

## CAPÍTULO 8 – DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O estudo de temas relacionados à água traz inúmeras implicações que extrapolam a questão do comportamento dos aquíferos e remetem a problemas de ordem prática, ligados a políticas públicas e questões ambientais. Assim, ao estudar a hidrogeologia da área, é impossível não fazer referência a assuntos como as atuais limitações da gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Brasil.

Diante de um leque de importantes comentários gerados a partir de dados compilados e de outros levantados nesta pesquisa, optou-se por discutir, inicialmente, os diversos assuntos e, em seguida, apresentar as conclusões relativas aos objetivos do trabalho.

### 8.1 DISCUSSÃO

Com a análise dos dados apresentados neste trabalho, pode-se tecer as seguintes considerações:

#### 8.1.1 Em relação ao banco de dados de poços tubulares profundos

De acordo com a Legislação Brasileira, cada perfuração de poço deve ser precedida de uma Licença de Perfuração e sucedida por uma Outorga, que confere o direito de uso de uma determinada quantidade de água. Esta quantidade deve levar em conta a disponibilidade hídrica local, calculada a partir das reservas reguladoras e totais do aquífero e das quantidades exploradas pelos poços existentes. Com base no banco de dados “oficial”, ou seja, o SIDAS do DAEE, não é possível obter uma definição segura da situação de exploração em uma área (Figura 6.1). Essas deficiências, bem como sua sistematização em sistemas de informação e disponibilização de dados ao público, são assuntos que vêm sendo discutidos em várias instâncias na comunidade hidrogeológica, principalmente nos comitês de bacias. Um banco de dados atualizado é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite realizar diagnósticos para mitigação de problemas em áreas críticas e definir prioridades de ações em planos de bacias.

A iniciativa da CPRM de disponibilizar um banco de dados na Internet (o SIAGAS) é um grande avanço, atendendo antigos anseios da comunidade em relação ao acesso às informações sobre os recursos hídricos subterrâneos. Porém, as fontes dos dados do SIAGAS são os bancos de dados dos órgãos gestores de cada estado, estando, portanto, sujeito aos mesmos problemas de consistência dos dados originais.

Dentre os bancos de dados consultados, o mais completo é o da empresa de perfuração. Assim, parece haver algum problema na alimentação do banco de dados oficial, quando muitas informações se perdem ou não são exigidas de fato. No entanto, a única empresa de perfuração que forneceu seu cadastro não pode ser comparada com a maioria das empresas atuantes no mercado. Sabe-se da existência de muitas empresas clandestinas, sem condições mínimas de funcionamento, sem responsável técnico, sem cadastro de poços e que não se preocupam com a legalização. Recentemente, para tentar minimizar este problema, foi criado o “Selo de Credenciamento”, em parceria entre a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), o Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura (CREA) e o DAEE. Com este selo, as empresas são certificadas quanto às suas condições de atuar tecnicamente e dentro dos preceitos estabelecidos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Infelizmente, estima-se que menos de 2% das empresas de todo o Brasil tenham se credenciado e que de 80 a 90% das empresas perfuradoras do Estado de São Paulo ainda atuem na clandestinidade (ABAS INFORMA, 2003a, 2003b).

### **8.1.2 Em relação ao uso da água subterrânea**

Apesar dos problemas encontrados nos bancos de dados disponíveis, considera-se ainda possível delinear um cenário, mesmo que parcial, da evolução na exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiá e áreas adjacentes, da primeira metade do século XX ao início do século XXI.

A evolução do número de perfurações ao longo do tempo (Figura 6.2) reflete o forte desenvolvimento industrial durante um período conhecido como o “milagre econômico” da década de 70. A partir dos anos 90, o crescimento do número de poços deve estar associado aos problemas de escassez hídrica gerados pelo uso intenso e pela má qualidade das águas superficiais.

A existência de 11% de poços abandonados e de quase 10% sem uso (Figura 6.4) parece estar associada à vida útil dos poços, uma vez que muitos deles datam da primeira metade do século passado. Porém, há um número considerável de poços abandonados construídos em 1981, o que pode ser consequência da diminuição da produtividade do aquífero pelo aumento da exploração na década de 70.

