

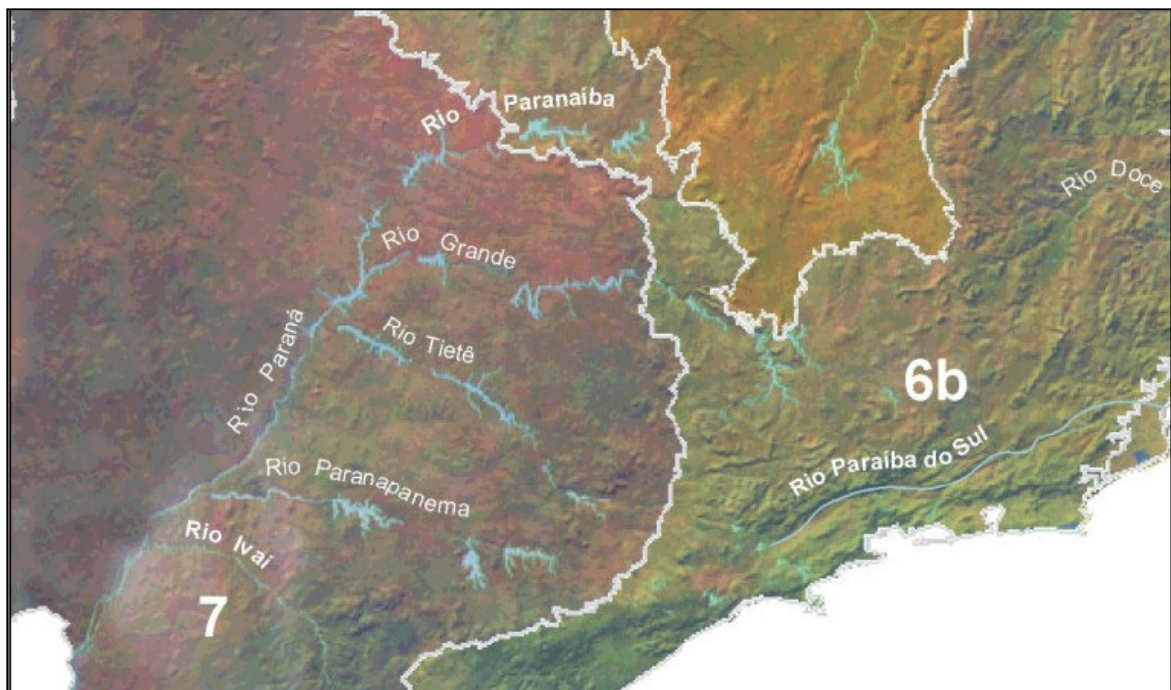
2 Províncias Hidrogeológicas do Brasil

O Brasil possui dez províncias hidrogeológicas, sendo cada uma composta de diferentes sistemas aquíferos, com variadas características e importância (ANA, 2004). A Figura 5 destaca que o Estado de São Paulo está inserido nas Províncias denominadas Bacia do Paraná (7) e Escudo Oriental do Sudeste (6b).

A Região Hidrográfica do Paraná, com 32% da população nacional, apresenta o maior desenvolvimento econômico do País. Com uma área de 879.860 Km², a região abrange os estados de São Paulo (25% da região), Paraná (21%), Mato Grosso do Sul (20%), Minas Gerais (18%), Goiás (14%), Santa Catarina (1,5%) e Distrito Federal (0,5%).

Originalmente, a Região Hidrográfica do Paraná apresentava os biomas de Mata Atlântica e Cerrado e cinco tipos de cobertura vegetal: Cerrado, Mata Atlântica, Mata de Araucária, Floresta Estacional Decídua e Floresta Estacional Semidecídua. O uso do solo na região passou por grandes transformações ao longo dos ciclos econômicos do país, o que ocasionou um grande desmatamento.

A Região Hidrográfica Escudo Oriental do Sudeste é conhecida nacionalmente pelo elevado contingente populacional e pela importância econômica de sua indústria. O grande desenvolvimento da região, entretanto, é motivo de problemas em relação à disponibilidade de água. Isso ocorre porque, ao mesmo tempo em que apresenta uma das maiores demandas hídricas do País, a bacia também possui uma das menores disponibilidades relativas.



Fonte: CPRM, 1988 *apud* ANA, 2004.

Figura 5 - Províncias Hidrogeológicas do Estado de São Paulo. 7 - Bacia do Paraná e 6b - Escudo Oriental do Sudeste.

Em relação ao uso e à ocupação do solo, um dos principais problemas se refere à ocupação irregular de encostas, áreas ribeirinhas e de mananciais, estimulada em grande parte pela especulação imobiliária. Devido ao intenso e desordenado processo de uso e ocupação, podem ser encontrados ao longo dos rios apenas pequenos trechos com vegetação ciliar e geralmente em estado inadequado de conservação (ANA, 2004).

