg/L			
1,2 Dicloroetano		10	µg/L			
1,1 Dicloroetano		30	µg/L			
Diclorometano		20	µg/L			
Endossulfan		20	µg/L			
Endrin		0,6	µg/L			
Estireno		20	µg/L			
Etilbenzeno		0,2	mg/L			
Glifosato		500	µg/L			
Heptacloro e Heptacloro epóxido		0,03	µg/L			
Hexaclorobenzeno		1	µg/L			
Lindano (g-BHC)		2	µg/L			
Metolacloro		10	µg/L			
Metoxicloro		20	µg/L			
Molinato		6	µg/L			
Monoclorobenzeno		0,12	mg/L			
Pendimetalina		20	µg/L			
Pentaclorofenol		9	µg/L			
Permetrina		20	µg/L			
Propanil		20	µg/L			
Simazina		2	µg/L			
Surfactantes		0,5	mg/L			
Tetracloroeto de Carbono		2	µg/L			
Tetracloroetano		40	µg/L			
Tolueno		0,17	mg/L			
Triclorobenzenos		20	µg/L			
Tricloroetano		70	µg/L			
Trifluralina		20	µg/L			
Xileno		0,3	mg/L			
6.4. DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DA DESINFECCÃO						
Bromato		0,025	mg/L			
Clorito		0,2	mg/L			
Cloro livre		5	mg/L			
Monocloraminas		3	mg/L			
2,4,6 Triclorofenol		0,2	mg/L			
Trihalometanos totais		0,1	mg/L			

continua

MODELO de BOLETIM ANALÍTICO					continuação
6.5 OUTROS PARÂMETROS EXIGIDOS PELAS AUTORIDADES SANITÁRIAS E AMBIENTAIS (artigo 10 da Resolução Conjunta SES/SMA/SRHS nº ____/2005)					
7. LEGENDA:					
8. OBSERVAÇÕES:					
9. CONCLUSÃO:					
10. APROVADO POR:					
Nome:	Cargo:				
Reg. Conselho de Classe:	Assinatura:				
Notas:					
1. Este Boletim de Análise só pode ser reproduzido por inteiro, sem qualquer alteração.					
2. Os resultados desta análise se referem somente à amostra analisada.					

5.2.11 Gerenciamento das informações

Armazenamento de informações obtidas no monitoramento

Antes das informações serem inseridas no banco de dados, torna-se necessária uma avaliação dos boletins de ensaios analíticos, bem como das demais informações obtidas, para identificação de erros grosseiros.

Com os resultados constantes nos boletins analíticos, deve-se proceder ao cálculo do balanço iônico, onde será calculado o erro prático, utilizando a fórmula descrita em [4] e os limites constantes do Quadro 9, aqui rerepresentados. Não deverão ser considerados os resultados dos boletins cujo erro prático ultrapassar o limite permitido.

$$Ep\% = \left| \frac{r\sum n - r\sum p}{\frac{1}{2}(r\sum n + r\sum p)} \right| \times 100 \quad [4]$$

onde

Ep% = erro prático

$r\sum p$ = concentração total de cátions em miliequivalente por litro (meq/L)

$r\sum n$ = concentração total de ânions em miliequivalente por litro (meq/L)

QUADRO 9 (REAPRESENTAÇÃO) - ERRO MÁXIMO PERMITIDO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA

Condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$)	50	200	500	2.000	>2.000
Erro prático Permitido (%)	30	10	8	4	< 4

Fonte: Custódio e Llamas *apud* Feitosa e Manoel Filho (2000)

Testes de consistência das informações hidrogeológicas também devem ser realizadas. Como exemplos, o nível d'água não pode estar abaixo da profundidade final dos filtros e a concentração de uma determinada substância não pode estar abaixo do limite de quantificação ou acima de um valor máximo plausível.

Esta etapa de consistência e cálculo do balanço iônico pode ser programada para ser executada automaticamente no banco de dados, à medida que os dados são inseridos (digitados ou importados) em uma tela intermediária. Os dados "suspeitos" são destacados e checados. As informações validadas, pelo analista, são então inseridas efetivamente no banco de dados, que deve, preferencialmente, ser programado em SQL para viabilizar a disponibilização via Internet e possibilitar a exportação dos dados selecionados por critérios pré-estabelecidos, para planilhas eletrônicas, visando uma segunda conferência dos resultados analíticos e o tratamento estatístico dos dados por programas básicos ou especializados.

Para o armazenamento das informações obtidas nas redes de monitoramento, propõe-se a utilização do sistema de informação que foi projetado pela Secretaria de Meio Ambiente no âmbito do Convênio de Cooperação Técnica firmado entre a Secretaria de Meio Ambiente do estado de São Paulo e o Ministério do Meio Ambiente do estado da Bavária (Alemanha), que está em fase final de programação e comporta também os dados do monitoramento de nível d'água, bases cartográficas e indicação de áreas contaminadas.

Armazenamento de informações obtidas com outras origens

Além do monitoramento projetado, podem ser armazenados, também, os dados de hidrogeologia e hidroquímica originados de outras atividades, como por exemplo, dos processos de monitoramento de fontes potenciais de poluição, de investigação de áreas suspeitas de contaminação, dos sistemas de remediação de áreas contaminadas e de processos de renovação de outorga de direito de uso da água. Nestes casos, as informações de qualidade não podem compor o conjunto de dados para interpretação estatística da condição do corpo hídrico, pois refletem situações específicas, mas podem auxiliar no conhecimento da hidrogeologia e potenciometria.

Para a importação destes dados, deve ser elaborada uma planilha padronizada de preenchimento, com os seguintes campos: código CETESB e nome do empreendimento, endereço completo, bacia hidrográfica, Agência CETESB responsável, Regional do DAEE (que podem ter preenchimento automático em função do CEP), identificação e coordenadas geográficas dos poços de monitoramento, litoestratigrafia, características construtivas (diâmetro, profundidade, posição de filtros e nível d'água), e dados de monitoramento (datas de coleta, código dos parâmetros determinados ou mensurados, sinal (de maior ou menor), valor obtido, unidade, laboratório executor e metodologia analítica utilizada).

Da mesma forma, informações sobre potabilidade, vazão e nível d'água, monitoradas em sistemas públicos ou alternativos de abastecimento, podem ser incorporadas no banco

de dados, desde que haja padronização de metodologias de coleta e de análise. Os mesmos critérios de consistência, anteriormente descritos, se aplicam a estas informações.

Tratamentos estatísticos

Após um período de três anos de monitoramento, os dados, previamente consistidos, serão tratados e interpretados estatisticamente. Para isto, deverão ser agrupados por parâmetro para tratamento dos resultados indicados como “menor do que o limite de quantificação” (<LQ). Utilizam-se gráficos do tipo “Box-and-Wiskers” para identificar valores discrepantes, que serão conferidos, corrigidos ou descartados.

Os dados de cada parâmetro deverão ser sumarizados por ponto de amostragem, realizando-se a análise estatística básica, calculando-se as suas médias aritméticas e medianas. Estes resultados, agrupados por bacia hidrográfica, serão interpretados de forma a estabelecer a condição geral da água do corpo hídrico subterrâneo monitorado. Para fins de pesquisa é possível o agrupamento dos resultados por tipo de aquífero (confinado ou livre) e por profundidades dos filtros.

Para comparação de qualidade entre diferentes corpos hídricos subterrâneos ou bacias hidrográficas, poderá ser utilizado o cálculo dos quartis (2º e 3º), apresentados em gráficos do tipo “box-and-wiskers”. O 3º quartil dos resultados de cada corpo hídrico será considerado como o valor de referência para aquele corpo, conforme CETESB (2001 e 2004).

Propõe-se que as medianas calculadas de cada ponto de monitoramento sejam tratadas por métodos geoestatísticos de krigagem, elaborando mapas de isovalores e avaliando a distribuição espacial destes pontos. Tal é a importância da interpretação estatística dos resultados obtidos para a proposição de ações de gerenciamento e mesmo de gestão, que esta atividade deve ser executada por um profissional estatístico com experiência ambiental.

Propõe-se, também, um sistema de alerta onde, se o limite de confiança superior da média aritmética atingir um valor maior do que 75% do padrão de potabilidade, então há indício de que a condição da água está sendo alterada e é preciso intensificar as operações de monitoramento e de gerenciamento do recurso hídrico. Ocorrências naturais de concentrações acima dos padrões de potabilidade podem ocorrer e deverão ser consideradas caso-a-caso.

A avaliação de tendências de aumento ou diminuição de concentrações ou nível d'água necessita de uma série histórica de longo termo, sendo proposto que os dados sejam agrupados períodos de 10 anos para a realização desta avaliação.

Elaboração de relatórios e tomada de decisão

As informações obtidas no monitoramento podem subsidiar as ações de gestão do recurso hídrico e implicam na **tomada de decisões** em função do propósito do monitoramento, dos resultados obtidos e do uso da água amostrada. Estas ações podem ser, por exemplo, o estabelecimento de áreas de restrição e controle de novas captações, autuações de fontes poluidoras, exigências de tratamento de águas destinadas a abastecimento humano e animal e ainda, retro-alimentar o projeto de rede, identificando áreas onde há necessidade de adensamento da malha de monitoramento.

5.3 Projeto de rede de monitoramento de águas subterrâneas na Bacia do Alto Tietê.

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê foi selecionada para implantação da rede de monitoramento de águas subterrâneas, com aplicação dos critérios definidos nesta dissertação, pelos seguintes motivos:

- existência de mapas geológicos, hidrogeológicos e de vulnerabilidade;
- ser a maior produtora e consumidora de água mineral do País;
- ter crescido o consumo de água subterrânea, em função da escassez e deterioração da qualidade dos recursos hídricos superficiais, tornando-se estratégica para a complementação do sistema de abastecimento urbano;
- ser a Bacia Hidrográfica com a maior densidade populacional do País;
- estar inserida na Região Metropolitana de São Paulo, que é considerada uma das 6 áreas críticas do Estado de São Paulo em função das fontes potenciais de poluição instaladas nesta área, segundo o mapeamento da vulnerabilidade ao risco de poluição (IG/CETESB/DAEE, 1997); e
- possuir a maior parte (732) das 1337 áreas declaradas contaminadas pela CETESB, sendo 489 apenas no município de São Paulo.

.3.1 Localização e caracterização da área piloto

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê está localizada no denominado Planalto Paulistano, e compreende uma área de 5.650 km². O rio Tietê nasce na Serra do Mar, a 22 quilômetros do Oceano Atlântico, mas com direção de fluxo para o interior do Estado de São Paulo,

percorrendo 1.150 km até chegar ao rio Paraná, na divisa com o estado do Mato Grosso do Sul. Além do Tietê, esta Bacia é drenada também pelos rios Pinheiros, Tamanduateí, e seus tributários (Riccomini e Coimbra, 1992).

Os municípios integrantes desta Bacia são: Arujá, Barueri, Biritiba Mirim, Caieiras, Cajamar, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guarulhos, Itapeçerica da Serra, Itapevi, Itaquaquetuba, Jandira, Mairiporã, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Poá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Salesópolis, Santana de Parnaíba, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, São Paulo, São Lourenço da Serra, Suzano, Jujutiba e Taboão da Serra (COMITEAT, 2004).

Deve ser esclarecido que, além destes 36 municípios, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) abrange também os municípios de São Roque, Santa Isabel e Guararema.

Segundo Hidroplan apud COMITEAT (2004), a demanda de água na RMSP para 2010 está estimada em 77,2 m³/s, sendo 68,0 m³/s para usos urbanos, 4,8m³/s para usos industriais e 3,6 m³/s para irrigação. O abastecimento de água na Bacia do Alto Tietê, que é a Unidade de Gerenciamento de Recurso Hídrico (UGRHI) 6, é feito principalmente por captações superficiais em grandes reservatórios e secundariamente por captações de água subterrânea.

Em relação ao uso da água subterrânea na Bacia do Alto Tietê, Hirata e Ferreira (2001) mostram a predominância para o uso industrial com 43% dos poços, seguido do domiciliar (23%), comércio de água (8%), abastecimento público (5%), recreativo (4%) e outros (17%).

As principais atividades industriais usuárias desse recurso hídrico, em termos de volume captado, na UGRHI 6, são: Mecânica/Metalúrgica, Alimentícias/Bebidas, Química, Serviços (hospitais), Material de Transporte e Borracha. Os empreendimentos que

apresentam as maiores vazões de captação de água subterrânea concentram-se na área de atuação da Agência Ambiental de Santo André (CETESB, 2004).

Quanto ao abastecimento público, os municípios de Santana do Parnaíba, Biritiba Mirim, Mairiporã, Guarulhos, Salesópolis, São Bernardo do Campo e mesmo algumas regiões de São Paulo, são parcialmente abastecidos por água subterrânea enquanto que Cajamar e Pirapora do Bom Jesus são totalmente abastecidos, por este recurso hídrico.

A bacia ocupa apenas 2,7% do território paulista, mas concentra quase 50% da população do Estado. Segundo o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2000 a população urbana da UGRHI 6 era de 16.963.693 de pessoas (IBGE, 2000). E em novembro de 2004, a região metropolitana de São Paulo apresentava uma população estimada de 18.910.875 habitantes (EMPLASA, 2004).

A Região, que é marcada por elevada desigualdade social, apresenta um paradoxo no abastecimento de água. Comunidades carentes, como favelas, localizadas em cidades ricas como São Bernardo do Campo e Santo André, se abastecem de águas captadas em nascentes, as chamadas “bicas d’água”. Em função da superficialidade do fluxo da água e da inexistência de saneamento básico, estas águas geralmente apresentam-se impróprias para consumo humano por não atenderem aos padrões de potabilidade para coliformes, conforme demonstram os resultados de monitoramento efetuado pelos Serviços de Vigilância Sanitária.

A Figura 7 apresenta um mapa esquemático da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, com a malha hidrográfica principal e sua qualidade, bem como uma simplificação do uso e ocupação do solo.

O sítio urbano da Cidade de São Paulo, originalmente restrito aos terrenos sedimentares da bacia, transgrediu esses limites. A ocupação na Grande São Paulo avança rapidamente para leste, rumo ao Vale do Paraíba, e oeste, para a Serrania de São Roque, uma vez que a ocupação para o sul e norte é mais lenta, face às limitações geográficas impostas pelas serras do Mar e Cantareira, respectivamente.