Mais da metade dos poços (57%) destina-se aos usos industrial e doméstico, com predomínio do primeiro (Figura 6.6). Cabe aqui salientar que a fiscalização do uso da água nas indústrias é perfeitamente factível, tendo em vista as atuais exigências quanto ao Licenciamento Ambiental. É possível, por exemplo, verificar se a quantidade de água requerida no processo produtivo de uma determinada atividade industrial é condizente com o consumo registrado naquele estabelecimento pelo sistema de abastecimento público. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) tem alcançado bons resultados na fiscalização das indústrias no que diz respeito às atividades poluidoras, mas a fiscalização quanto à quantidade por parte do órgão gestor competente não tem sido efetivada.

A necessidade de um gerenciamento integrado entre as águas superficiais e subterrâneas é premente. Em uma bacia onde os índices de qualidade das águas superficiais têm variado de Ruim a Péssimo, a existência de problemas gerados pela exploração indiscriminada dos aquíferos é inaceitável. A melhoria da qualidade e o uso das águas superficiais devem ser priorizados, uma vez que, de acordo com a Lei Estadual 7663/91, as águas subterrâneas devem ser consideradas uma reserva estratégica.

### **8.1.3 Em relação à qualidade da água subterrânea**

Embora não tenham sido coletados dados relativos à qualidade da água subterrânea na bacia, os trabalhos consultados não relatam problemas (como excesso de sais, sulfetos, flúor, ou outros) na constituição química natural das águas do Sistema Aquífero Cristalino.

A poluição e a contaminação, no entanto, têm sido apontados como problemas comuns na região Sudeste, principalmente em poços rasos ou em poços que exploram o manto de intemperismo. Como a bacia passa por sérios problemas de qualidade da água superficial, é possível que o mesmo esteja ocorrendo em relação à água subterrânea. Isto leva à necessidade de se conduzir trabalhos especificamente direcionados ao tema.

#### **8.1.4 Em relação à variação da profundidade dos níveis d'água e da produtividade dos poços ao longo do tempo**

A falta de gerenciamento adequado torna-se mais preocupante quando se analisa a variação temporal dos níveis d'água e da produtividade dos poços ao longo do tempo.

Este trabalho mostra que tem ocorrido um aumento considerável da profundidade dos níveis dinâmicos necessários para se conseguir estabilização do nível d'água (item 6.5). Ou seja, com as mesmas grandezas de vazão, o nível dinâmico de estabilização é cada vez mais profundo, indicando uma disponibilidade em queda. Conseqüentemente, a produtividade dos poços, medida em valores de capacidade específica, tem também diminuído ao longo do tempo. A profundidade do nível estático, porém, não sofreu aumento tão acentuado quanto o nível dinâmico. Isto pode indicar que ainda existe uma certa capacidade de recuperação dos aquíferos. Mas é necessário frisar que o estudo foi feito para uma área de abrangência regional (aproximadamente 3500 km<sup>2</sup>). Se for considerada apenas a área urbana de alguns municípios, como Indaiatuba e Jundiaí, que têm grande concentração de poços, possivelmente o nível estático mostraria queda mais acentuada. Portanto, este é um cenário otimista, considerando-se a existência de muitos poços clandestinos e o grande número de poços que foram descartados da análise por não apresentarem um cadastro correto ou completo.

Outra possível causa do rebaixamento dos níveis d'água ao longo do tempo poderia estar ligada às variações da precipitação. Porém, a Figura 3.5 mostra que as décadas de 70 e 80, quando se registra o início do rebaixamento dos níveis d'água, foram mais chuvosas em relação às demais. Na década de 90 choveu menos, mas a queda nos índices pluviométricos não ocorreu na mesma proporção da queda dos níveis d'água registrada no mesmo período.

#### **8.1.5 Em relação às características gerais da bacia e sua influência na disponibilidade hídrica**

A distribuição das chuvas exerce influência na recarga dos aquíferos. A Figura 3.4 mostra índices pluviométricos mais baixos em Salto em comparação com o restante da área e o mapa dos tipos climáticos baseados na efetividade da precipitação (Figura 3.2) mostra que, de fato, esta região está sujeita a um clima menos úmido do que a região serrana, por exemplo.