3 A Hidrogeologia do Estado de São Paulo

Em 2006, o Departamento de Águas e Energia Elétrica, o Instituto Geológico, o Instituto de Pesquisas Técnicas e o Serviço Geológico do Brasil publicaram o Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE et al, 2005) que sintetiza o conhecimento sobre as condições de ocorrência e potencialidades das águas subterrâneas no Estado de São Paulo.

A Figura 6 apresenta uma seção geológica esquemática de caráter interpretativo e generalizado do Estado de São Paulo, onde se observa a sobreposição das camadas geológicas.

Essa sobreposição não é totalmente confinante das camadas inferiores, de forma que mesmo as formações mais antigas afloram, ou seja, estão expostas, na superfície do terreno em áreas específicas do Estado, onde ocorre a recarga direta dos aquíferos. A Figura 7 apresenta um mapa com a distribuição espacial dos afloramentos das rochas das unidades geológicas maiores no Estado de São Paulo, que constituem as principais formações aquíferas.

PERFIL HIDROGEOLÓGICO

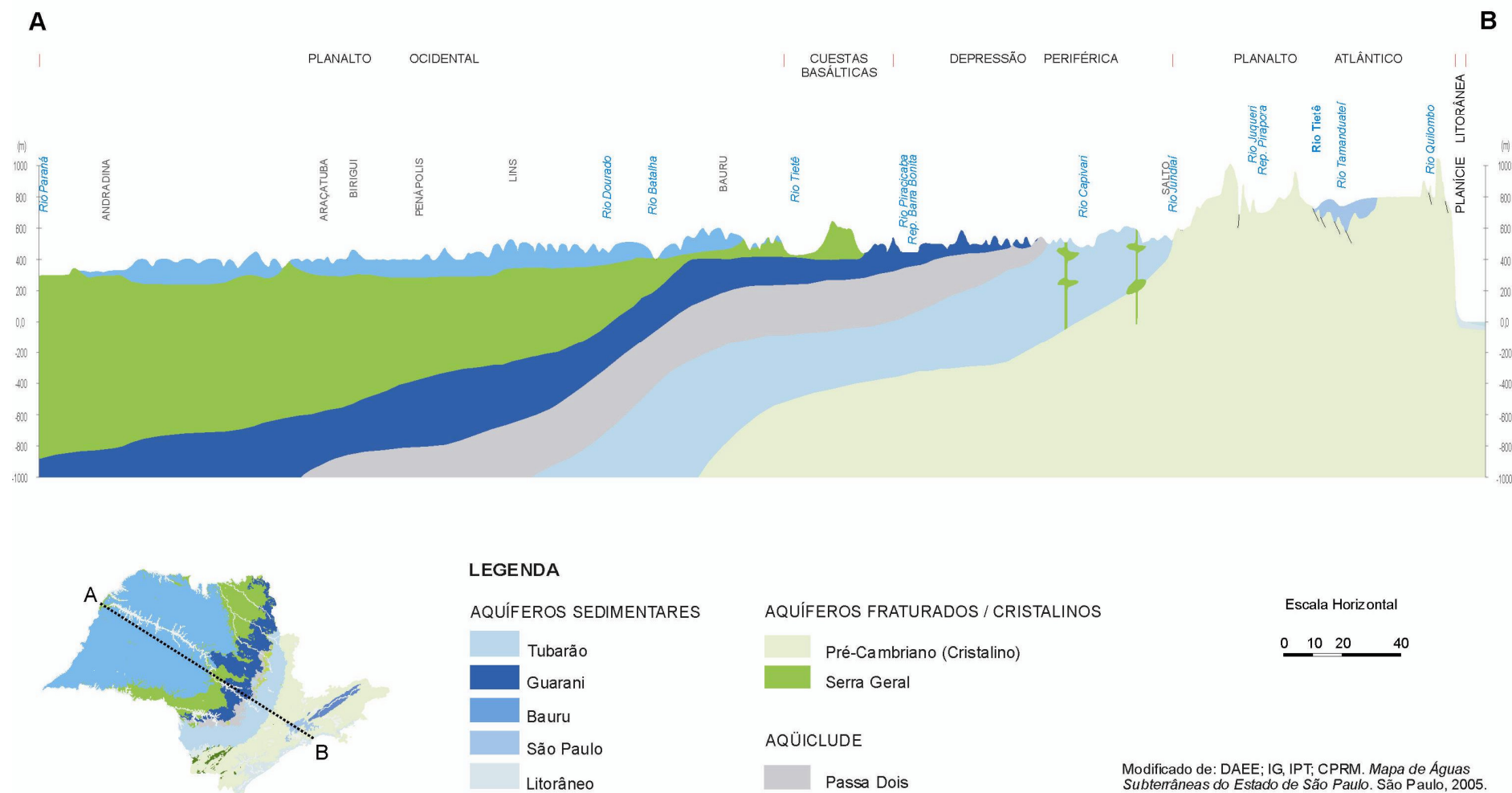


Figura 6 - Seção geológica esquemática do Estado de São Paulo. Fonte: modificado de DAEE et al.(2005)