5.3.2 Objetivos do monitoramento

O monitoramento de qualidade e quantidade das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê terá os seguintes objetivos:

- caracterizar trianualmente a qualidade natural dos corpos hídricos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.
- caracterizar os parâmetros hidrogeológicos dos corpos hídricos subterrâneos.
- caracterizar anualmente a potenciometria dos corpos hídricos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.
- determinar a interação da pluviometria com as variações de nível d'água dos aquíferos.
- avaliar as tendências dos parâmetros monitorados, em períodos de 10 anos.
- identificar áreas com alterações de qualidade e/ou quantidade.
- avaliar influência de fontes difusas de poluição na qualidade das águas.
- subsidiar a formulação de ações de proteção e melhoria do recurso hídrico subterrâneo.
- avaliar a eficácia destas ações a longo termo.

5.3.3 Órgãos de coordenação e operação da rede de monitoramento

Propõe-se que, em função da capacidade instalada para execução de análises e pela sua atribuição legal como órgão gestor da qualidade dos recursos hídricos, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), seja o Órgão coordenador do monitoramento de qualidade, em conjunto com o Departamento de Águas e Energia Elétrica, que é o órgão gestor da quantidade.

Outros Órgãos que poderão participar, para que o monitoramento atinja os objetivos propostos são, o Centros de Vigilância Sanitária, o Instituto Geológico - IG, o Centro de Tecnologia de Hidráulica (CTH/USP), o Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), os Serviços Autônomos Municipais de Água e a Agência de Bacia do Alto Tietê.

5.3.4 Recursos financeiros e humanos - Logística

Cabe ao Estado, por atribuição legal, o desenvolvimento de atividades de proteção dos recursos hídricos. Entretanto, a disponibilidade de recursos para esta meta é restrita, não só em termos financeiros, mas principalmente em mão de obra.

Assim, propõe-se que, os recursos financeiros adicionais para a operação das redes de monitoramento de qualidade e de quantidade sejam obtidos, pelos órgãos gestores do recurso hídrico junto ao FEHIDRO. Estes recursos devem ser aplicados para aquisição de equipamentos de monitoramento contínuo, material descartável de coleta, aperfeiçoamento de sistemas de informação e contratação de laboratórios para realização de ensaios analíticos. Como contrapartida, o Estado elabora os projetos de rede, gerencia o monitoramento, interpreta os dados obtidos, divulga conclusões e recomendações e disponibiliza dados ao público em geral. Nas fases de planejamento das redes e interpretação dos resultados, as Universidades deverão estar ativamente envolvidas.

Para suprir a deficiência de recursos humanos, as coletas de amostras de água e medições de campo deverão ter participação de funcionários das prefeituras municipais e a Agência de Bacia, deve ser encarregada da manutenção da rede, substituindo pontos de monitoramento desativados. As equipes de campo serão treinadas pelo Estado.

5.3.5 Identificação do corpo hídrico a ser monitorado

Para definição do corpo hídrico prioritário para monitoramento é preciso avaliar a geologia, a hidrogeologia, uso e ocupação do solo, adensamento de fontes potenciais de poluição e de obras de captação de águas subterrâneas.

Geologia da Bacia do Alto Tietê

A Bacia de São Paulo é uma das unidades integrantes do denominado *Rift* Continental do Sudeste do Brasil – RCSB, que engloba também a Bacia de Taubaté, entre outras, e dispõe-se, como uma estreita faixa, alongada e deprimida, desenvolvida entre as cidades de Curitiba (PR) e Barra de São João (RJ), numa extensão de quase 900 km, seguindo aproximadamente a linha da costa atual, da qual dista em média cerca de 70 km (Riccomini, 1989). Esta Bacia está desenvolvida sobre terrenos constituídos, essencialmente, por rochas metamórficas migmatitos e granitóides relacionados, em parte ao Ciclo Brasileiro/Pan Africano e, em parte, resultantes do retrabalhamento de rochas de ciclos mais antigos, além de sedimentos terciários e quaternários.

De uma maneira simplificada, os terrenos cristalinos configuram, praticamente, toda a borda da Bacia, abrangendo significativa extensão, contornando os sedimentos terciários e quaternários que se localizam no centro da bacia e acompanhando a drenagem, conforme pode ser observado na Figura 8.

Conforme se observa na revisão feita por Vieira (1996), a classificação das rochas do embasamento cristalino em grupos e sub-grupos geológicos é assunto ainda controverso, entretanto, podem ser agrupadas essencialmente em duas unidades geológicas, separadas pelas falhas de Taxaquara e do Rio Jaguari, além das rochas granitóides intrusivas. O conjunto situado ao sul destas falhas é representado pelo Grupo Açungui, subdividido em Complexo Pilar e Complexo Embu, com base em critérios puramente litológicos, e o conjunto situado a norte das falhas é representado pelo Grupo São Roque, subdividido em Grupo São Roque e Grupo Serra do Itaberaba.

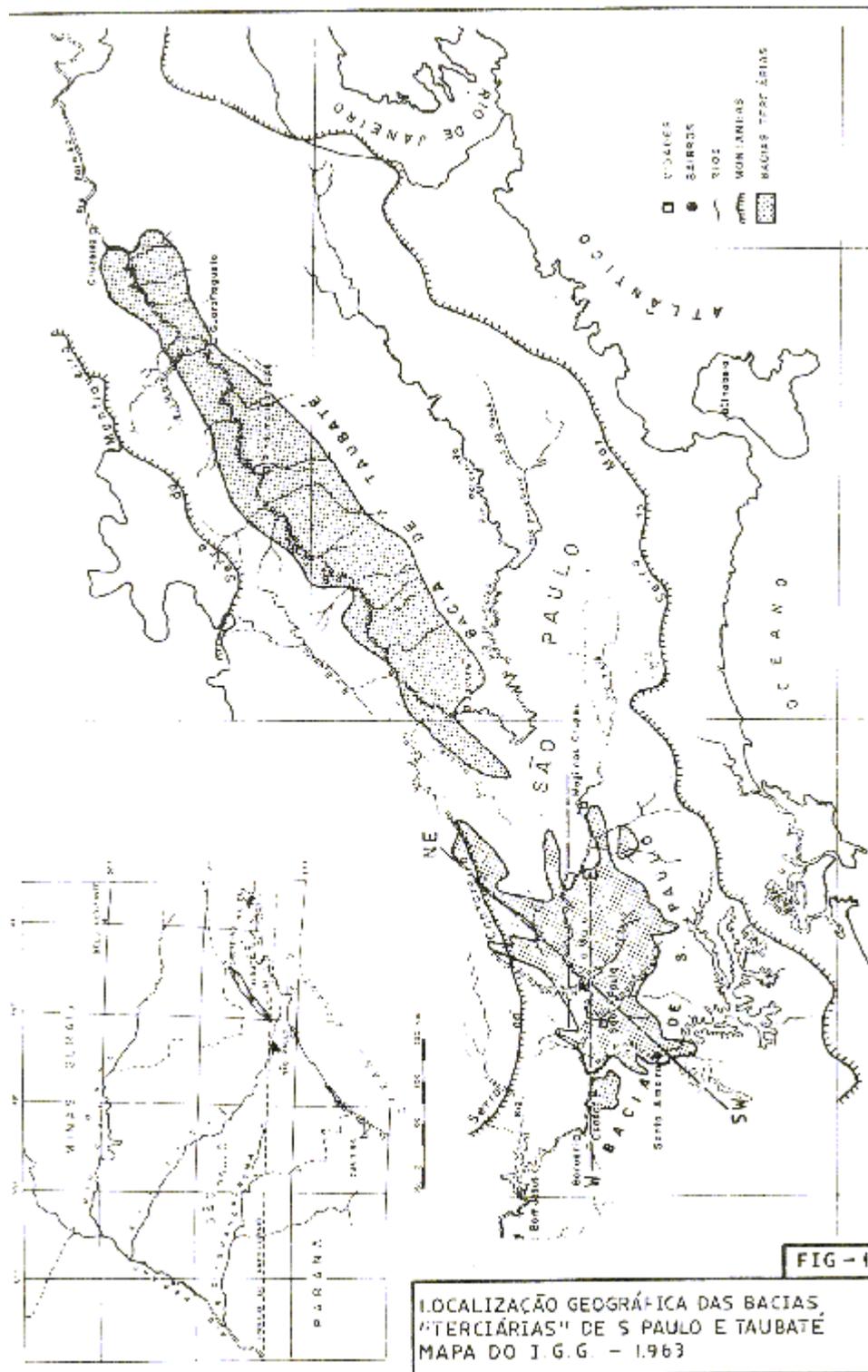


FIGURA 8 – LOCALIZAÇÃO GEGRÁFICA DAS BACIAS DE SÃO PAULO E TAUBATÉ
 FONTE: COZZOLINO (1989)

Segundo Parisot (1983), as rochas cristalinas apresentam ainda uma diferenciação vertical, onde pode ser observada uma camada superior referente ao manto de intemperismo e outra, sotoposta, referente às rochas propriamente ditas. O manto de intemperismo se constitui de uma zona de alteração de espessura variável, com até dezenas de metros, onde podem ser individualizadas duas camadas com características diferentes:

- uma inferior, no contato com a rocha fresca do embasamento, onde a alteração preserva ainda a estrutura da rocha original e os minerais primários ainda podem ser visualizados. Trata-se de um saprolito proveniente de uma alteração parcial com formação de argilo-minerais do grupo da caolinita.
- outra superior, totalmente alterada, com textura argilosa ou argilo-arenosa, constituída essencialmente de quartzo, caolinita e óxidos e hidróxidos de ferro. Representa os produtos lateríticos da alteração das rochas cristalinas.

O preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo, assentado quase que exclusivamente sobre o Grupo Açungui, guarda os registros das movimentações tectônicas ocorridas na área durante o Cenozóico. Os sedimentos terciários da Bacia de São Paulo apresentam área de distribuição muito irregular, com pouco mais de 1.000 km². A borda norte é retilínea, controlada pelas zonas de cisalhamento, Taxaquara-Jaguari, enquanto que ao sul os contatos com o embasamento cristalino são irregulares.

Os sedimentos ocorrem entre Arujá e Embu-Guaçú, numa extensão de 75 km, e entre Santana e Santo André, com cerca de 25 km, respectivamente os eixos maior e menor da bacia. Ocorrem ainda ramificações para leste, passando por Mogi das Cruzes, Biritiba Mirim e alcançando os arredores de Salesópolis e, para o sul, até Engenheiro Marsillac. Estas ramificações são, entretanto, de pequena expressão em área.

Quanto à espessura dos sedimentos, Takiya *apud* Riccomini e Coimbra (1992) apresenta dados que indicam uma espessura máxima contínua de 256 m, na Moóca, na sondagem nº 384 do Departamento de Águas e Energia Elétrica DAEE. Entretanto, o registro de maior espessura é aquele da sondagem para água subterrânea executada no

Astroblema de Colônia, situado a cerca de 35 km ao sul do centro da Cidade de São Paulo, já fora do corpo principal de sedimentos da bacia, com 263 m de profundidade, sem atingir o embasamento (Riccomini, 1989). Na região de Guarulhos e a leste do município de São Paulo (Moóca, Tatuapé e Vila Formosa), as espessuras de sedimentos terciários ultrapassam os 170 m (Riccomini e Coimbra, 1992).

Segundo Cozzolino (1989), os sedimentos que preenchem a Bacia de São Paulo são produto da erosão das serras que circundavam a região e que foram se depositando em lagos formados nas partes mais profundas da bacia e nos riachos formados nas encostas. Nos períodos de estiagem, os lagos, ao secarem, deixavam argila depositada no fundo. Um novo período chuvoso provocaria enchentes que depositariam areais sobre as camadas de argila, justificando as sucessivas e descontínuas camadas de diferentes granulometrias.

As unidades quaternárias, na RMSP, correspondem às extensas planícies aluviais associadas aos principais rios da região (Tietê, Pinheiros e Tamanduateí), presentes também ao longo das drenagens de menor porte. Segundo Melo *apud* Riccomini e Coimbra (1992), os depósitos pleistocênicos compreendem predominantemente colúvios argilo-arenosos, com lentes mais argilosas ou conglomeráticas, ocasionalmente exibindo madeira fóssil, e aluviões subordinados constituídos por conglomerados basais sobrepostos por areias grossas e conglomeráticas com estratificações cruzadas, gradando para areias finas a médias, com porções de argilas arenosas, podendo ocorrer também fragmentos de madeira fóssil nesses dois últimos pacotes.

O modelo tectônico regional proposto por Riccomini (1989) pode ser assim resumido:

- a) Paleógeno (Eoceno-Oligoceno): formação da depressão original (hemi-graben), continua na porção do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) entre São Paulo e Volta Redonda, como resultado do campo de esforços extensionais de direção NNW-SSE imposto pelo basculamento termomecânico da Bacia de Santos; preenchimento vulcano-sedimentar sintectônico (Grupo Taubaté), compreendendo um sistema de leques aluviais associados à planície aluvial de rios entrelaçados (Formação Resende), basal e lateral na bacia, um sistema *playa-lake* (Formação Tremembé), e um sistema fluvial meandrante (Formação São Paulo); eclosão de derrames de basanita a sudeste de Volta Redonda (Basanita Casa de Pedra), associados ao sistema fanglomerático: condições climáticas inicialmente

semi-áridas durante a sedimentação das formações Resende e Tremembé, passando para úmidas durante a deposição da Formação São Paulo.