Mas os sérios problemas de escassez hídrica que ocorrem no município de Salto são decorrentes, principalmente, da má qualidade das águas superficiais. A cidade se situa às margens dos rios Jundiá e Tietê, que são rios relativamente caudalosos. No entanto, ambos não apresentam condições de tratamento pelos métodos convencionais, tornando inviável seu uso para abastecimento público. Assim, o município está sujeito à falta d'água provocada por uma combinação de fatores: a má qualidade das águas superficiais, as baixas taxas de recarga, além da pequena potencialidade dos sistemas aquíferos. Em visita feita ao município durante os trabalhos de campo, constatou-se que a falta d'água tem sido um problema constante, atingindo principalmente a população menos favorecida. A situação de Itu não deve ser muito diferente.

A vegetação na bacia do rio Jundiá está concentrada em áreas serranas, especialmente nas zonas de maior restrição das áreas de proteção ambiental. Embora contravenções ainda ocorram, aos poucos a legislação ambiental tem sido capaz de manter tais áreas protegidas. Na APA de Jundiá, a zona de maior restrição coincide com áreas de recarga do Sistema Aquífero Cristalino. Isto reafirma a necessidade de preservação da vegetação ali existente, além da necessidade já conhecida em termos de conservação da Mata Atlântica. Vale salientar que as zonas de proteção hídrica deveriam levar em conta a parcela da água subterrânea, cuja importância tem sido constantemente menosprezada nas legislações e nos planos diretores municipais. Desta forma, o controle e fiscalização por parte das prefeituras poderiam se tornar fortes instrumentos para a gestão dos recursos hídricos.

Quanto ao uso do solo, cabe citar que o predomínio de áreas com pastagem e/ou campo antrópico favorecem a erosão, constituindo um risco potencial para o assoreamento dos cursos d'água e a conseqüente diminuição da disponibilidade hídrica superficial, já bastante comprometida na bacia.

### **8.1.6 Em relação aos fatores que controlam ou interferem na produtividade dos poços**

Como destacado por vários trabalhos que estudam o comportamento da água subterrânea em rochas cristalinas, existem muitos fatores que podem influenciar a produtividade dos poços neste contexto hidrogeológico.

Na plotagem das anomalias positivas de produtividade sobre o mapa de estruturas regionais, percebe-se uma tendência de correlação entre ambos, mas também existem poços com baixa produtividade nas mesmas situações. Por isso é necessária a

caracterização hidrogeológica da área, verificando outros fatores possivelmente intervenientes, bem como um estudo em escala de maior detalhe, para definir as características geológico-estruturais mesoscópicas. Alguns destes fatores foram analisados neste trabalho, cujos resultados são discutidos a seguir.

#### 8.1.6.1 Profundidade

Existem trabalhos que se dedicam à definição do melhor intervalo de profundidade ou da profundidade máxima que um poço deve atingir para obter boas produtividades em terrenos cristalinos (Davis e Turk, 1964; Banks, 1992). A grande maioria concorda que há tendência de diminuição da produtividade dos poços com o aumento da profundidade no aquífero devido ao fechamento das descontinuidades pelos efeitos da pressão litostática.

Na região de Atibaia, Cavalcante (1990) não encontra correlação direta entre a vazão e a profundidade dos poços. Mas considera-se aqui que a vazão não seria a grandeza mais adequada para avaliar a variação da produtividade, e sim a capacidade específica (Q/s), conforme discutido no item 5.4.1.

Para a bacia do rio Jundiaí, o gráfico que relaciona a capacidade específica com a profundidade dos poços mostra um baixo coeficiente de correlação (Figura 6.14a). Neste gráfico, chama atenção a existência de poços de profundidades idênticas em intervalos regulares (100, 200, 300 metros), mas com valores de capacidade específica bastante distintos. Isto conduz a um raciocínio lógico: a profundidade do poço é definida por questões contratuais e pela maior lucratividade da obra, que muitas vezes prevalecem sobre as possibilidades de se obter melhores produtividades com o aprofundamento do poço. Pode-se dizer também que, embora haja uma tendência de diminuição da produtividade com a profundidade, os valores de capacidade específica dos poços mais profundos não são necessariamente baixos. Aos 300 metros de profundidade, existem poços com 0,001 a 1,0 m<sup>3</sup>/h/m. No entanto, valores maiores do que 1,0 m<sup>3</sup>/h/m tendem a se concentrar em profundidades que vão, no máximo, até 150 metros.