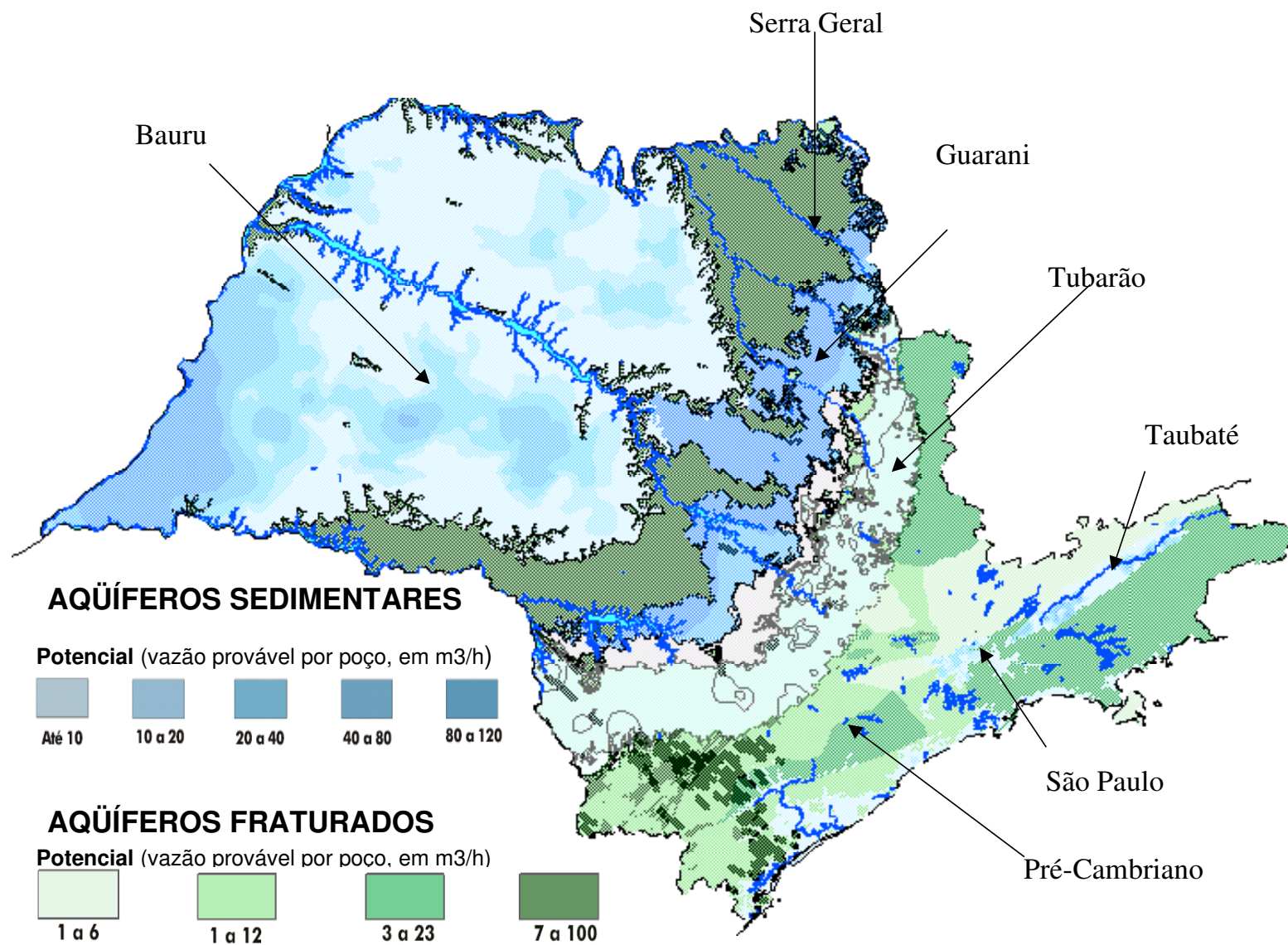


Figura 7 - Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Fonte DAEE et al.(2005)

3.1 Aquíferos do Estado que compõem a Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná

Serão descritos os aquíferos que ocorrem na Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná em ordem de afloramento do oeste para o leste do Estado de São Paulo.

Aquífero Bauru

O Aquífero Bauru é formado por sedimentos depositados durante o Cretáceo Superior e apresentam uma ocorrência extensiva e contínua em todo o Planalto Ocidental do Estado de São Paulo, ocupando aproximadamente 42% da área do Estado, e daí sua grande importância como manancial.

A sedimentação ocorreu em duas fases principais, a primeira em condições essencialmente desérticas em dunas eólicas e a segunda, em clima semi-árido, com maior presença de água nos sistemas fluviais e leques aluviais com pantanal interior bem definido (Fernandes, 1998, *apud* DAEE et al., 2005).

A espessura média saturada é de 75 m, mas observam-se espessuras máximas que chegam a 300 m no planalto Residual de Marília. Na região de São José do Rio Preto e Presidente Prudente ocorrem espessuras saturadas entre 150 e 200 m (DAEE et al., 2005).