- b) Neógeno (Mioceno): transcorrência sinistral de direção E-W. com extensão NW-SE e localmente compressão NE-SW: geração de soleiras (Arujá, Queluz, entre outras) relacionadas à transpressão, ou bacias tipo *pull-apart* (sistema fluvial entrelaçado da Formação Itaquaquetuba), associadas à transtração ou relaxamento final dos esforços dessa fase: separação das drenagens dos rios Tietê e Paraíba do Sul pela Soleira de Arujá, alto que separa as bacias de São Paulo e Taubaté, pela tectônica transpressional ao longo das falhas **NNW**, soerguendo e erodindo os sedimentos, e provocando a captura das cabeceiras do Rio Tietê pelo Rio Paraíba do Sul, com mudança do nível de base e erosão na porção central da Bacia de Taubaté. O cotovelo do Rio Paraíba do Sul, em Guararema, seria decorrente desse soerguimento;
- c) Plioceno a Pleistoceno Inferior: implantação de novo sistema fluvial meandrante (Formação Pindamonhangaba) na porção central da Bacia de Taubaté, em condições provavelmente quentes e úmidas;
- d) Pleistoceno Superior: inicialmente fase de estabilidade tectônica com a deposição de sedimentos colúvio-alúviais, frutos do remodelamento do relevo em função das variações climáticas; ao final, nova fase de transcorrência, agora dextral, com compressão NW-SE e geração de novas soleiras: definição da distribuição atual dos sedimentos nas bacias, ou embaciamentos. num arranjo *lazy-Z*;
- e) Holoceno: nova extensão NW(WNW)-SE(ESE), afetando depósitos de baixos terraços ligados à evolução da rede de drenagem do Rio Paraíba do Sul;
- f) Atual: campo de tensões indicando compressão, sugestivo de nova mudança no regime de esforços.

Na concepção atual, o quadro litoestratigráfico para os depósitos sedimentares continentais terciários da Bacia de São Paulo compreende uma seqüência basal com as formações Resende, Tremembé e São Paulo, enfeixadas no Grupo Taubaté, recoberta, de forma presumivelmente discordante, pela Formação Itaquaquetuba (Riccomini, 1989), como pode ser observado na Figura 9.

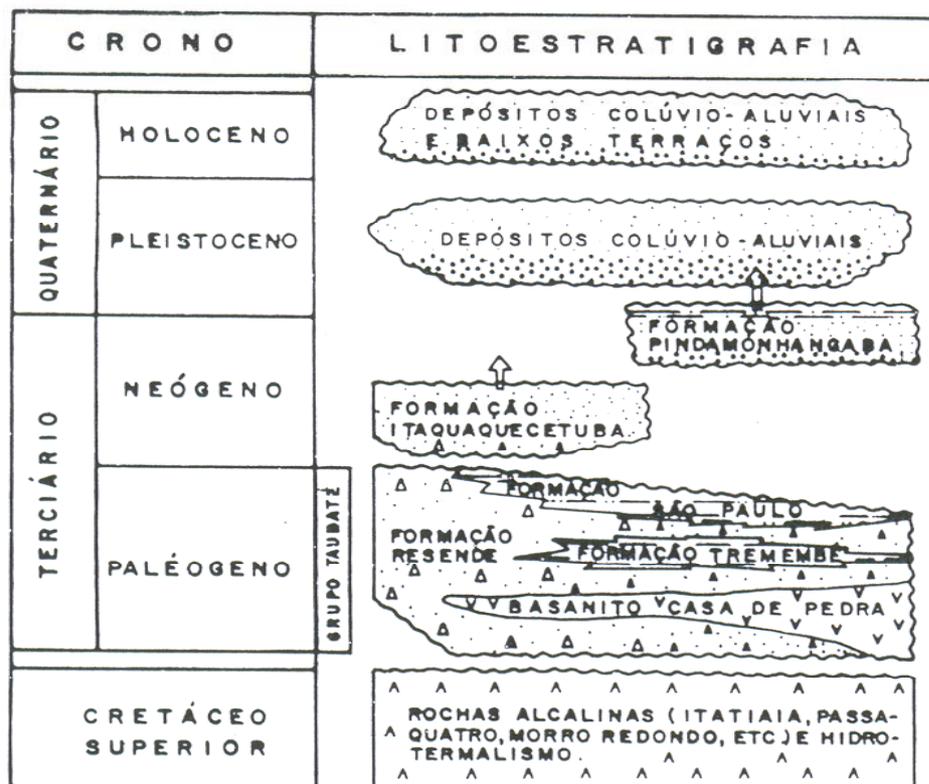


FIGURA 9 - LITOESTRATIGRAFIA DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES CONTINENTAIS TERCIÁRIOS DA BACIA DE SÃO PAULO Fonte: Riccomini e Coimbra (1992)

A Formação Resende apresenta distribuição generalizada na Bacia de São Paulo abaixo da cota 760 m, compreendendo, mais de 80% do seu preenchimento sedimentar. Ela encerra depósitos fanglomeráticos (leques aluviais) que gradam para depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (*braided*) (Amador *apud* Riccomini, 1989; Yassuda *et. al.* 1992). Em decorrência de sua gênese as areias são imaturas mineralogicamente apresentando elevados teores de feldspato. Constitui-se em camadas de argila e areias cinza a amarela de elevadas consistências e compacidades com pré-adensamento pronunciado, com camadas mais homogêneas e lateralmente persistentes quando comparadas com as da Formação São Paulo. As argilas praticamente não possuem areia e as areias são em geral pouco argilosas.

A existência de crostas duras carbonáticas na Bacia de São Paulo, apresentando composição calcítica e preenchendo as rachaduras de ressecção nos lamitos argilosos esverdeados, indicam sedimentação em condições de semi-aridez climática (Riccomini e Coimbra, 1992).

De outro lado, as espessuras consideráveis de lamitos pressupõem a existência de espesso regolito na área fonte, gerado em condições climáticas úmidas e quentes (Riccomini, 1989). Sua natureza essencialmente pelítica reflete intemperismo na fonte, onde rochas granitóides são abundantes. Quando decompostas em clima quente e úmido, propiciaram a formação de espessos regolitos, ricos em matriz argilosa. Dessa forma, esses regolitos poderiam pertencer a uma fase úmida prévia ou, talvez, concomitantemente à deposição dos lamitos (Lelinz; Wernlck; Hasui *apud* Riccomini e Coimbra, 1992).

Segundo Suguio *apud* Riccomini e Coimbra (1992), o advento dos fenômenos da reativação terciária coincidiu com a mudança climática para condições semi-áridas. A massa detrítica então disponível foi transportada à curta distância, com baixa disponibilidade de água no ambiente, acompanhada de processos tectônicos sinsedimentares, favorecendo a deposição de sedimentos imaturos.

A composição mineralógica das argilas, predominantemente do grupo da esmectitas com caráter detrítico, leva a considerar a existência de lamas de viscosidade elevada. Riccomini e Coimbra (1992) imaginam a seguinte cronologia relativa à Formação Resende: a) intemperismo, sob clima quente e úmido, gerando espesso regolito fóssil; b) transformação diagenética das argilas formadas em a) para esmectitas, sob influência de clima semi-árido; c) corridas-de-lama de alta viscosidade sob regime de chuvas torrenciais e/ou recrudescimento da atividade tectônica; d) preservação dos depósitos.

A Formação São Paulo têm sua principal área de exposição ao longo do espigão central da cidade de São Paulo, por onde correm a Rua Heitor Penteado e avenidas Doutor Arnaldo, Paulista, Vergueiro e Domingos de Moraes. De relativa importância são ainda as ocorrências na porção oeste da cidade, na região do Jaguaré, Parque Continental, Rio Pequeno e Cidade Universitária. De menor expressão são as exposições aparentemente descontínuas do Alto de Santana e da região do Anhangabaú-Mosteiro de São Bento-Pátio do Colégio (Yassuda *et. al.* 1992).

Os sedimentos da Formação São Paulo de origem fluvial meandrante constituem as argilas siltosas e areias argilosas vermelhas e variegadas que em função de sua gênese, são bastante heterogêneos e mal graduados. Predominam as argilas siltosas com lentes

esparsas de areia fina e média argilosa, conferindo aos sedimentos permeabilidade baixa, exceto em camadas localizadas de areais finas e médias localizadas em porções centrais dos espigões que se apresentam com elevada permeabilidade devido ao menor grau de intemperismo sofrido (Yassuda *et al.*, 1992).

Na cidade de São Paulo, couraças (crostas e concreções) limoníticas de espessura variada são freqüentes na interface entre sedimentos argilosos e arenosos. Conferem pronunciada impermeabilidade no topo das camadas pelíticas, sendo freqüentes as surgências das águas que percolam os pacotes arenosos, como pode ser observado na Av. Paulo VI (nas proximidades do viaduto da Rua Oscar Freire), na Av. Sumaré (próximo ao entroncamento com a Rua Atalaia) e ao lado do Estádio Municipal do Pacaembú (sentido Av. Pacaembú - Av. Dr. Arnaldo), entre outros locais. O espigão central da cidade tem suas elevações controladas pelas couraças limoníticas. No espigão central da cidade de São Paulo, na Av. Paulista, a formação pode atingir espessura da ordem de 70 m. Já na porção oeste da cidade os sedimentos desta formação apresentam distribuição altimétrica irregular, provavelmente resultante do tectonismo pós-sedimentar (Riccomini e Coimbra, 1992).

O sistema fluvial entrelaçado (*braided*) de Itaquaquecetuba, que, no conjunto, corresponde à Formação Itaquaquecetuba, apresenta um aspecto fundamental que o diferencia dos demais: ele encontra-se alojado em contatos ora erosivos, ora tectônicos, unicamente com rochas do embasamento pré-cambriano, não tendo sido, até o presente momento, verificada relação com as unidades sedimentares terciárias. Os sedimentos dessa formação ocorrem sob os depósitos aluviais holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamandatei (Riccomini e Coimbra, 1992).

A Formação Itaquaquecetuba é constituída por leques aluviais, com conglomerados, blocos e matacões em matriz arenosa, sem lama (argila), associados a planície aluvial com canais entrelaçados. Apresenta-se com areias muito permeáveis, praticamente sem horizontes argilosos, ocorrendo intenso processo de laterização (Yassuda *et al.*, 1992). Há presença de marcassita como cimento nesses arenitos, a qual, quando alterada, fornece grande variedade de sulfatos secundários (Atencio *apud* Riccomini e Coimbra, 1992).

Sob a designação de coberturas neocenozóicas são incluídos os depósitos de idade pliocênica e mais recentes. Correspondem às associações colúvio-aluviais, com espessuras de 4 a 5 m, de distribuição relativamente restrita, acompanhando grosso modo a topografia atual (IPT *apud* Riccomini e Coimbra, 1992). São incluídos ainda nesses depósitos os sedimentos que preenchem a depressão circular do Astroblema de Colônia (*e.g.* Riccomini, 1989).

A Figura 10 apresenta o mapa geológico da Bacia do Alto Tietê, editado no Laboratório de Informática Geológica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, com recursos financiados pelo FEHIDRO (Macedo [coord], 1998).

Pedologia

Segundo Cozzolino (1989), as camadas superficiais de solos, situados em cotas topograficamente elevadas, se apresentam extremamente enriquecidos com ferro, entre 4 a 16% de Fe_2O_3 , exibindo cor vermelha intensa. Para explicar a presença de tão elevada porcentagem de ferro em solos originados de rochas graníticas e gnáissicas pobres em ferro, Setzer (*apud* Cozzolino, 1989) admitiu a existência de um clima tropical com forte estação seca. Nos períodos chuvosos, a água contendo gás carbônico se infiltrava nos sedimentos e dissolviam o ferro, passando o a bicarbonato. Nos períodos de seca, o bicarbonato de ferro precipitaria sob a forma de hidróxido férrico, acima do nível da água subterrânea, onde o hidróxido férrico se desidrataria, concentrando-se numa forma pouco interperizável, resistindo à lixiviação.

Os levantamentos pedológicos de classificação dos solos da Bacia do Alto Tietê não têm considerado a mancha urbana, pelas dificuldades de análise de perfis de solo e também devido à intensa alteração antrópica nas camadas superficiais ao longo da história de ocupação da área. Assim, a maior parte dos terrenos sedimentares, que suportam o crescimento urbano, não tem sua pedologia classificada.

Hidrogeologia da Bacia do Alto Tietê

Existem basicamente dois tipos de aquíferos na Bacia do Alto Tietê, fraturado e o poroso, que correspondem, respectivamente, aos sistemas aquíferos Cristalino e Sedimentar, este último de idade Terciária. Devem ser citadas também as coberturas aluviais mais recentes, de idade Quaternária, que se desenvolveram ao longo dos principais rios que drenam a região como o Tietê, Pinheiros e Tamanduateí (Hirata e Ferreira, 2001).

Sistema Aquífero Cristalino

O domínio de rochas cristalinas tem uma extensão da ordem de 6.599 km², onde as condições predominantes de ocorrência das águas subterrâneas são de aquífero livre, heterogêneo e anisotrópico (SABESP/CEPAS-IGc,1994). A heterogeneidade das características hidrogeológicas do embasamento cristalino faz com que poços próximos entre si, espaçados de uma dezena de metros, possam apresentar condições de produção de água completamente diferentes (Parisot, 1983).

Segundo Parisot (1983), esse aquífero é formado por duas unidades de características diferentes. A primeira é representada pela rocha cristalina alterada, com espessura média estimada em 50 m podendo atingir, local e ocasionalmente, valores de até 150 m, onde a água percola nos interstícios da rocha decomposta, e a segunda, representada pela rocha cristalina fresca onde a água flui pelas fraturas.

Segundo a avaliação da tendência dos potenciais hidrogeológicos do aquífero cristalino da Região Metropolitana de São Paulo, realizada por SABESP/CEPAS-IGc (1994), as rochas granitóides de granulação variada e as rochas predominantemente gnáissicas apresentam uma tendência relativamente alta de potenciais hidrogeológicos, em função do caráter rúptil predominantemente, e/ou manto de intemperismo, em geral, mais arenoso. Por outro lado, os micaxistos, com quartzitos e metassiltitos subordinados e as rochas metacarbonáticas, compõem o domínio da tendência média, devido ao caráter relativamente dúctil, sobretudo, em função da alta argilosidade do manto de intemperismo.

Local e ocasionalmente, a presença dos corpos quartzíticos ou de rochas metacarbonáticas, podem resultar em poços de produtividade excepcional, superiores a 50 m³/h.

A capacidade específica média dos poços profundos no aquífero cristalino, conforme DAEE (1975), é de 0,34 m³/h.m, variando de 0,06 a 0,7 m³/h.m. Entretanto, 80% dos poços apresentam um valor de capacidade específica igual ou inferior à média. A vazão média dos poços é da ordem de 7 m³/h, podendo atingir até 90 m³/h, no entanto metade deles apresenta vazão igual ou inferior a 2 m³/h.