Já a correlação entre a capacidade específica e o nível dinâmico dos poços é maior do que o dobro da correlação com a profundidade dos poços. Isto indica que quanto menos produtivo for o poço, mais profundo tenderá a ser o nível dinâmico.

### 8.1.6.2 Litotipos

A existência de rochas cristalinas mais produtivas do que outras também é investigada como um fator que pode propiciar ou dificultar a obtenção de boas quantidades de água subterrânea. Para Banks et al. (1996), esta influência existe, mas seus efeitos são menos perceptíveis do que a influência de uma rede de descontinuidades conectadas e abertas.

Morland (1997 apud Banks e Robins, 2002), em estudo conduzido na Noruega, constata que a produtividade dos gnaisses é maior do que a dos metassedimentos e estes são apenas um pouco mais produtivos do que os granitos (Figura 5.9). Na bacia do rio Jundiáí, a situação é distinta: a Figura 6.15 mostra que os xistos apresentam distribuição de valores de Q/s um pouco abaixo do que os demais litotipos. Os valores próximos à mediana são muito semelhantes, tanto para gnaisses quanto para granitos e xistos (aproximadamente iguais a  $0,08 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ). Os metassedimentos, no entanto, apresentam mediana de Q/s e distribuição de valores consideravelmente maiores ( $Q/s \sim 0,2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ). Estas rochas, pertencentes ao Grupo São Roque, têm importante contribuição carbonática, mostrando que os processos de dissolução podem ser os responsáveis por destacar a produtividade de alguns litotipos.

### 8.1.6.3 Manto de intemperismo e coberturas sedimentares

Alguns estudos (Chilton e Smith-Carington, 1984; Banks e Robins, 2002; dentre outros) afirmam que a produtividade dos poços em longo prazo depende da presença de uma cobertura ou manto de alteração com boa capacidade de armazenamento. Isto porque a produtividade da rocha fraturada será mantida se, além de descontinuidades abertas, houver uma recarga constante. O modelo conceitual ilustrado na Figura 5.4 (Chilton e Foster, 1995) mostra que há maior condutividade hidráulica na base do manto de alteração ou do regolito.

O fluxo na base das coberturas e na base do manto de alteração é favorecido pelo contraste do contato litológico entre as diferentes camadas e entre elas e a rocha cristalina inalterada. Nestas interfaces tende a ocorrer um fluxo horizontal e, se existirem condições estruturais favoráveis, como uma rede de fraturas subverticais, interconectadas e relativamente abertas, poderá ocorrer recarga do aquífero fraturado e a boa produtividade dos poços será mantida.

Trabalhos antigos já faziam referência quanto à boa permeabilidade das coberturas colúviais que recobrem grandes áreas do Sudeste do Brasil (Ab'Saber, 1966; Galhego e Espíndola, 1980). As linhas de pedras constituídas por fragmentos de quartzo e outros de granulação grossa, que marcam a base das coberturas, certamente atuam como uma interface de alta porosidade e permeabilidade elevada.

Na área de estudos, poços com cobertura colúvial, de depósitos paleozóicos e sem nenhum tipo de cobertura apresentam distribuição de valores de produtividade muito semelhantes e as medianas são muito próximas; mas se a cobertura for do tipo aluvial, a distribuição de valores é maior e a mediana fica um pouco acima dos demais (Figura 6.16). O gráfico da Figura 6.17 corrobora com o anterior, mostrando a baixa correlação entre a espessura de cobertura sedimentar e a produtividade dos poços que exploram o Cristalino.