No Grupo Bauru, a porosidade efetiva varia de acordo com a composição das camadas, de 15% nas camadas arenosas a 5% nos arenitos calcíferos e siltosos. A condutividade hidráulica do aquífero também varia significativamente em função da heterogeneidade litológica do aquífero, apresentando valores entre 0,002 a 3,66 m/dia que, multiplicados pela espessura do aquífero, fornecem valores da transmissividade da ordem de 0,14 a 328 m²/dia, ocorrendo predominância de valores inferiores a 50 m²/dia. No Pontal do Paranapanema, extremo oeste do Estado, a transmissividade atinge valores superiores a 200 m²/dia (DAEE et al., 2005). A Figura 8 apresenta a variação espacial da vazão explotável do aquífero Bauru.

Sendo um aquífero freático, a recarga é feita diretamente pela precipitação pluvial, sendo sua base de drenagem os rios Paranapanema, Tietê, Grande e Paraná, e suas malhas de afluentes em toda a área de afloramento. O aquífero funciona, em geral, como reservatório regulador do escoamento dessa rede fluvial. Entretanto, ocorrem também características típicas de condições de confinamento, fato explicado pela existência de camadas arenosas limitadas por camadas silto-argilosas compactas, formando bancos de grande extensão.

As rochas sedimentares que compõem o aquífero Bauru acham-se dispostas sobre os basaltos da Formação Serra Geral.

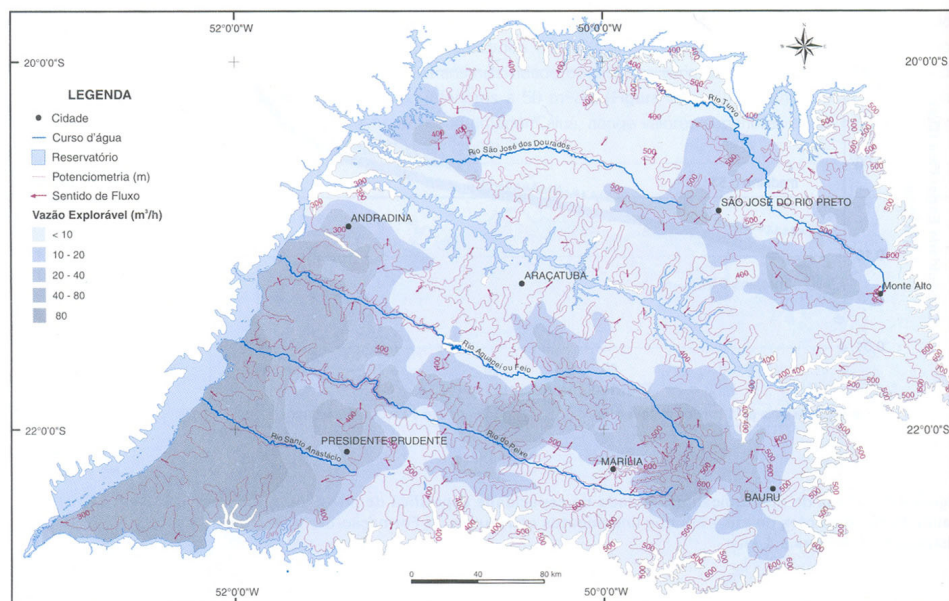


Figura 8 – Variação espacial das vazões exploráveis do aquífero Bauru
Fonte DAEE et al.(2005)

Aquífero Serra Geral

Os derrames basálticos da Formação Serra Geral e as intrusões diabásicas do mesmo evento da Formação Serra Geral (138 a 127 milhões de anos), não constituem, por si, camadas aquíferas. O armazenamento de água ocorre somente ao longo de linhas estruturais (falhas e fraturas), nos horizontes vesiculares, nos interderrames e nos arenitos intertrapeanos.

Os basaltos afloram numa extensão de cerca de 20.000 Km², estendendo-se por toda a região Oeste e Central do Estado, subjacentes aos sedimentos do Grupo Bauru. Sua espessura varia desde poucos metros, aumentando para Oeste, até 2.000 metros. A recarga para esse aquífero se dá através da precipitação pluvial sobre os solos basálticos, que vão atingir as zonas de alteração e fissuradas da rocha matriz. Municípios como Ourinhos, São Carlos, Sertãozinho, Ribeirão Preto, São Joaquim da Barra e Franca, possuem sua área urbana assentada sobre os basaltos da formação Serra Geral.

Os diques de diabásio afloram em manchas em meio aos aquíferos Tubarão e Guarani, principalmente nas regiões de Paulínia, Americana, Piracicaba, Leme, Santa Cruz das Palmeiras e Santa Cruz da Esperança.

Por se constituírem em aquíferos de fissuras, suas potencialidades relacionam-se à densidade de fraturamento, grau de alteração dos horizontes vesiculares, sistemas de alimentação e inter-relação com outros aquíferos, não podendo ser aferidas pelos parâmetros característicos dos aquíferos de interstícios, como porosidade e permeabilidade.