Em geral, os coeficientes de condutividade hidráulica variam entre 10⁻⁶ a 10⁻⁷ m/s no terço superior do perfil, e entre 10⁻³ a 10⁻⁴ m/s na zona de transição entre a rocha alterada e a rocha relativamente sã. Nas zonas de rochas fraturadas os coeficientes de condutividade hidráulica situam-se nas ordens de grandeza da seção inferior do manto de intemperismo, devido ao preenchimento das feições lineares por esses produtos de alteração (Rebouças e Cavalcante, *apud* SABESP/CEPAS-IGc, 1994).

Segundo Menegasse (1991), nos metassedimentos do Grupo São Roque da porção noroeste da Grande São Paulo, as profundidades mais freqüentes dos poços tubulares situam-se entre 100 e 150 m, com profundidades de entrada de água principalmente entre 50 e 100 m. Já na região de Guarulhos, a profundidade média dos poços é de 193 m, com principais entradas de água entre 150 a 210 m (Diniz, 1996).

Sistema Aquífero Sedimentar

Segundo SABESP/CEPAS-IGc (1994), foram identificadas três fácies principais na Bacia Sedimentar de São Paulo. São elas:

- **Formação São Paulo** - constituída por depósitos com camadas decimétricas com granulometria variando de cascalho para areia, com intercalações de silte e argila;
- **Formação Resende - membro superior** - caracterizada por depósitos de sistemas

de leques aluviais que evoluem para a planície entrelaçada, onde predomina uma seqüência rítmica de camadas arenosas e argilosas; e

- **Formação Resende - membro inferior** - caracterizada por depósitos de sistemas de leques aluviais onde predominam lamitos arenosos;

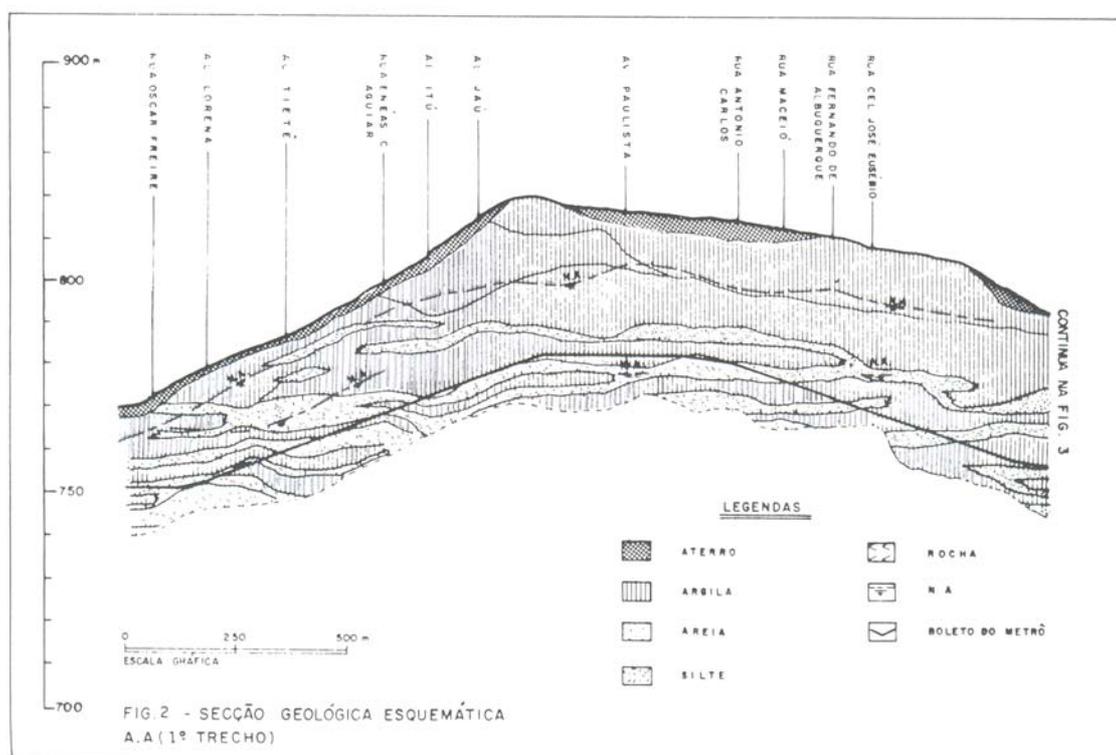
Os sedimentos da Formação São Paulo e Formação Resende - membro inferior, apresentam potenciais hidrogeológicos de tendência alta, enquanto a Formação Resende - membro superior potencial médio, devido à predominância de intercalações lenticulares e um conseqüente perfil heterogêneo. As intercalações e/ou interdigitações de camadas e/ou lentes arenosas e argilosas, ou ainda em proporções variadas, engendram condições hidrogeológicas extremamente heterogêneas e anisotrópicas, ora de aquífero livre, ora de aquífero semiconfinado. Assim, as Formações São Paulo e Resende podem ser consideradas como um único sistema aquífero, devido às suas ligações hidráulicas e à dificuldade de diferencia-las pelos perfis geológicos dos poços tubulares (SABESP/CEPAS-IGc, 1994). Os coeficientes de permeabilidade dos sedimentos arenosos de São Paulo apresentam variações extremas, sendo praticamente impossível estabelecer-se valores típicos para as formações. As variações são decorrentes da variação do teor de finos das areias e do sobreadensamento (Yassuda *et al.*, 1992).

Levantamentos feitos por Yassuda *et al.* (1992), por meio de sondagens convencionais indicam que há mais de um nível d'água (mais freqüentemente dois níveis) nas partes mais altas (espigões), decorrente das intercalações de camadas de areia com argila. Já nas regiões baixas, próximas aos leitos dos principais rios da cidade de São Paulo, a camada arenosa é mais espessa, sendo que, usualmente, encontra-se apenas um nível d'água, condicionado pelo nível do rio. Há casos até onde o segundo nível d'água, o mais profundo, chega a ser inferior ao nível do rio imediatamente vizinho. Estas condições de nível d'água podem ser visualizadas na Figura 11, que apresenta seções geológicas típicas dos sedimentos Terciários, no município de São Paulo.

Segundo Yassuda *et al.* (1992), é possível “drenar” o lençol superior para o inferior pela simples perfuração da argila que lhe dá apoio. A execução de rebaixamento do lençol freático, mesmo que profundo, em áreas com substratos consolidados (argilas

pré-adensadas e areias compactas de São Paulo), nas obras da Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRÔ), não tem causado grandes problemas de recalque nas regiões vizinhas às obras.

Evidentemente as posições dos níveis d'água variam de local para local, mas pode-se afirmar que, de forma geral, o nível d'água superficial acompanha a superfície da topografia atual. É também evidente que os níveis d'água são condicionados pela geologia presente em cada região, pelos pontos de alimentação e pelos pontos de carga e descarga de água. Com relação aos níveis d'água mais profundos, Rocha *apud* Hirata e Ferreira (2001), a partir de dados do cadastro do DAEE comprova um processo de abatimento ao longo do tempo, possivelmente ocasionado pela ação de bombeamento de poços tubulares sem a correspondente recarga.



A - SEÇÃO GEOLÓGICA MOSTRANDO O ESPIGÃO DA AV. PAULISTA (SÃO PAULO)

FIGURA 11 – SEÇÕES GEOLÓGICAS ESQUEMÁTICAS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO
Fonte: Yassuda *et al.* (1992)

continua

Além dos terrenos sedimentares de idade Terciária, as coberturas colúvio-aluviais de idade Quaternária atingem extensão significativa, cobrindo, por vezes, as rochas do embasamento Pré-Cambriano. Estes recobrimentos funcionam como aquíferos de transferência para os terrenos sotopostos, tanto dos sedimentos terciários como do manto de alteração das rochas cristalinas (SABESP/CEPAS-IGc,1994).

A Figura 12 apresenta o mapa hidrogeológico da Bacia do Alto Tietê, editado no Laboratório de Informática Geológica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, com recursos financiados pelo FEHIDRO (Macedo [coord], 1998).

Modelo hidrogeológico conceitual

O sistema hidrogeológico da Bacia do Alto Tietê é limitado pelos setores montanhosos, formadores dos divisores topográficos de águas superficiais e subterrâneas (SABESP/CEPAS-IGc,1994) e como visto, existem basicamente dois sistemas aquíferos, o Cristalino e o Sedimentar.

No aquífero cristalino é possível distinguir duas unidades segundo o seu comportamento hidráulico. O primeiro, relacionado às rochas intemperizadas, conforma um aquífero de porosidade granular bastante heterogêneo e de natureza livre (Hirata e Ferreira, 2001). A espessura média deste manto de intemperismo é de 50 m, e os parâmetros de condutividade hidráulica são muito variáveis, entre 10^{-1} e 10^{-5} cm/s (SABESP/CEPAS-IGc,1994).

Sob o manto de intemperismo e, muitas vezes conectado hidráulicamente, ocorre o aquífero cristalino propriamente dito, onde as águas circulam por descontinuidade da rocha (fraturas e aberturas). Esta unidade é de caráter livre a semilivre, heterogêneo e anisotrópico (Hirata e Ferreira, 2001).

O pacote sedimentar de idade Terciária ocupa blocos afundados do embasamento geológico (grabens) e sobrepõe-se ao sistema aquífero das rochas cristalinas. O domínio de ocorrência mais importante constitui a Bacia Sedimentar de São Paulo e ramificações laterais (grabens do Jaguaré, Cumbica e Braz Cubas). A espessura média do pacote sedimentar é estimada em 100 m. As características hidráulicas são, também, muito variadas, com coeficientes de condutividade hidráulica variando entre 10^{-2} e 10^{-6} cm/s (SABESP/CEPAS-IGc, 1994).

As principais entradas de água do sistema hidrogeológico são as infiltrações das chuvas que caem nos domínios relativamente mais permeáveis e realçados do relevo, cujos fluxos subterrâneos convergem para o sistema de drenagem e para os pacotes de sedimentos, geralmente localizados nos setores mais deprimidos da topografia (SABESP/CEPAS-IGc, 1994). Outra importante recarga ocorre devido às perdas nas redes públicas de abastecimento de água e de coleta de esgoto (Rocha *et al.*, 1989 *apud* Hirata e Ferreira, 2001).

Segundo SABESP/CEPAS-IGc (1994), uma parcela entre 23 e 43% das chuvas que caem neste domínio (média de 1520 mm/ano) se infiltra no manto de alteração das rochas cristalinas do embasamento geológico pré-cambriano (6.599 km²) e nos depósitos arenosiltosos da Bacia Sedimentar de São Paulo (1.452 km²).

As águas dos aquíferos fluem em direção às drenagens superficiais. O rio Tietê representa, junto à soleira de Barueri, o ponto de menor potencial hidráulico do aquífero e onde todas as águas drenadas dos dois sistemas aquíferos (Cristalino e Sedimentar) finalmente fluem. Assim, considera-se que modelo de circulação hidraulicamente fechado (Rocha *apud* Hirata e Ferreira, 2001), onde, segundo DAEE (1975), 60 a 80% do total do escoamento dos rios provêm das águas subterrâneas.

Mas outra saída importante de água dá-se pelo bombeamento dos milhares de poços em atividade na Região, que se excessivo, poderá inverter os gradientes, induzindo infiltrações a partir dos rios (SABESP/CEPAS-IGc, 1994). Segundo Parisot (1983), a extração da água do aquífero se faz em detrimento do escoamento superficial.

Segundo Menegasse (1991), a média de profundidade de poços tubulares na RMSP é de 100 m com valores variando entre 50 e 250 m nos domínios da Bacia Sedimentar. No Aquífero Cristalino, as profundidades mais freqüentes dos poços situam-se entre 100 e 150 m. Nestes, as entradas de água variam entre 15 e 100 m de profundidade e em 84% dos casos correspondem ao contato do manto de intemperismo com a rocha sã, o que significa a maior captação no aquífero livre, que está sob a influência das fontes potenciais de poluição.

Priorização dos corpos hídricos subterrâneos

Para a priorização dos corpos hídricos subterrâneos, além da sua delimitação tridimensional e do seu modelo conceitual de regime de fluxo das águas subterrâneas, devem ser considerados os aspectos de:

- vulnerabilidade natural dos aquíferos ao risco de poluição;
- fontes potenciais de poluição e informações prévias de alteração das condições naturais; e
- densidade de poços tubulares de abastecimento;

A Figura 13 apresenta o mapa de vulnerabilidade natural ao risco de contaminação para das unidades hidrogeológicas da Bacia do Alto Tietê, elaborado a partir do mapa que apresenta estas unidades, reclassificando-as de acordo com sua vulnerabilidade (Macedo [coord], 1998).

O termo vulnerabilidade representa a susceptibilidade de um aquífero em ser adversamente contaminado por uma carga antrópica específica, e pode ser definido como função da:

- acessibilidade hidráulica da zona não saturada; e
- capacidade de atenuação dos estratos sobre a zona saturada (zona não-saturada em aquíferos livres ou aquitardes em aquíferos confinados).

Para a elaboração do mapa de vulnerabilidade, Hirata (1998b) adaptou o método desenvolvido por Foster e Hirata (1988), definindo a vulnerabilidade de cada unidade, a partir de suas características geológicas (tipo de rocha que compõem a zona não saturada) e hidráulicas (tipo de aquífero e sua geometria). Adicionalmente cada unidade foi analisada em termos de sua produção relativa. Os critérios são apresentados no Quadro 14.