Considera-se que a existência de poços produtivos onde há cobertura aluvial, além da boa permeabilidade do material, está ligada ao fato de que estes depósitos muitas vezes se associam a zonas de abertura, como será discutido adiante. Compostos, em grande parte, por material permeável como cascalho e areia, tais coberturas podem formar importantes zonas de recarga ou de descarga, dependendo da posição topográfica em que se encontram.

A espessura do manto de alteração também mostrou baixa correlação com a produtividade dos poços (Figura 6.18). Porém, o gráfico da Figura 6.19 mostra que os poços que exploram apenas o manto de alteração são mais produtivos do que os que exploram apenas a rocha fraturada ou que exploram ambos. Os poços que exploram apenas a rocha fraturada são normalmente revestidos até o topo da rocha e os que exploram apenas o manto de intemperismo geralmente têm filtro na base do manto. Isto indica que os últimos são mais produtivos por estarem explorando a água do fluxo horizontal conforme comentado acima.

Já os poços que exploram tanto o manto de intemperismo quanto a rocha e deveriam também ter boa produtividade, mas supõe-se que eles estejam localizados em situações onde outros fatores são desfavoráveis. Não encontrando água no manto, a tendência é avançar a perfuração na rocha cristalina.

A baixa correlação entre a produtividade dos poços e a espessura das coberturas (exceto no caso das coberturas alúviais) e/ou do manto de alteração indica que, embora o papel destas camadas seja importante na recarga do aquífero, não há associação direta entre as variáveis. Além de boas possibilidades de recarga, é necessário que a água encontre condições de percolação na rocha e, conforme o esquema apresentado na Figura 8.1.

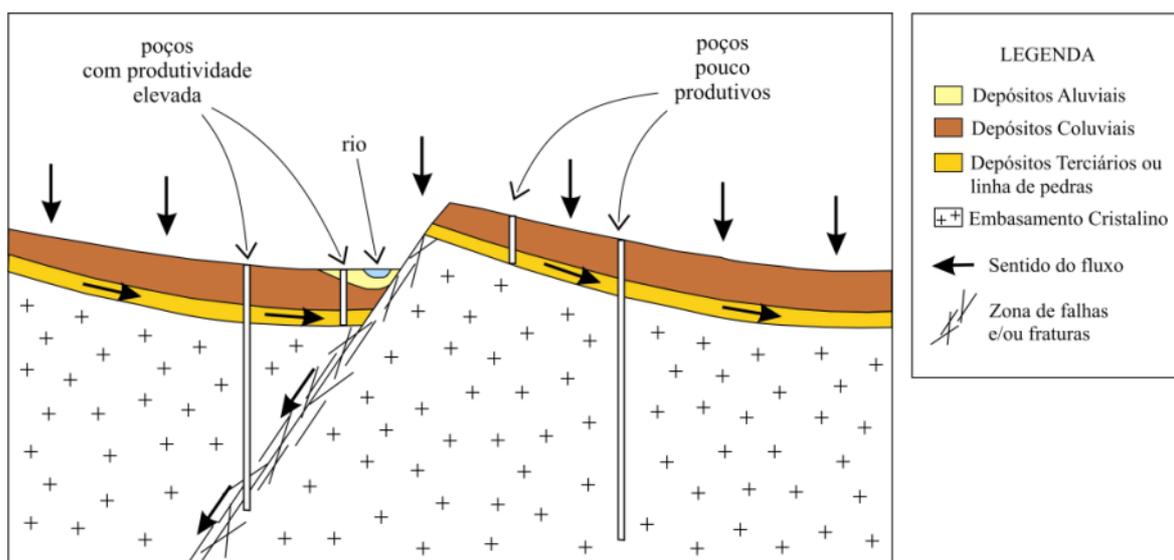


Figura 8.1: Esquema do fluxo da água subterrânea na interface entre as coberturas e a rocha sã e ao longo de descontinuidades abertas e interconectadas formadas em uma zona de falhas ou juntas (s/ escalas).

#### 8.1.6.4 Compartimentação morfoestrutural

A bacia do rio Jundiá é dividida em diferentes compartimentos morfoestruturais (Figura 4.27). Conforme as descrições de Singhal e Gupta (1999), pode-se relacionar cada compartimento a um *landform* específico, com características definidas em relação à presença de água subterrânea. Assim, a compartimentação morfoestrutural constitui uma ferramenta importante para o estudo do potencial hidrogeológico em escala regional.