Apesar de ocorrer um grande intercâmbio de água com o aquífero Bauru sobrejacente e também com o aquífero Guarani sotoposto, as principais saídas de drenagem do aquífero basalto são os rios.

Aqüífero Guarani

O Aqüífero Guarani é o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo. Está localizado na região Centro-Leste da América do Sul, entre 12º e 35º de latitude Sul e entre 47º e 65º de longitude Oeste e, ocupa uma área de 1,2 milhão de Km², estendendo-se pelo Brasil (840.000 Km²), Paraguai (71.100 Km²), Uruguai (58.400 Km²) e Argentina (255.500 Km²), como pode ser visualizado na Figura 9.

Sua maior ocorrência se dá em território brasileiro (2/3 da área total), abrangendo os Estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.



Figura 9 - Localização do Aqüífero Guarani.
Fonte: Machado (2006)

Esse aquífero ocorre em 76% do território do Estado de São Paulo, sendo que sua área de afloramento é de 16.000 Km² inserida na Depressão Periférica. A largura dessa área de afloramento é irregular, chegando a 175 Km ao longo da drenagem do rio Jacaré-Pepira (DAEE et al., 2005).

A espessura do aquífero varia de aproximadamente 100 m na área aflorante até mais de 400 metros de espessura nas áreas centrais da Bacia, onde se encontram confinadas pelos espessos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

As duas formações (Botucatu e Pirambóia) que constituem o Aqüífero Guarani são semelhantes do ponto de vista litológico, divergindo quanto a sua gênese. A Formação Pirambóia, de origem flúvio-lacustre, é caracterizada por arenitos esbranquiçados amarelados, avermelhados e róseos, de granulação muito fina a média, muito a pouco argilosos; intercalando finas camadas de lamitos argilosos, exibindo as seguintes estratificações: plano-paralela e cruzadas planar e acanalada.

Já a Formação Botucatu, sobrejacente aos sedimentos subaquosos da Formação Pirambóia, é constituída por um pacote de arenitos avermelhados, de granulação muito fina a média, friáveis, quartzosos, com bom arredondamento e esfericidade, bem selecionados, percentagem de material siltico-argiloso geralmente inferior a 5% e

estratificações cruzadas de grande porte, caracterizando uma gênese de origem eólica em ambiente desértico.

A recarga do aquífero ocorre principalmente nas áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia, atravessada pelos rios Tietê, Piracicaba, Mogi-Guaçu, Pardo e Paranapanema, além de outros de menor vazão, como o rio do Peixe e o rio São José dos Dourados. Nas zonas de fissuras dos basaltos em alguns altos estruturais situados no interior da bacia do Paraná também se dá a recarga do Guarani. A água infiltrada para o aquífero apresenta um fluxo geral para Oeste e para os basaltos sobrejacentes, porém a maior parte do escoamento subterrâneo é drenada para os rios como escoamento básico, ainda na área de recarga.

A maior parte da água existente hoje nas porções confinadas do Aquífero Guarani é oriunda da infiltração da água meteórica ocorrida há centenas ou milhares de anos nas áreas de afloramento. Devido ao longo tempo de contato da água com as rochas e também por contribuições de pequena recarga advinda das camadas superiores de basalto, espera-se maior mineralização das águas à medida que se distancia das áreas de recarga. Esse fato só não é mais intenso devido aos arenitos que formam o aquífero não serem ricos em sais e minerais.

Pode haver também enriquecimento de elementos radioativos nas porções confinadas desse aquífero. No Estado de São Paulo têm sido realizadas medições rotineiras de radiatividade natural apenas em fontes de água mineral. Bonotto (2004) aponta a ocorrência de teores excessivos de elementos radioativos, como rádio e radônio, em diversos poços do Guarani. Para o pesquisador, esses elementos, quando ingeridos com a água em concentrações que ultrapassam as máximas permitidas, podem provocar câncer pulmonar e estomacal. O efeito hidrotermal, que é o aumento da temperatura em função das grandes profundidades onde a água se encontra, também ocorre e tem sido utilizado no oeste do Estado de São Paulo. Em alguns municípios, nos meses de inverno, a água é distribuída aquecida à população.

Aquífero Tubarão

A gênese do Aquífero Tubarão data do Carbonífero Superior, sendo que a deposição dos sedimentos ocorreu em ambiente glacial continental (fluvial e lacustre) com ingressões marinhas e também em ambiente marinho raso. É constituído por várias formações geológicas, sendo o Grupo Itararé a unidade aquífera principal (DAEE et al., 2005).

Sua litologia é bastante variada, com complexa associação de arenitos, siltitos, ritmitos, diamictitos, folhelhos e conglomerados. Os arenitos e algumas lentes de material clástico grosseiro são, geralmente, ricos em matriz argilosa. A variação litológica é irregular, o que torna seu comportamento como aquífero extremamente heterogêneo e de difícil definição dos parâmetros hidrogeológicos.