Quadro 14 – Índices de vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas

UNIDADE HIDROGEOLÓGICA	TIPO DE AQUÍFERO	LITOLOGIA DA COBERTURA	CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE
Unidade Quaternária Baixa produtividade aquífera	Livre, porosidade primária	Predominantemente areno-argilosos, subordinadamente com intercalações de cascalhos	Alta vulnerabilidade
Aquífero Resende Média produtividade aquífera	Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de lamitos arenosos a argilosos com seixos e intercalações de até 1 m de areias e cascalhos	Média vulnerabilidade em áreas de semi-confinamento
Aquífero Cristalino B Média produtividade aquífera	Livre e fraturado	Alteração de rochas metassedimentares, incluindo quartzitos, xistos, metassiltitos, metacarbonáticas e suas correspondentes sãs em profundidade	Média vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta. Alta vulnerabilidade nas rochas metacarbonáticas
Aquífero São Paulo Média-baixa produtividade aquífera	Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de camadas de cascalhos e areias	Média a baixa vulnerabilidade em áreas de semi-confinamento
Aquífero Cristalino A Baixa produtividade aquífera	Livre e fraturado	Alteração de rochas ígneas e metamórficas, incluindo granitos, gnaisses e filitos e suas correspondentes sãs em profundidade	Média a baixa vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta. Baixa vulnerabilidade nos filitos

Fonte: Hirata In: (Macedo [coord], 1998)

A classificação em três níveis de vulnerabilidade, alta, média e baixa, é relativa, muito embora se entenda que um aquífero com alto índice é aquele passível de ser contaminado por quase todos os tipos de contaminantes, incluindo as bactérias, que apresentam baixa persistência. A média vulnerabilidade relaciona-se à aplicação de contaminantes de média persistência e mobilidade, como metais pesados e alguns produtos orgânicos sintéticos, incluindo os aromáticos, e a baixa vulnerabilidade associa-se a aquíferos susceptíveis apenas aos produtos persistentes e móveis, como solventes sintéticos, sais e nitrato.

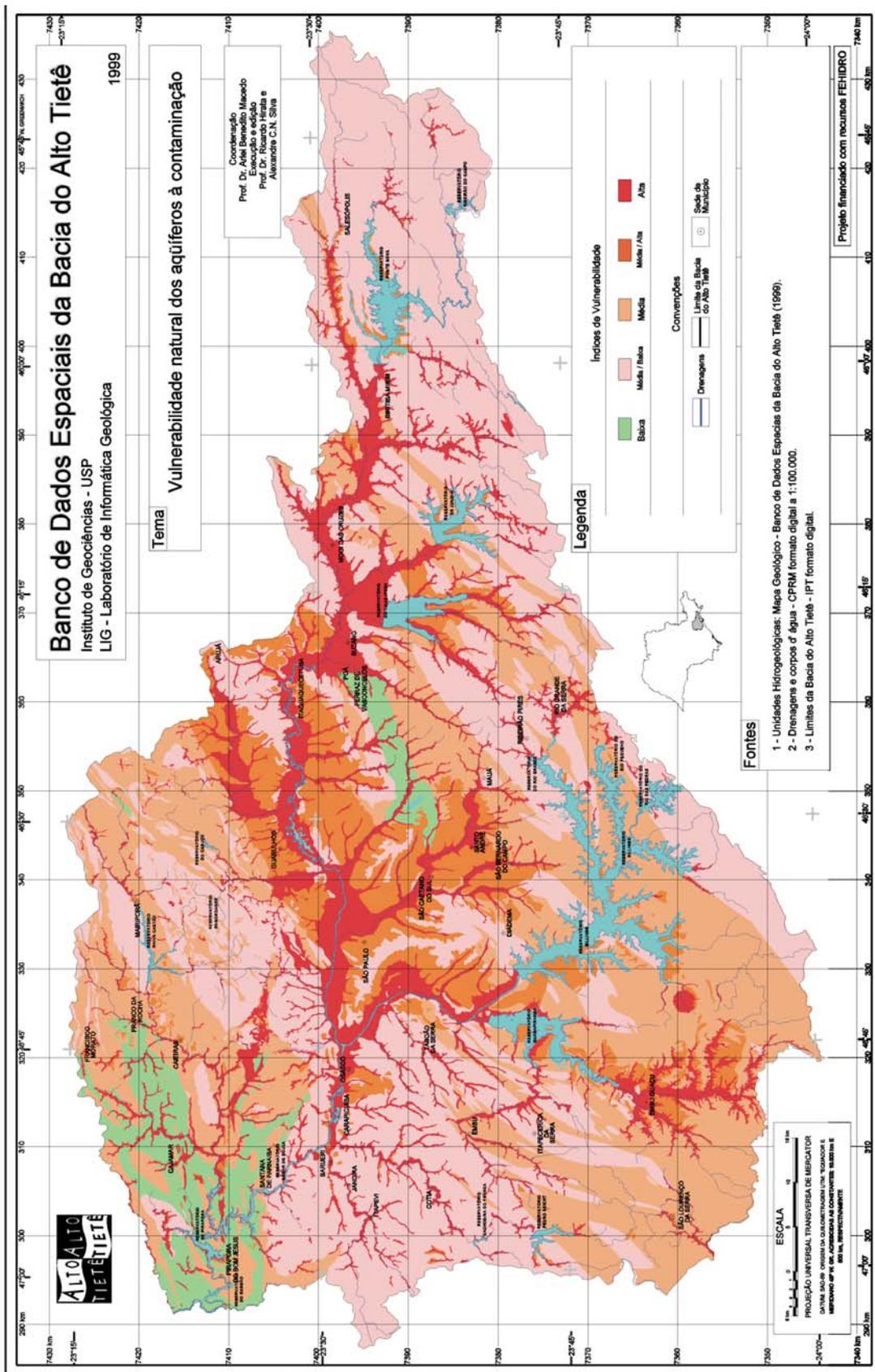


Figura 13 - Mapa de Vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação.
 Fonte: Macedo, A.B. (coord.), 1998 - autor Prof. Dr. Ricardo Hirata

Em relação às fontes pontuais com potencial de poluição de solo e águas, consultou-se o cadastro da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), considerando os códigos das atividades descritos no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas da CETESB (CETESB, 1999).

Deve ser observado que este cadastro foi elaborado com base nas informações contidas em processos de licenciamento dos empreendimentos, arquivados desde a década de 1970, quando da criação da CETESB. Assim, a maioria dos registros não apresenta coordenadas, necessárias para avaliar a distribuição espacial dos empreendimentos potencialmente poluidores. A partir de 2003, com a obrigatoriedade legal de renovação de licenças de todas as fontes potenciais de poluição, a CETESB elaborou um cadastro eletrônico a ser preenchido pelo empreendedor, incluindo coordenadas e comprovação de outorgas de direito de uso da água, quando da captação ser particular. Espera-se com isso que, em alguns anos, os dados estarão mais bem consistidos.

Com o objetivo de obter uma visão geral da distribuição destes empreendimentos, os registros foram agrupados por tipologia de atividade e por município. Na tipologia “Mecânica-Metalúrgica” foram consideradas mais de 22.000 atividades relacionadas com a manipulação de materiais metálicos, incluindo desde a fabricação de tratores a oficinas de reparos mecânicos e fabricação de bijuterias. Na tipologia “Elétrica-Eletrônica”, foram agrupados mais de 5.000 empreendimentos de fabricação de equipamentos eletro-eletrônicos, iluminação, condutores elétricos, transmissão de energia e telefonia. Na tipologia “Química”, considerou-se cerca de 3.000 empreendimentos de fabricação, manipulação e estocagem de produtos químicos industriais, fármaco-veterinários, tintas e vernizes, de limpeza e higiene e atacadistas de combustíveis. A distribuição destes empreendimentos, por municípios da Bacia do Alto Tietê, pode ser observada nas Figuras 14, 15 e 16.

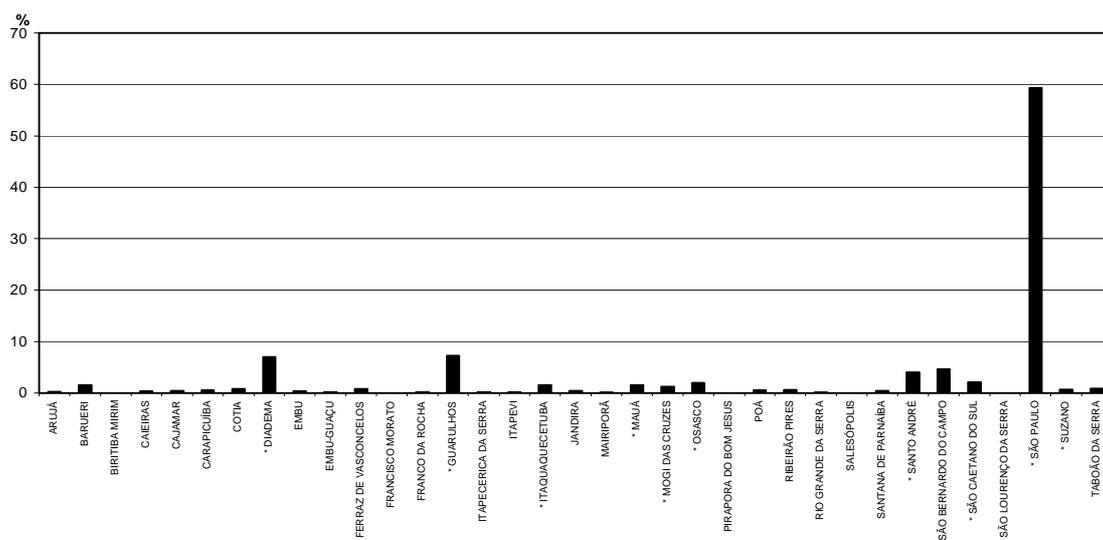


Figura 14 – Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “mecânica-metalúrgica”

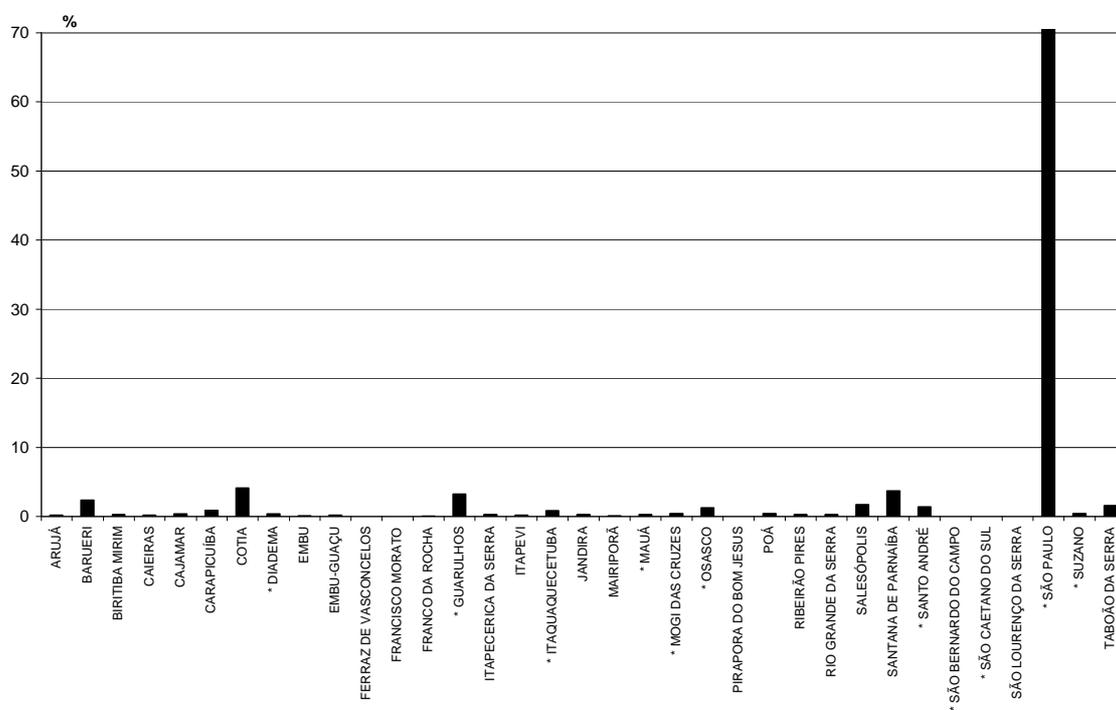


Figura 15 – Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “eletro-eletrônica”

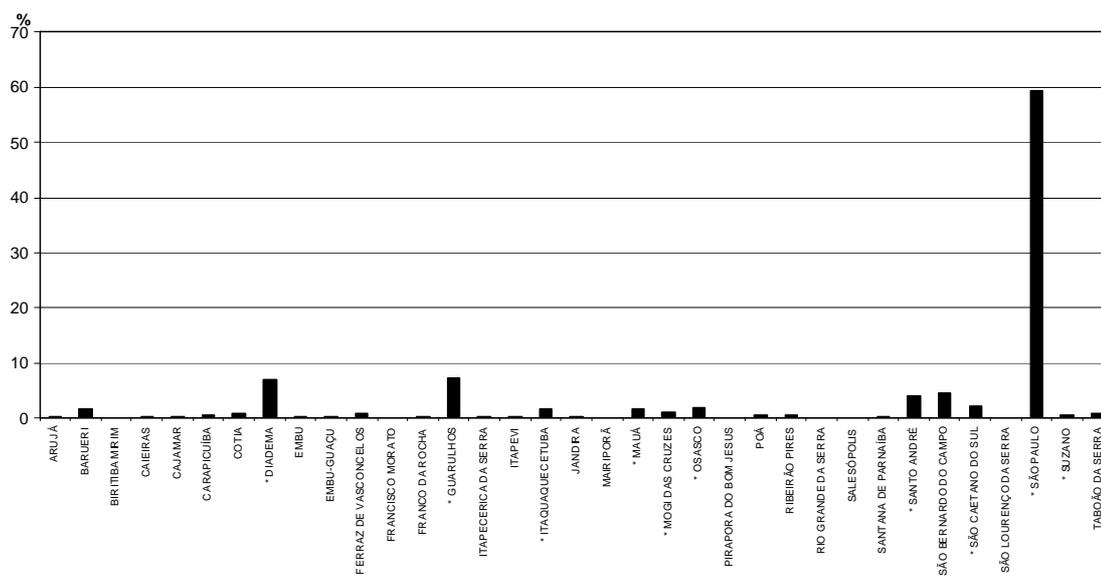


Figura 16 – Distribuição de empreendimentos potencialmente poluidores de tipologia “química”

De acordo com a distribuição apresentada, observa-se uma concentração de fontes potenciais de poluição nos municípios de São Paulo, Guarulhos, Diadema, São Bernardo do Campo, Santo André, São Caetano do Sul, Barueri, Osasco, Itaquaquecetuba e Mauá. Nestes municípios, devido ao grande número de empreendimentos com potencial de poluição de águas subterrâneas, o comportamento das fontes fixas assemelha-se às fontes difusas de poluição.