Os compartimentos Japi, Cristais e Itu podem ser relacionados a *landforms* do tipo relevo estrutural e, de fato, parecem apresentar baixo potencial para a água subterrânea (Figura 7.6). O compartimento Jardim é análogo a um *landform* do tipo relevo estrutural com pedimentos e o compartimento Central se assemelha aos pedimentos enterrados, sendo que ambos apresentam maiores possibilidades de se obter bons resultados na perfuração de poços.

As zonas de cisalhamento e falhas regionais que controlam os limites entre os compartimentos constituem faixas ao longo das quais há anomalias de produtividade elevada. As direções NW-SE, NE-SW e, de forma mais restrita, também a E-W, têm presença constante nestas faixas e tendem a concentrar descontinuidades abertas como consequência da evolução tectônica da área (item 4.5).

Outra variável que pode ser associada aos compartimentos morfoestruturais é a densidade da rede de drenagem (Figura 4.3). A baixa densidade da rede de drenagem

indica maior infiltração e a alta densidade indica maior escoamento. Na área de estudos, as zonas com maior densidade de drenagem geralmente estão em *landforms* ou compartimentos desfavoráveis em relação ao potencial hídrico subterrâneo. Ao contrário, a densidade menor aparece nas porções onde o mapa potenciométrico indica como áreas de descarga (Figura 6.13). Assim, é possível que estas áreas também constituam áreas de recarga devido à maior permeabilidade do material. Vários autores relatam que em aquíferos fraturados a área de recarga tende a ser distribuída por toda a superfície, especialmente onde há espesso manto de intemperismo. A densidade de lineamentos varia de forma semelhante à da rede de drenagem.

#### 8.1.6.5 Estruturas geológicas

Na abordagem feita em escala regional foi possível verificar que as anomalias positivas de capacidade específica dos poços que exploram todos os sistemas aquíferos tendem a ocorrer nas proximidades das estruturas de caráter regional representadas pelas zonas de cisalhamento e zonas de falhas que compartimentam a área (figuras 7.5, 7.9 e 7.12). Um exemplo concreto que reafirma a importância destas estruturas na percolação da água subterrânea, inclusive em profundidades relativamente grandes, é a presença de fontes termais ao longo da zona de cisalhamento Valinhos registradas por Hasui et al. (1989). O controle que este conjunto de feições herdado do Pré-Cambriano e reativado ao longo do tempo geológico exerce sobre os limites da bacia e sobre o mapa potenciométrico mostra a importância do estudo da história geológica regional.

Banks et al. (1992) destacam que as zonas de fraturas do tipo *crush zones*, onde as rochas são altamente cominuídas e os planos individuais não são distinguíveis, tendem a formar grandes anomalias topográficas e geofísicas. Tais feições são tipicamente encontradas ao longo das estruturas regionais presentes na área.

Porém, alguns autores chamam atenção para o fato de que nem sempre as estruturas regionais são as mais produtivas (itens 5.5.5 e 5.5.6), trazendo mais uma vez a necessidade de uma caracterização estrutural em escala mesoscópica. Um problema encontrado neste tipo de caracterização é que nem sempre é possível descrever um afloramento nos locais onde há poços; mesmo porque nada garante que aquela estrutura é a que está sendo explorada, tampouco se aquelas características observadas em superfície estão presentes em subsuperfície. Contudo, alguns parâmetros puderam ser analisados por meio de correlações estatísticas, cujos resultados são discutidos a seguir.

Singhal e Gupta (1999) relatam que a foliação das rochas tem profunda influência na produtividade dos poços. Obviamente, as características da foliação dependem do tipo rochoso. Se a foliação favorecesse a produtividade de água subterrânea, os xistos deveriam ser mais produtivos do que granitos e gnaisses, já que neles a foliação é mais conspícua. Mas, conforme destacam Banks et al. (1996), a influência do tipo rochoso pode ser suplantada por outros fatores. De fato, o gráfico que correlaciona os litotipos e a capacidade específica (Figura 6.15) não mostra grandes diferenças entre xistos, gnaisses e granitos, bastante distintos em termos de foliação. Porém, a foliação milonítica subvertical pode ter influência indireta sobre a percolação nas zonas de cisalhamento, principalmente se forem reativadas por deformação rúptil posterior à sua formação.