Devido à importância sócio-econômica das regiões de afloramento desses sedimentos, à grande extensão dessas regiões (aproximadamente 20.000 Km²) e às grandes espessuras que atingem (cerca de 800 metros), o Grupo Tubarão apresenta boas potencialidades aquíferas. Há influência positiva das fraturas sobre o potencial de produção do Aquífero Tubarão.

Entretanto, nas cidades de Tietê, Capivari, Rafard e Hortolândia já são observados significativos rebaixamentos do nível d'água, em função do elevado número de poços em bombeamento (DAEE et al., 2005).

3.2 Aqüíferos do Estado que compõem a Província do Escudo Oriental do Sudeste

Aqüífero Pré-Cambriano (Cristalino)

As rochas que compõem o embasamento pré-Cambriano (Cristalino) no Estado de São Paulo cobrem uma área de aproximadamente 57.000 km². Essas rochas ígneas e metamórficas, mais antigas do que 542 milhões de anos, são, em geral, granitos, gnaisses, filitos, xistos e quartzitos que, quando não alteradas, são impermeáveis e não constituem aqüífero. No entanto, os eventos tectônicos que afetaram esses maciços pré-Cambrianos e a ação climática na superfície formaram sistemas de falhas e fraturas e horizontes de alteração da rocha, propiciando condições de percolação de água subterrânea.

Desta forma, semelhante aos basaltos, o potencial hídrico destas rochas é limitado à ocorrência dessas zonas favoráveis, o que resulta em grande variação das condições de produção, com valores extremos de 0 a 50 m³/h, média de 7 m³/h e a vazão específica média de 0,3 m³/h/m, oscilando entre 0,06 e 0,7 m³/h/m. Considerando-se o aqüífero de forma global, verificaram-se valores de transmissividade que variam entre 0,4 e 14 m²/dia.

A recarga natural, em decorrência das chuvas, escoia através das camadas de rocha alterada e zonas fissuradas, sendo, dessa forma, armazenada. Geralmente, a baixa transmissividade nos horizontes aqüíferos e a ausência de fluxos de água em escala regional, mesmo em falhas e fissuras, condicionam a formação de unidades independentes em cada vale; aí existe um regime de escoamento próprio, sem relacionar-se a áreas relativamente distantes, constituindo o escoamento básico de rios e riachos que drenam esses vales.

Aqüífero Taubaté

Os sedimentos terciários da Bacia de Taubaté encontram-se preenchendo um *graben* formado entre a Serra da Mantiqueira e o reverso continental da Serra do Mar, com extensão de 168 km por 20 km de largura, numa área com cerca de 2.340 km². A região é um importante eixo econômico entre São Paulo e Rio de Janeiro, abrangendo cidades de médio a grande porte como São José dos Campos, Jacareí, Taubaté e Aparecida (DAEE et al., 2005).

O Grupo Taubaté é dividido nas Formações Tremembé, Resende e São Paulo. A camada inferior, denominada Formação Tremembé, constituída por sedimentos argilosos e arenosos em forma de lentes, tem, em vários pontos na região mais central da Bacia, ocorrências de folhelhos pirobetuminosos, intercalados com argilas verdes. Sua espessura máxima é de 250 metros.

A formação superior, denominada Resende, é bastante semelhante e correlacionável aos sedimentos da Bacia de São Paulo, sendo constituída por areias, siltes e argilas de origem flúvio-lacustre, que formam lentes de extensão variada, assentadas discordantemente sobre a Formação Tremembé, atingindo espessuras de até 140 metros.

A formação São Paulo, presente na porção sudoeste da Bacia, compreende arenitos, argilitos, siltitos, e arenitos conglomeráticos, originados de um sistema fluvial meandrante.

A existência de lentes de argila interdigitando pacotes de sedimentos arenosos propicia a existência de “aqüíferos suspensos”. Nesses casos, a investigação detalhada da extensão das plumas de contaminação é dispendiosa.

A produtividade do Aqüífero Taubaté é bastante variável, apresentando vazões menores que $10\text{m}^3/\text{h}$ na porção central da bacia sedimentar, na região de Tremembé-Pindamonhangaba e vazões superiores a $100\text{m}^3/\text{h}$ nas porções a sudoeste e nordeste dessa região onde predominam sedimentos mais arenosos.

A Figura 10 apresenta a localização do Aqüífero Taubaté e suas espessuras saturadas.