Para a escala utilizada, a distribuição das principais tipologias de fontes fixas de poluição, por município, foi suficiente para indicar a região prioritária da Bacia do Alto Tietê para monitoramento. Para um maior detalhamento, deverão ser considerados o porte dos empreendimentos e as outras tipologias, como as atividades de mineração e de disposição de resíduos, com a respectiva localização em sub-bacias. Deverá ser considerada também a localização das áreas declaradas contaminadas. Para isto é preciso que cadastro de fontes de poluição da CETESB seja aperfeiçoado e consistido.

Em relação às fontes de poluição de origem agrícola, foram consultados os mapas agrícolas da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, disponíveis no endereço eletrônico www.cati.sp.gov.br. Por estes levantamentos da Secretaria da Agricultura, observa-se que a região de Mogi das Cruzes concentra a produção de hortaliças do estado e há também produção de flores e frutíferas, sendo uma área prioritária de fontes difusas na Bacia do Alto Tietê.

Para avaliação da densidade de poços tubulares existentes na Bacia do Alto Tietê (BAT), consultou-se o cadastro eletrônico do Departamento de Águas e Energia Elétrica disponível em www.dae.sp.gov.br. A Figura 17 apresenta a distribuição de poços cadastrados pelo DAEE em municípios da BAT e a Tabela 1 apresenta o número de poços cadastrados no DAEE, por município e por uso, em janeiro de 2005, evidenciando a importância do uso das águas subterrâneas tanto para abastecimento público como para complementação da demanda, por captação privada.

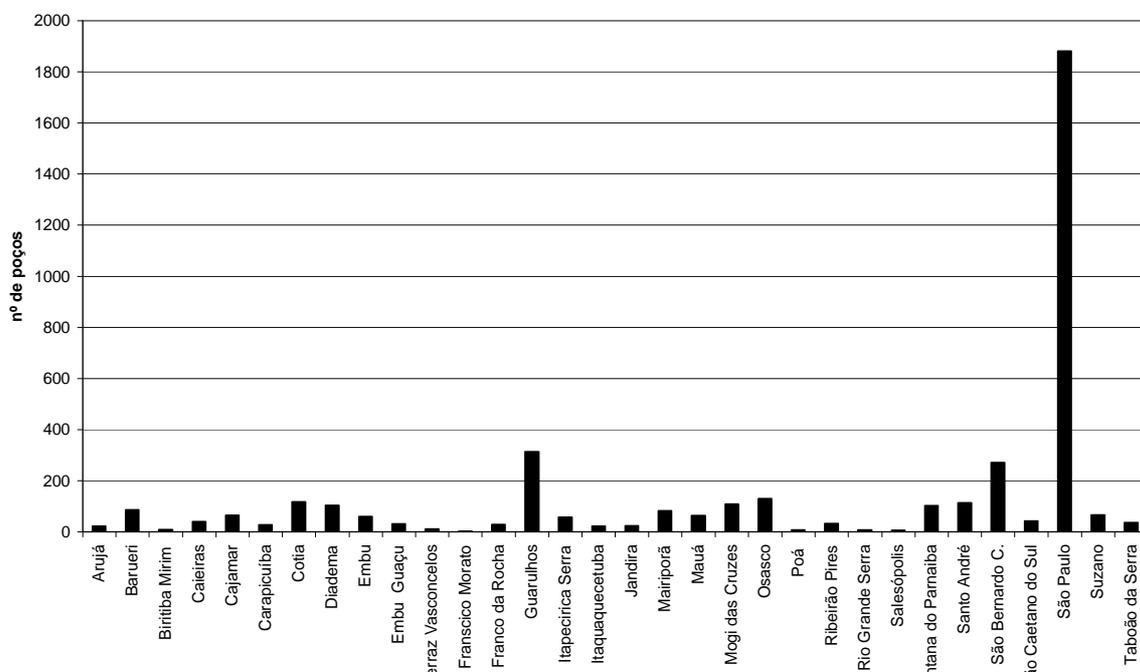


Figura 17 – Densidade de poços cadastrados pelo DAEE nos municípios da Bacia do Alto Tietê, em janeiro de 2005

Tabela 1 – Distribuição de poços cadastrados pelo DAEE, por município e por usos, em janeiro de 2005

Município	Nº total de poços	Distribuição por Aquífero (nº de poços)			Distribuição por Usos (nº de poços)					
		cristalino	sedim.	não espec.	indust.	comerc.	abastecimento		água mineral	outros
							Público a	Privado b		
Arujá	23	18		5	10		2	8		3
Barueri	86	72	2	12	35	24	3	20		4
Biritiba Mirim	9	8	1	1		2	1	4	2	
Caieiras	41	30		11	24	9	3	7		4
Cajamar	65	56		9	28	8	20	7	1	2
Carapicuíba	27	22		5	7	11		6		3
Cotia	118	87		31	41	10	24	41		2
Diadema	104	82	1	21	85	13	3		1	2
Embu	60	46		14	33	7	9	8		3
Embu Guaçú	32	24		8	11	2	12	7		
Ferraz Vasconcelos	12	7		5	11	1				
Francisco Morato	3	2		1				3		
Franco da Rocha	29	28		1	15		5	7	1	1
Guarulhos	314	145	105	64	172	49	48	18		24
Itapeverica Serra	57	50		7	17	4	6	18	12	4
Itaquaquecetuba	23	11		12	18	2		3		
Jandira	24	21		3	10	2	9	3		
Mairiporã					11		28	35	1	9
Mauá	63	52	2	8	54	8		1		
Mogi das Cruzes	109	71	12	20	40	5	19	39		7
Osasco	130	101	10	19	57	32	16	14		9
Poá	7	3	2	1	5	1		1		
Ribeirão Pires	33	16		17	15	3	3	6	2	4
Rio Grande Serra	7	5		2	4	2				1
Salesópolis	6	5		1	1		3	1		1
Santana do Parnaíba	103	93	3	7	19	3	25	38	2	6
Santo André	114	90	4	20	69	23	9	8		5
São Bernardo C.	271	205	8	58	188	28	12	23	4	16
São Caetano do Sul	43	34	2	7	28	6	4	4		1
São Paulo	1882	1225	386	271	583	413	264	486	3	142
Suzano	66	54	2	10	41	6	4	12		3
Taboão da Serra	37	31	--	6	18	8	5		1	5
Total	3982									
Porcentagem relativa ao total (%)		69,6	13,5	16,9	41,6	17,1	13,2	20,7	0,9	6,6

a) poços de abastecimento público e de uso comunitário

b) abastecimento em condomínios, loteamentos e uso urbano, rural e agrícola

Apesar dos poços cadastrados estarem instalados, em sua maioria, no aquífero cristalino, priorizou-se, para monitoramento, o aquífero sedimentar, com base na distribuição de fontes potenciais de poluição e na vulnerabilidade dos aquíferos, identificando-se a área, aqui denominada de Sub Bacia Billings/Tamanduateí expandida. Esta área é limitada ao norte pelas falhas de Taxaquara – Jaguari, incluindo as áreas sedimentares ao norte do rio Tietê, notadamente no Município de Guarulhos; a oeste pelo rio Pinheiros e Reservatório Billings; e a leste pelo reservatório de Taiacubepa e rio

Aricanduva, incluído as áreas sedimentares ao sul do rio Tietê, nos municípios de Itaquaquetuba e Mogi das Cruzes.

Destaca-se que, segundo Valle (1997), a Bacia do Tamanduateí representa 11,4% da área total da Bacia do Alto Tietê. Este rio, que nasce no município de Mauá e atravessa as áreas urbanas dos municípios de Santo André, São Caetano do Sul e São Paulo, desaguando na margem esquerda do rio Tietê, transporta efluentes de mais de 2.000 indústrias, inclusive petroquímicas.

5.3.6 Definição do número de pontos de amostragem

Considerando a intensidade das pressões antrópicas existentes sobre o corpo hídrico priorizado, sugere-se que na área priorizada, as quadriculas tenham dimensões de 5 x 5 km. Nas áreas do entorno imediato e no cinturão verde onde é intenso o uso de agrotóxicos, a malha deverá ter 10 x 10 km. Nas demais áreas, as quadriculas serão divididas a cada 20 km. A Figura 18 apresenta a divisão da área da Bacia do Alto Tietê nas quadriculas propostas. Para o monitoramento da qualidade, isto representará 86 pontos de amostragem, distribuídos conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 - PROPOSTA DE DISTRIBUIÇÃO DE PONTOS DE AMOSTRAGEM NA BACIA DO ALTO TIETÊ EM FUNÇÃO DA PRIORIZAÇÃO DE ÁREAS

Localização	Nº de pontos
no corpo hídrico prioritário, tendo a Sub Bacia do Tamanduateí ao centro (quadriculas de 5 x 5 km)	54
no entorno imediato do corpo hídrico prioritário e nas áreas agrícolas do leste da Bacia do Alto Tietê (quadriculas de 10 x 10 km)	24
nas demais áreas da Bacia (quadriculas de 20 x 20 km)	08
Total	86

Para monitoramento do nível d'água, o número de pontos de medição dependerá da disponibilidade de mão de obra para realização de medições com freqüência mensal.

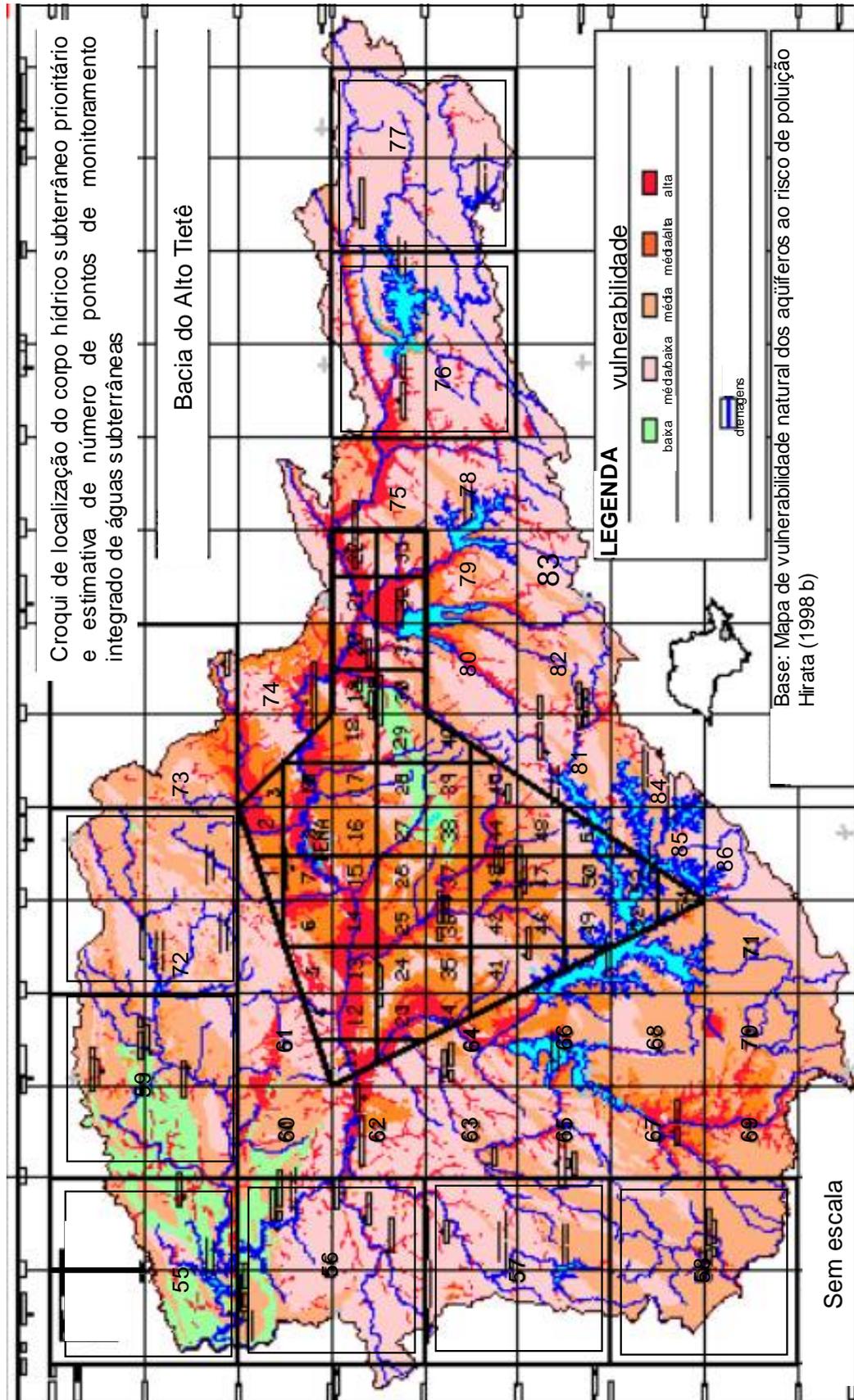


Figura 18 - Divisão da área da Bacia do Alto Tietê por quadrículas para dimensionamento do número e distribuição dos pontos de amostragem

5.3.7 Seleção de pontos de amostragem.

Esta etapa deverá ser implementada após a anuência dos órgãos e instituições citadas nesta dissertação. Entretanto, pode-se prever algumas fontes de informação a serem utilizadas.

Definiu-se que os pontos de monitoramento podem ser poços tubulares de abastecimento público ou privado, nascentes ou poços perfurados exclusivamente para monitoramento. Para monitoramento da qualidade e de vazão, deverão ser selecionados poços tubulares preferencialmente de abastecimento público ou de grande vazão, com até 20 metros profundidade de nível estático, captando água de um único sistema aquífero. Para monitoramento do nível d'água, a prioridade de ser para poços desativados ou poços de monitoramento. Como o corpo hídrico priorizado foi o sedimentar, na área selecionada os poços deverão estar captando neste sistema aquífero. O aquífero cristalino será monitorado nas demais áreas da Bacia.

Consultou-se pela Internet o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, "Serviço Geológico do Brasil" (CPRM). Verificou-se que a maioria das informações sobre os poços do estado de São Paulo é fornecida pelo DAEE e que muitos dados, não estão preenchidos. Assim, na seleção dos poços para compor a rede, recomenda-se a consulta direta no cadastro do DAEE.

Sugere-se que, para seleção de nascentes nas áreas de afloramento de rochas do Embasamento Cristalino, as prefeituras municipais sejam consultadas, uma vez que possuem cadastros das fontes alternativas de abastecimento. Podem ser citados os exemplos do Serviço Municipal Vigilância Sanitária de São Bernardo do Campo e o Serviços Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André (SEMASA), que possuem bons cadastros.

A Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRO), tem instalado piezômetros ao longo das linhas do Metrô para monitoramento do rebaixamento do nível d'água durante as obras de construção das linhas do Metrô. Como alguns piezômetros foram instalados no início da construção das primeiras linhas, a utilização destes, para fins de monitoramento de nível d'água e qualidade, depende de uma inspeção, para avaliar suas atuais condições. Estes pontos estão localizados no corpo hídrico priorizado e novos piezômetros são instalados à medida que progridem as obras das novas linhas subterrâneas do Metrô, representando bom potencial para monitoramento de água subterrânea.

Também há dados de nível d'água de poços de monitoramento de fontes potenciais de poluição nos processos de controle ambiental, gerenciados pela CETESB. A abrangência destes pontos em área é expressiva. Em postos de serviço, os poços de monitoramento não ficam operacionais por muito tempo além do estritamente necessário, para evitar riscos de contaminação por acidentes envolvendo as operações de abastecimento. Mas, no conjunto, podem fornecer valiosas informações sobre variação de nível d'água.

O Instituto de Geociências da USP opera redes locais de monitoramento de nível d'água na Cidade Universitária e no Parque Ecológico do Tietê. Estes pontos podem compor a rede regional de monitoramento de qualidade e quantidade, contando ainda com a disponibilidade de recursos humanos próprios para a coleta de amostras e medições de nível d'água.

5.3.8 Seleção de parâmetros e frequência de amostragem

Considerando as diferentes e dispersas fontes de poluição localizadas na Bacia do Alto Tiete e o regime de fluxo dos aquíferos desta bacia, propõe-se que todos os parâmetros descritos no item 5.2.7 sejam determinados, no mínimo a cada 6 (seis) meses, nos primeiros 3 (três) anos de operação da rede.

6 – Conclusões

A revisão bibliográfica apresentada nesta dissertação permitiu concluir que:

- o monitoramento das águas é uma das ferramentas de gestão integrada dos recursos hídricos e deve ser operado por bacias hidrográficas;
- há a necessidade de elaboração de um sistema de informação integrado que possa receber dados padronizados de qualidade e quantidade das águas subterrâneas, seguindo a tendência mundial de gestão integrada e participativa, evitando a perda de dados gerados por diferentes órgãos públicos e instituições privadas;
- inúmeras legislações internacionais prevêm a obrigatoriedade de monitoramento de águas subterrâneas e destinam recursos para a sua implantação e operação;
- a rede de monitoramento de qualidade de água subterrânea operada no estado de São Paulo pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) pode ser comparada às redes dos países da Comunidade Européia, necessitando, entretanto, de aumento do número de pontos de monitoramento, a serem distribuídos espacialmente segundo critérios estatísticos e de aperfeiçoamento do sistema de informação; e
- a interpretação dos resultados obtidos no monitoramento fornece novos dados para o aperfeiçoamento dos modelos hidrogeológicos conceituais.

Os resultados obtidos por esta pesquisa permitem concluir, também, que:

- os órgãos gestores da qualidade e da quantidade devem coordenar o programa de monitoramento, gerenciando um sistema compartilhado de informações, em conjunto com os órgãos de Saúde e de levantamento de informações hidrogeológicas. A

cooperação interinstitucional é imprescindível para a obtenção dos dados necessários para a gestão do recurso hídrico subterrâneo.

- os critérios de projeto, implantação e operação de rede de monitoramento integrada de águas subterrâneas devem considerar os objetivos do monitoramento, a priorização de corpos hídricos subterrâneos, a seleção e distribuição de pontos de amostragem, os parâmetros e respectivas freqüências de amostragem, os controles de qualidade, as interpretações estatísticas e o gerenciamento e disponibilização de informações.
- no dimensionamento de uma rede de monitoramento deve-se:
 - (a) utilizar pontos fixos de coleta de amostras e medições, que podem ser nascentes, poços tubulares ou poços de monitoramento; e
 - (b) distribuir os pontos de monitoramento segundo um sistema de quadriculas homogeneamente espaçadas em função da priorização dos corpos hídricos subterrâneos. Quanto maior a pressão antrópica, menor será a dimensão dessas áreas. São sugeridos três padrões de espaçamento: 5 x 5 km, 10 x 10 km e 20 x 20 km. Sugere-se ainda que, cada Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) tenha no mínimo 20 e no máximo 60 pontos de amostragem, podendo este número ser excedido em função do adensamento das fontes de poluição, bem como se taxas de exploração da água subterrânea suscitarem risco de rebaixamento irreversível de nível d'água.
- na operação da rede de monitoramento, os parâmetros de qualidade a serem monitorados e a freqüência de amostragem devem ser flexibilizados em função do histórico do uso e ocupação do solo na região de entorno do ponto de monitoramento e do grau de confinamento do aquífero.

- a aplicação, na UGRHI 6 - Bacia do Alto Tietê, dos critérios selecionados para projeto de rede, permitiu a priorização do corpo hídrico subterrâneo de arcabouço sedimentar, resultando na estimativa de 86 pontos de monitoramento, em função da intensidade das pressões antrópicas nesta bacia.

Para continuidade desta pesquisa, recomenda-se que cada um dos critérios apresentados seja tema de aperfeiçoamento por comitês especializados, como tem sido feito na Europa. A implantação efetiva de uma rede de monitoramento integrado de águas subterrâneas dependerá, ainda, de levantamentos e trabalhos de campo para seleção dos pontos de monitoramento de qualidade e de quantidade.

Outra ferramenta que deve ser desenvolvida para a priorização dos aquíferos e para a gestão da qualidade e quantidade é o enquadramento dos corpos hídricos subterrâneos em classes, segundo as características hidrogeológicas dos aquíferos e os seus respectivos usos preponderantes, conforme estabelece a Resolução CNRH n° 15, de 11.01.2001.

7 – Referencias Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2002) *Águas Subterrâneas*. Célio Augusto Pedrosa e Francisco A. Caetano ed. Superintendência de Informações Hidrológicas. Brasília, ANA.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2004) *Informações hidrológicas*. disponível em <http://www.ana.gov.br> acessado em 23.09.2004
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2005) *Projeto Aquífero Guarani*. disponível em <http://www.ana.gov.br/guarani/projeto> acessado em 23.01.2005
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2001) *Standard Guide for the Selection of Purging and Sampling Devices for Ground-Water Monitoring Wells - ASTM D-6634*. West Conshohocken, PA, 14 pp.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; AMERICAN ENVIRONMENT FEDERATION. (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. APHA, AWWA, WEF.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) *Projeto poço para captação de água subterrânea: Procedimentos - NBR 12212*. Rio de Janeiro, ABNT. 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1992) *Construção de poço para captação de água subterrânea - NBR 12244*. Rio de Janeiro, ABNT. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS Técnicas (1993) *Glossário de poluição das águas - NBR 9896*. Rio de Janeiro, ABNT. 94p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997) *Construção de poços de monitoramento e amostragem - NBR 13.895*. Rio de Janeiro, ABNT. 21p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMMISSION (1998) *Normalização e atividades relacionadas: vocabulário geral – NBR ISO/IEC Guia nº 2*. Rio de Janeiro, ABNT. 21p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHINICAL COMMISSION (2001) *Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração – NBR ISO/IEC 17025*. Rio de Janeiro, ABNT. 20p.
- BARROS, G. (2001) *Reavaliação geoestatística dos recursos/reservas de fosfato da mina de Cajati-SP*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências/USP.

- BELITZ, K; DUBROVSKY, N; JOHSON, T; MILBYDAWSON, B.J. (2004) California Groundwater Quality Monitoring: Framework for a Comprehensive, Statewide Program. In: 2004 DENVER ANNUAL MEETING. Vol. 36, nº 5. Abstracts with programms. Denver: Geological Society of America. Disponível em <http://gsa.confex.com/gsa/2004am/finalprogram/abstract.80756.htm>
- BENDER, S.; EINSIEDL, F. (2004) Selective Method for a Ground Water Spring Monitoring Network in Bavaria (Germany). Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft.
- BERTACHINI, A.C. (1987) *Estudo das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiaí, SP.* São Paulo, 115 p. Dissertação (Mestrado) - IGc - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- BOLTON, D.W. (1996) *The Maryland statewide groundwater quality network - Network description and initial water-quality data from a statewide ground-water-quality network in Maryland. Report of Investigations nº 60.* 167 p. Maryland Geological Survey. disponível em <http://www.mgs.md.gov/hydro/qwindex.html> acessado em 11/9/2004.
- BRASIL. (2004b) MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Portaria no. 518, de 26 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.* Brasília: Ministério da Saúde.
- CALIFORNIA STATE (2003) *Report to the Governor and Legislature: A comprehensive groundwater quality monitoring program for California.* Sacramento, EUA: State Water Resource Control Board. 100p.
- CETESB (1977) *Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. Estudo Preliminar.* Secretária de Obras e Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo: CETESB. 81 p.
- CETESB (s.d.) *Proposta para monitoramento da qualidade das águas subterrâneas – Bacia Sedimentar de Taubaté.* Secretaria de obras e do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo: CETESB. 30 p. + mapas.
- CETESB. (1986) *Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas em áreas de infiltração de efluentes de indústrias químicas.* Relatório Técnico. São Paulo: CETESB. 81 p.
- CETESB. (1999) *Manual de gerenciamento de áreas contaminadas.* Relatório Técnico. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. São Paulo: CETESB. 385p.
- CETESB. (2001) *Estabelecimento de valores orientadores para solo e águas subterrâneas no estado de São Paulo.* Relatório Técnico. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo: CETESB. 100 p. + apêndices.
- CETESB. (2004) *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo – 2001 - 2003.* Relatório Técnico. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo: CETESB. 100 p. + anexos

- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ. (2004) *A Bacia do Alto Tietê*. Documentos. disponível em www.comiteat.sp.gov.br acessado em 13.07. 2004
- COZZOLINO, V.M.N. (1989). *Os solos da cidade de São Paulo*. Companhia do Metropolitano de São Paulo. São Paulo: METRÔ. 15p.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 1. Grande São Paulo*. V. 1 (resumo). Secretaria de Obras e do Meio Ambiente. São Paulo: São Paulo: Encibra S. A. 220 p.
- DANTAS, A.S.L. (1990) *Geologia da Faixa São Roque e Intrusivas Associadas na Região entre São Paulo e Mairiporã, Norte de São Paulo, SP*. São Paulo Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- DERIZIO, J.C. (1992) *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. 1ª ed. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado. 201 p.
- DINIZ, H.N. (1996). *Estudo do potencial hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Baquirivu-Guaçu, municípios de Guarulhos e Arujá, SP*. São Paulo, 286p. + anexo Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S.A. (2002) *Sumario dos dados da Região Metropolitana de São Paulo*. Edição 2003 São Paulo: EMPLASA.
- ENVIRONMENTAL AND HERITAGE SERVICE (2000) *A Groundwater monitoring strategy for Northern Ireland*. . Belfast: Environmental and Heritage Service Department of the Environment.
- ESPINDOLA, R. S. (2001) *Impactos dos sistemas de saneamento "in situ" nas águas subterrâneas, município de Itaquaquecetuba (SP)*. São Paulo. 126 p. + anexos. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ESTADO DE SÃO PAULO (1992). Resolução Estadual SS no. 45 , de 31 de janeiro de 1992. Institui o Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano – PROÁGUA e aprova diretrizes para a sua implantação no âmbito da Secretaria da Saúde. Diário Oficial do Estado, São Paulo, 1 fev. 1992. Seção 1.
- ESTADO DE SÃO PAULO (1996). Resolução Estadual SS 293, de 25 de outubro de 1996. Estabelece os procedimentos do Programa de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano no Estado de São Paulo e dá providências correlatas. Diário Oficial do Estado, São Paulo, 26 out. 1996. Seção 1.
- ESTADO DE SÃO PAULO (2003). Resolução Conjunta SÉS-SMA-SERHS no. 01, de 14 de outubro de 2003. Institui grupo de trabalho intersecretarial para o aprimoramento, compatibilização e integração dos procedimentos técnicos e administrativos para o controle da exploração e uso das águas subterrâneas no estado, relativos a sistemas alternativos de abastecimento. São Paulo: Diário Oficial do Estado, Executivo. 15 out. 2003.

- EUROPEAN COMMUNITIES (2003) *Guidance document nº 7 – Monitoring under the Water Framework Directive*. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Working Group 2.7 - Monitoring Luxembourg: 2003. ISBN 92-894-5127-0 ISSN 1725-1087. 160p.
- FEITOSA, A.C E MANOEL FILHO, J. (2000) *Hidrologia – conceitos e aplicações*. 2ª edição. Fortaleza: CPRM/REFP, LABHID-UFPE. 391 p. il.
- FETTER, C.W. JR. (1993) *Contaminant Hydrogeology*. New York: Macmillan Publishing Co.,. 458p.
- FETTER, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4ª edição. ISBN 0-13-088239-9. New Jersey: Prentice-Hall. 588 p.
- FISCHER, R.S E GOODMAN, P. T. (2002) *Characterizing groundwater quality in Kentucky: from site selection to published information*. In: NATIONAL MONITORING CONFERENCE. Proceedings. Madison, Wisconsin, EUA: National Water quality Monitoring Council.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. A. (1988) *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima: CEPIS/PAHO/WHO. 78 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. (2002) *Groundwater Quality Protection – a guide for water utilities, municipal authorities and environmental agencies*. Groundwater Management Advisory Team. WHO-PAHO-CEPIS and UNESCO-ROSTLAC-PHI. Washington, D.C. USA: World Bank. 103p. ISBN 0-8213-4951-1
- GEMS (2003) *Annual Report 2003*. United Nations Environment Programme. Global Environment Monitoring System, Water Programme.. Richard D.Robarts (Diretor). Canadá: UNEP GEMS, 2003. ISSN 1810-6757. 20 p.
- GEMS (2004) *Operational Guide version 3.1*. Global Environment Monitoring System, Water Programme. disponível em www.gemswater.org. acessado em 04.11.2004
- GRATH, J. coord. (2001) *The EU Water Framework Directive: Statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation of monitoring results (WFD-GW)*. Grant Agreement Ref. Subv 99/130794. 1.12.2001 European Commission and the Austrian Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management Viena: 63p. disponível em: <http://www.wfdgw.net> acessado em 10.08.2004.
- GREY SAUBLE CONSERVATION AUTHORITY. *Groundwater Monitoring Network*. disponível em <http://www.greysauble.on.ca/water-groundwater.html> acessado em 03.09.2004.
- HIRATA, R; FERREIRA, L. M. (2001) *Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição*. Revista Brasileira de Geociências. v. 31. 31(1):43-50, março de 2001. Sociedade Brasileira de Geologia.
- IG; CETESB; DAEE. (1997) *Mapeamento da Vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. Instituto Geológico. Comoanha de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Departamento de Águas e Energia Elétrica. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente. 2v. v1 144p. v2 mapas (Série Documentos).