A influência do tipo de preenchimento das discontinuidades também é citada na literatura (Banks et al., 1992; Nilsen, 1988), mas no presente trabalho não foi possível verificá-la. Para tanto, seria necessário obter dados mais precisos na descrição dos perfis geológicos dos poços.

As baixas correlações da produtividade com a porcentagem de cobertura sedimentar e com a espessura do manto de alteração presentes na seção geológica dos poços reafirmam a importância do fraturamento na percolação da água subterrânea em terrenos cristalinos. No Sistema Aquífero Tubarão, a influência das discontinuidades também se revelou importante, fato constatado pela presença de fluxo aquoso ao longo de juntas do Grupo Itararé, bem como na associação entre poços com produtividade Alta e estruturas de direção NW-SE e E-W na região de Indaiatuba (item 4.2.1.5).

Embora o fraturamento seja um fator fundamental para a produtividade dos poços em terrenos cristalinos, é necessário que as características das fraturas sejam favoráveis ao fluxo aquoso, o que se manifesta principalmente por sua abertura (Figura 5.6). É difícil avaliar a abertura das discontinuidades em afloramento, uma vez que o alívio de tensões altera a situação existente em subsuperfície.

Para Lachassagne et al. (2001), a zona de fraturas sub-horizontais originalmente abertas, geradas pela descompressão da rocha, tende a formar caminhos preferenciais para a água subterrânea na interface entre a base do manto de alteração e a rocha sã, tal como discutido anteriormente. De acordo com este modelo, as discontinuidades mais profundas são de origem tectônica. A obtenção de poços produtivos ou com baixa produtividade na rocha sã, depende de sua localização em relação às discontinuidades de origem tectônica com tendência de abertura. A maior parte dos poços presentes na área de estudos tem profundidade em torno de 150 metros, podendo chegar a 370 metros. Assim, considera-se

que a maioria deles não exploram fraturas abertas por alívio de tensões, mas fraturas abertas por esforços tectônicos distensivos e por efeitos de fragmentação da rocha.

A formação de descontinuidades abertas e/ou a abertura de descontinuidades antigas ocorrem de acordo com a orientação do maior esforço tectônico horizontal. Como a abertura tem sido considerada o fator mais importante para a obtenção de boas produtividades, os efeitos da tectônica distensiva e os efeitos transtrativos da tectônica transcorrente são de grande importância para o fluxo subterrâneo na rocha fraturada.

#### 8.1.6.6 Tectônica

A hidrogeologia de rochas cristalinas é um tema relativamente recente no Brasil, particularmente no que se refere à aplicação dos conhecimentos da Tectônica e, mais especificamente, da Neotectônica na previsão da produtividade dos poços tubulares profundos.

Banks et al. (1996) analisam vários trabalhos sobre o tema e reconhecem que há influência da tensão *in situ* sobre a produtividade dos poços em terrenos cristalinos; mas destacam que ela pode ser mascarada por fatores como a anisotropia do maciço, a alteração da rocha e a mineralização secundária. Para eles, a obtenção de poços produtivos depende principalmente da abertura e da conexão entre as descontinuidades.

No presente estudo, foi possível reconhecer a existência de estruturas reativadas e de outras neoformadas nas últimas etapas da evolução tectônica da área, que podem exercer importante papel na ocorrência de zonas favoráveis à acumulação e percolação de água subterrânea. Há vários indícios de estruturas abertas em locais sujeitos a esforços transtrativos e de outras mais antigas, formadas em eventos anteriores.