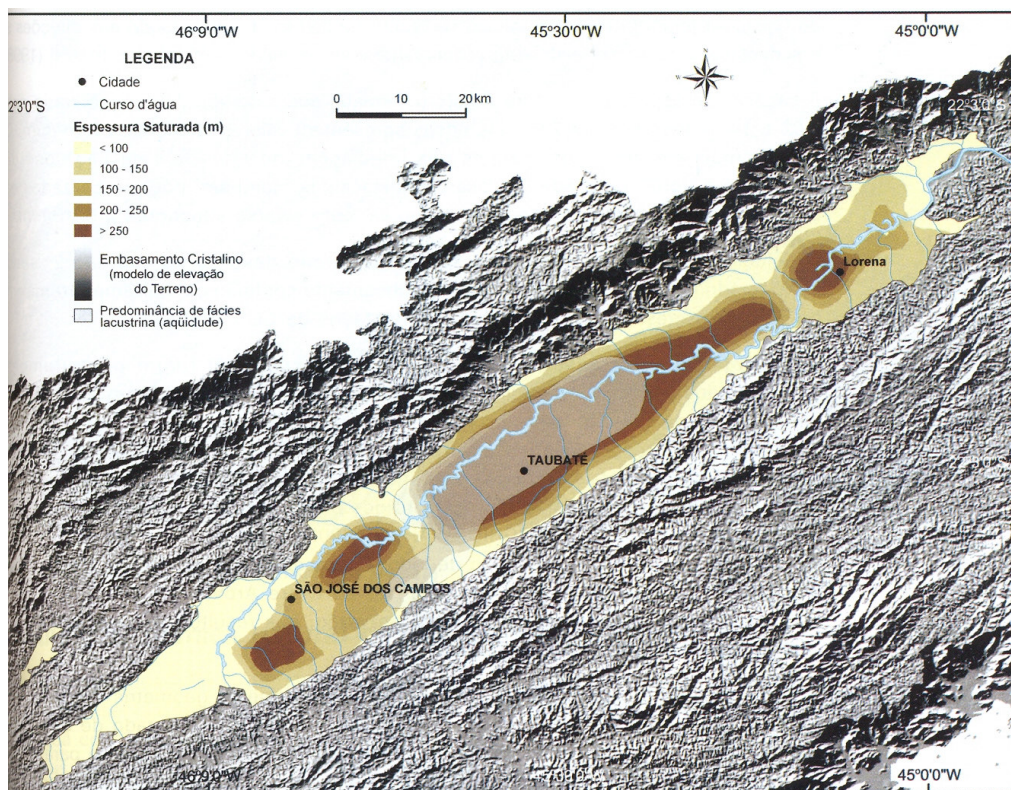


Figura 10 – Aqüíferos da Bacia de São Paulo
(fonte: DAEE et al., 2005)

A recarga desse aqüífero se efetua através da precipitação pluvial direta sobre a Bacia, e, de forma mais limitada, também pela drenagem, em sua direção, das águas do aqüífero pré-Cambriano adjacente. A descarga natural é o rio Paraíba, atuando o aqüífero como reservatório regulador de sua vazão de base.

Aqüíferos da Bacia do Alto Tietê

Na Bacia do Alto Tietê, que inclui a Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, existem basicamente dois aqüíferos: o Pré-Cambriano e o Sedimentar, esse último de idade Terciária. Entretanto, devem ser citadas também as coberturas aluviais mais recentes, de idade quaternária, que se desenvolveram ao longo dos principais rios que drenam a região (Tietê, Pinheiros e Tamanduateí), como pode ser observado na Figura 11.

Segundo Hirata e Ferreira (2001), no Aqüífero Pré-Cambriano é possível distinguir duas unidades. A primeira, relacionada às rochas intemperizadas, forma um aqüífero de porosidade granular bastante heterogêneo, de natureza livre, com espessuras médias de 50 m. Sob o manto de intemperismo e, muitas vezes conectado hidráulicamente, ocorre o aqüífero pré-Cambriano propriamente dito, onde as águas circulam por descontinuidade da rocha (fraturas e aberturas).

O Aqüífero Sedimentar, embora recobrindo apenas 25% da área da Bacia do Alto Tietê, é o mais intensamente explorado. Segundo DAEE (1975), a maior parte da área urbana da RMSP está assentada sobre os depósitos Terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo que compreendem as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, recobertas pela Formação Itaquaquetuba. Esse sistema aqüífero é livre a semiconfinado, de porosidade primária e bastante heterogêneo. As altitudes médias das colinas situam-se nas cotas 760 m, com máximo de 840 m no espigão da Av. Paulista e mínimo de 710 m na soleira de Barueri, no Rio Tietê.

A origem da Bacia de São Paulo está indiscutivelmente ligada a eventos tectônicos. A reativação de antigas zonas de falhamento provocou o abatimento do soalho e conseqüente represamento da sua drenagem, à montante de Barueri. Desta maneira, iniciou-se a deposição de material arenoso e argilo-siltoso que constituem os principais sedimentos desta Bacia. Enquanto durou o processo de barragem tectônica dos rios, os sedimentos avolumaram-se, devendo ter atingido perto de 300 m de espessura (AB'SABER, 1968 *apud* DAEE, 1975).

Cessada a sedimentação na Bacia de São Paulo, os rios Tietê e Pinheiros retomaram seu curso rumo Oeste-Noroeste. A nova situação topográfica que se apresentou permitiu a esses rios, entalharem os próprios sedimentos e condicionou o rio Tietê a vencer a soleira granítica de Barueri, penetrando na região de domínio das serranias de São Roque.