- IDAHO STATE. (2001) *Statewide Groundwater Quality Monitoring*. disponível em: http://www.idwr.state.id.us/hydrologic/info/statewide/statewide_march_2001.htm. Department of Water. Acessado em 19.09.04.
- ILLINOIS STATE. (2002) *Groundwater Quality Protection Program*. disponível em: <http://www.epa.state.il.us/water/groundwater/ambient-monitoring.html>, acessado em 11/9/2004. Environmental Protection Agency.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2000) *Censo Demográfico 2000*. disponível em www.ibge.gov.br/censo acessado em 15.09.2004.
- IOWA STATE (2004) *About groundwater monitoring*. Department of Natural Resources (DNR), disponível em <http://wqm.igsb.uiowa.edu/activities/groundwater/AboutGWmonitoring.htm> acessado em 11.09.2004
- KITANIDIS, P.K. (1997) *Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology*. Stanford University: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- KOREIMANN C.; GRATH, J; WINKER, G. NAGY W.; VOGEL W.R. (1996) *Groundwater Monitoring in Europe. Topic Report n° 10/96*. Copenhagen: European Environmental Agency. disponível em: http://reports.eea.eu.int/92-9167-023-5/en/tab_abstract_RLR . acessado em 10.08.2004.
- KENTUCKY GEOLOGICAL SURVEY (2001) *Kentucky Interagency groundwater monitoring network – annual report 1999-2000*. Kentucky Geological Survey. University of Kentucky: Lexington..
- LACK, T.; GARDNER, M.; CULLINGFORD, R. (2003) *Eurowaternet: towards an index of quality of national data in Waterbase*. Technical Report n° 99. Copenhagen: European Environmental Agency. 21p.
- LANDIM P.M.B. (1979) *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Rio Claro: Departamento de Geologia Geral e Aplicada. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP - CAMPUS DE RIO CLARO.
- MACEDO, A.B. (coord.) (1998) *Projeto Banco de Dados Espaciais da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê*. FEHIDRO/LIG-IGc-USP, 18 mapas em formato digital. Mapas Hidrogeológico e de Vulnerabilidade: Prof. Dr. Ricardo Hirata; Mapa geológico: Cláudio Riccomini.
- MARCUELLO, C E MENÉNDEZ M. (2003) *Eurowaternet Quantity – technical guidelines for implementation*. Technical Report n° 99. Copenhagen: European Environmental Agency. 31p.
- MENEGASSE, L.N. *Estudo hidrogeológico das rochas metassedimentares do Grupo São Roque a NW da Grande São Paulo – critérios para locação de poços profundos*. (1991) São Paulo. 104p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade São Paulo.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2004) *Recursos Hídricos: conjunto de normas legais*. 3ªed. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos. 243p.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2004). *PNMA II – Relatório de atividades de 2004*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 70 p.
- MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. (1998) *A Groudwater monitoring network and partnership for Ontario. Monitoring concepts, suggested priority basins, and a desing example*. Toronto, Canada: Ministry of the Environment of Ontario in cooperation with S.N. Singer and The Waterloo Centre for Groundwater Research. 83 p. + il.
- MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. (2001) *A Groudwater monitoring network and partnership for Ontario. Suggested groundwater monitoring networks for ten basins in Southern Ontario*. Environmental Monitoring and Reporting Branch. Toronto, Canada: Ministry of the Environment of Ontario. 155 p. + il.
- MORAN, J.; HUDSON, G.; LEIF, R. (2004) *California groundwater quality monitoring: use of age-dating and low-level VOC's to assess aquifer vulnerability*. In: 2004 DENVER ANNUAL MEETING. Session 73: Comprehensive monitoring approaches at regional and statewide level. Resumos. Denver: Geological Society of America. Acessado em 20.09.04 <http://gsa.confex.com/gsa/2004AM/finalprogram/abstract-75674.htm>
- NATURAL RESOURCES CANADA. *Groundwater Program*. Earth Sciences Sector. disponível em: http://gwp.nrcan.gc.ca/links_e.php acessado em 23.12.2004
- NEBRASKA STATE. (2003) *The 2003 Nebraska Groundwater Quality Monitoring Report*. Nebraska Department of Environmental Quality. Water Quality Assessment Section. Groundwater Unit. Lincon. USA. December,2003. 34p.
- NEW JERSEY STATE (2004) *Groundwater monitoring network*. Department of Environmental Protetion. acessado em 11.09.2004 <http://www.nj.gov.dep/wmm/bfbm/groundater.htm>.
- NIXON, S.C. (1996) *European Freshwater Monitoring Network Desing*. Europian Topic Centre on Inland Water. Copenhagen: European Environmental Agency. 131p. disponível em http://reporsts.eea.eu.int/92-9167-023-5/en/topic_report_no_10.pdf. Acessado em 05.09.2004.
- NIXON,S.; GRATH, J.; BOGESTRAND, J. (1998) *Eurowaternet. The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources. Technical Guidelines for Implementation. Technical Report n° 7*. Copenhagen (Dinamarca): European Environment Agency
- OHIO STATE (1998) *Ohio Groundwater Quality. 305(b) Report. Division of Drinking and Ground Waters*. Ohio: Environmental Protection Agency. 17 P.
- OHIO STATE (2003) *Ohio Groundwater Quality. 305(b) Report 2002*. Division of Drinking and Ground Waters. Ohio: Environmental Protection Agency.104 p.
- OHIO STATE (2004) *Ohio's Ambient Ground Water Monitoring Network*. Division of Drinking and Ground Waters Ground Water Quality Characterization Program. 2004. Ohio: Environmental Protection Agency. disponível em: <http://www.epa.state.oh.us/ddagw/pdu/ambient.html>. acessado em 12.09.04.
- ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. (2001) *Manejo Integrado y Sostenible de los Recursos Hidricos Subterraneos en America Latina*. Proyecto Regional del OIEA - RLA/8/031. In: TALLER SOBRE GESTIÓN DE LOS RECURSOS

- HÍDRICOS. MONTEVIDEO, URUGUAY, de 10 a 13 de dezembro de 2001. Resumos. OIEA.
- OLIVEIRA, I.B.; NEGRÃO, F.I.; ROCHA, T.S. (2004) Determinação do índice de qualidade da água subterrânea – IQAS, com base nos dados de poços tubulares do estado da Bahia: Áreas piloto: Recôncavo e Platô de Irece. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., Cuiabá. 2004. Livro de resumos. Cuiabá, ABAS, p 190-1
- PARISOT, E. H. (1983) *As águas subterrâneas no centro-oeste do município de São Paulo: características hidrogeológicas e químicas*. São Paulo Dissertação (mestrado) - Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo.
- PATTON, T. W. (2004) *Monitoring Montana: groundwater assessment's statewide water-level monitoring network*. In: 2004 DENVER ANNUAL MEETING. Session 73: Comprehensive monitoring approaches at regional and statewide level – advantages and limitations. Denver: Novembro de 2004. Geological Society of America. disponível em http://gsa.confex.com/gsa/2004AM/finalprogram/abstract_79024.htm
- POCOLA, P.; VALENTIM L. S. O. (2004) *Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano no Estado de São Paulo*. Boletim Epidemiológico Paulista Informe Mensal sobre Agravos à Saúde Pública ISSN 1806-4272. São Paulo: Centro de Vigilância Sanitária da Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo. http://www.cve.saude.sp.gov.br/agencia/bepa9_agua.htm (30.10.2004).
- PULS, R.W.; BARCELONA, M.J. (1996) *Ground-Water Issue Paper: Low-Flow (Minimal Draw-down) Ground-Water Sampling Procedures*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/540/S-95/504, 12 p.
- RICCOMINI, C. (1989) *O Rift Continental do Sudeste do Brasil*. São Paulo. 256 p. Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M. (1992) *Geologia da Bacia Sedimentar*. In: MESA REDONDA: SOLOS DA CIDADE DE SÃO PAULO Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - Núcleo Regional de São Paulo - ABMS Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos Especializados – ABEF.
- SABESP/CEPAS/IGc-USP. (1994) *Diagnóstico hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo. Relatório final*. São Paulo: Convenio entre a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas e Instituto de Geociências da USP.. 115p.
- SANDERS, T. G.; WARD, R. C.; LOFTIS, J. C.; STEELE; T. D.; ADRIAN, D.; YEVJEVICH V. (1983) *Design of Networks for Monitoring Water Quality*. Water Resources Publications, LLC 336 p. ISBN # 0-918334-51-9.
- SCHROETER, A.; BORKOVICH, J.; BABCOCK, L.; SHERRILL, R. YAMAMOTO, G.; BELITZ, K; MORAN, J. (2004) *California groundwater quality monitoring: a united vision among agencies*. In: 2004 DENVER ANNUAL MEETING. Novembro de 2004. Denver: Geological Society of America.. disponível em http://gsa.confex.com/gsa/2004AM/finalprogram/abstract_81097.htm

- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.W; CHAVES, A. C. M; PEREIRA, I.C. (2001) *Introdução ao Geenciamento de Recursos Hídricos*. M.A.V. de Freitas – Coordenador. Brasília: Agência Nacional de energia Elétrica; Agência Nacional de Águas. 328 p. : il.
- SILVA, V.R. (2000) *Ocupação Territorial e Qualidade da Água Subterrânea em Maciço Fraturado na Região de Itaquera, São Paulo – SP*. São Paulo. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SIMONETI, M.F. (1999) *Projeto de Redes para Monitoramento da Qualidade da Água - Um Estudo de Caso: Bacia Hidrográfica do Rio Jundiaí*. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Universidade de São Paulo.
- SOUTH CAROLINE STATE. (2001) *Ambient Ground-Water Quality Monitoring Network 2001 Report*. Department of Health and Environmental Control disponível em <http://www.scdhec.net/water/html/ambient.html>
- SOUTH DAKOTA STATE. (2004) *Statewide groundwater quality monitoring network*. Geological Survey Disponível em www.sdgs.usd.edu/projects/stategroundwaterqualnetworkproj.html. acessado em 11.09.2004.
- TENNESSEE STATE. (1998) *Groundwater Monitoring Off-Site Residential Well Sampling Work Plan*. Department of Environment and Conservation. Region IV EPA.
- TEXAS STATE. (2003) *Texas Groundwater Protection Strategy*. Austin, Texas: Groundwater Protection Committee – TGPC. 112p. Disponível em www.tgpc.state.tx.us.
- TEXAS STATE. (2004) *Groundwater Quality Sampling*. Texas Water Development Board. disponível em <http://www.twdb.state.tx.us>. acessado em 09.10.2004.
- THEODOROVICZ, A., YAMATO, A.A.; TAKAHASHI A.T.; VASCONCELOS, C.S.; SANTARÉM P.C.; SILVA V.A. (1990) *Projeto Santa Isabel/Mogi das Cruzes/Mauá*. Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais - Pró-Minério. São Paulo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- TOSO JR., E. (2001) *Avaliação da contaminação e do risco associado em área de indústria e suas adjacências, em Cotia – SP*. São Paulo. 130 p Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- TUINHOF, A.; FOSTER S; KEMPER K; GARDUNO H; NANNI M. (2004) *Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Groundwater Monitoring: Requirements for managing aquifer response and quality threats*. GWMate. Briefing Note Series Briefing Note 9. World Bank. Global Water Partnership Associate Program. 10p.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2000) *Design of a Shallow Ground-Water Network to Monitor Agricultural Chemicals, Lake Wales Ridge, Central Florida*. Choquette A.F. e Sepúlveda A. A. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4134 Florida: Department Of Agriculture And Consumer Services Tallahassee. 40p.
- Uil. H.; Geer. F.C; Geherels J.C. Kloosterman. (1999) *State of art on monitoring and assessment of groundwaters*. UN/ECE Task Force on Monitoring and Assesemt. Working Programme 1996/1999. Volume 4. Lelystad, The Netherlands: Institute of Applird Geoscience. 84 p. ISBN 9036952778.

- UNEP/WHO. (1996) *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. Genebra: Organização Mundial da Saúde.
- USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *National Water Quality Inventory - 1998 Report to Congress*. EPA 816-R-00-013. Agosto de 2000. Office of Ground Water and Drinking Water. 99p. Disponível em http://www.epa.gov/safewater/protect/98_305b_all.pdf. acessado em 03.08.2004.
- VALLE, M. A. (1997) *Diagnóstico da relação indústria e meio ambiente no município de Santo André/SP, com ênfase nos recursos hídricos*. São Paulo, 109p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- VIEIRA, S.R.S.S. (1996) *Estudo de Processos Metamórfico-metassomáticos nos Complexos Embu e Pilar no Bloco Juquitiba, SP*. São Paulo Tese (Doutoramento) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- WEST VIRGINIA STATE. (2004). *West Virginia's Water Quality Monitoring Strategy Watershed Branch*. Department of Environmental Protection. Division of Water and Waste Management.
- WISCONSIN STATE.. *Components of a Groundwater Monitoring. Strategy for the State of Wisconsin. Draft Version of 13/08/2004*. Department of Natural Resources Disponível em <http://dnr.wi.gov/org/water/dwg/gcc/draftmonitor.pdf> acessado em 12.09.2004.
- YAMAMOTO, J.K. (2003) *Apostila do curso de estatística aplicada*. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 80 p.
- YASSUDA, C. T.; HORI, K.; ROCHA, H. C. (1992) *Água do subsolo*. In: MESA REDONDA: SOLOS DA CIDADE DE SÃO PAULO. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - Núcleo Regional de São Paulo – ABMS. Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos Especializados – ABEF.