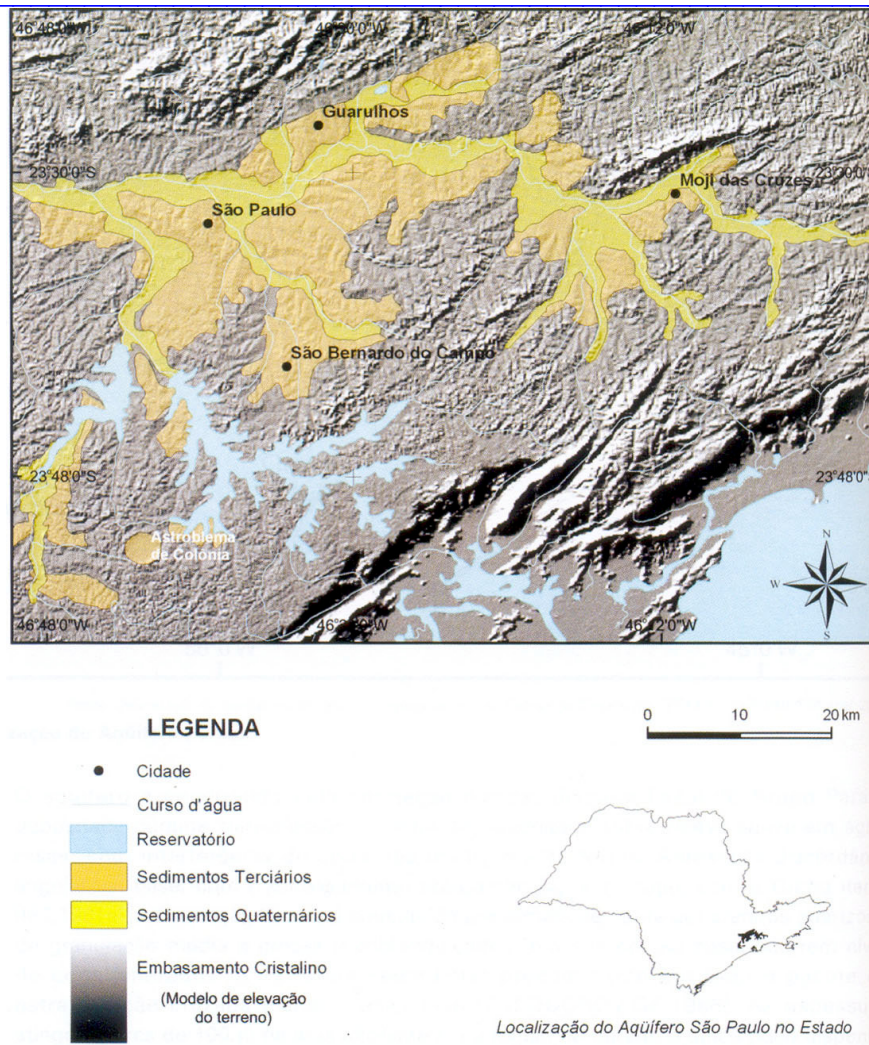


Figura 11 – Aquíferos da Bacia de São Paulo
(fonte: Perrota *et al.* 2005, *apud* DAEE *et al.*, 2005)

4 – Referências

ABNT. **NBR 9896**: glossário de poluição das águas. Rio de Janeiro, 1993. 94p.

ABNT. **NBR 13897**: construção de poços de monitoramento e amostragem - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997. 21 p.

ABNT. **NBR 12212**: poço tubular - projeto de poço tubular para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

ABNT. **NBR 12244**: Poço tubular - Construção de poço tubular para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 2006. 14p.

ANA (Brasil). **Informações hidrogeológicas**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/InfoHidrologicas/aguasSubterr/mapaProvHidr.htm>> Acesso em: 17 jan. 2004.

BONOTTO, D. M. **Radioatividade nas águas**: da Inglaterra ao Guarani. São Paulo: UNESP, 2004. v. 1, 251 p.

DAEE (São Paulo). **Estudos de águas subterrâneas**: região administrativa 1 - Grande São Paulo. São Paulo: DAEE: Encibra, 1975. 220 p. v. 1: Resumos.

DAEE (São Paulo). **Estudos de águas subterrâneas**: região administrativa 3 – São José dos Campos. São Paulo, 1977. v. 1: Resumos.

DAEE (São Paulo) et al. **Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo**: escala 1:1.000.000: nota explicativa. São Paulo: DAEE: IPT: IG: CPRM, 2005. 3 v.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. 2.ed. Fortaleza: CPRM: UFPE, 2000. 391p.

HIRATA, R. C. A; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 31, n.1, p. 43-50, mar. 2001.

MACHADO, José Luiz Flores. A redescoberta do Aquífero Guarani. **Scientific American Brasil**, n. 47, abr. 2006.

NATURAL RESOURCES CANADÁ. **Geoscape Nanaimo**: geoscience for central Vancouver Island communities - karst. Ontario, 2005. Disponível em: <http://geoscape.nrcan.gc.ca/nanaimo/karst_e.php>. Acesso em: 7 fev. 2007.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.