A atuação de movimentos distensivos e/ou transtrativos na história geológica rúptil da área é atestada pela abundância de falhas normais, que predominam em relação às demais, perfazendo 54% das falhas medidas no Embasamento Cristalino. Do restante, 41% são falhas transcorrentes e menos de 5% são inversas. O quadro evolutivo da área aponta para esforços compressivos direcionados a NW-SE, que ativam os sistemas E-W de alto ângulo como zonas de cisalhamento transcorrente dextral. Este é o quadro apresentado por Hasui (1990) para o regime neotectônico da região Sudeste e confirmado por Neves (1999) para a região de Jundiá.

No entanto, o fato de uma estrutura ser favorável à percolação da água, não indica que ela esteja relacionada à atuação do tensor neotectônico. Estruturas mais antigas

também podem permanecer abertas ao longo do tempo geológico, especialmente em ambiente intraplaca, onde os esforços tectônicos são menos intensos do que em bordas de placas.

### 8.1.7 Em relação aos métodos de estudo

Muitos dos trabalhos que estudam a hidrogeologia de rochas cristalinas o fazem em escala de detalhe, utilizando modelagem matemática e métodos geofísicos. Estes trabalhos são normalmente conduzidos nos países mais ricos, onde o interesse gira em torno de áreas propícias à disposição de resíduos perigosos, como o lixo radioativo, ou visando estudos de contaminação dos aquíferos.

A pesquisa para encontrar boa produtividade de água subterrânea em terrenos cristalinos é mais comum em países com problemas de abastecimento da população mais pobre e em regiões com características climáticas desfavoráveis. Quando se dispõe de recursos financeiros menores, há tendência de se utilizar métodos menos dispendiosos, como sensoriamento remoto, SIG, análise estrutural ou simples correlações estatísticas.

Um procedimento muito comum utilizado para avaliar a produtividade dos poços em terrenos cristalinos é o de correlacionar estatisticamente a produtividade dos poços com sua distância aos lineamentos, com o comprimento dos lineamentos, com a densidade de lineamentos ou com o número de intersecção de lineamentos. A limitação deste procedimento está na subjetividade intrínseca ao traçado de lineamentos, tema discutido no item 5.6.2. Geralmente, ao utilizar este método, os trabalhos não consideram as características da feição estrutural que se manifesta como lineamento, como sua tipologia, o ângulo de mergulho ou mesmo suas características genéticas. Além disso, a não associação com outros dados acaba por descartar a influência dos vários fatores que podem alterar a produtividade dos poços.

Na área de estudos, a simples sobreposição de mapas já é capaz de mostrar a dissociação entre as anomalias positivas de produtividade e a densidade dos vários tipos de lineamentos (figuras 7.3, 7.4, 7.8 e 7.11). Isto acontece porque as coberturas sedimentares e o espesso manto de alteração podem mascarar as estruturas do embasamento subjacente e, conseqüentemente, as diferentes densidades de lineamentos que se observa nas imagens de sensores remotos não refletem necessariamente o grau de fraturamento do substrato rochoso. Aliás, um dos motivos pelos quais esta área é interessante do ponto de vista morfotectônico, é o destacado contraste entre áreas com coberturas e pedimentos ao lado

de rochas expostas em um relevo acidentado, onde as primeiras logicamente tenderiam a apresentar maiores produtividades e também menor densidade de lineamentos.

A variedade de fatores intervenientes no armazenamento e no fluxo da água em rochas cristalinas tem levado alguns autores à utilização de SIG para definir a potencialidade dos aquíferos fraturados. Lachassagne et al. (2001) apresentam um método para seleção de zonas prospectivas em grandes áreas, onde são considerados os diversos fatores que potencialmente exercem influência sobre a produtividade dos poços. Eles destacam que o estudo em escala regional é necessário para caracterizar as propriedades dos aquíferos e é tão importante quanto o estudo em escala de detalhe, para uma locação mais precisa dos poços. Após uma criteriosa seleção de áreas, métodos mais dispendiosos podem ser aplicados com maior segurança.

A aplicação de análise estrutural na exploração de água subterrânea, embora constitua um método de baixíssimo custo, não tem sido muito utilizada. Tanto é que, no item 5.6, onde se apresenta um panorama dos métodos comumente empregados em estudos hidrogeológicos de terrenos cristalinos, há apenas um parágrafo dedicado ao assunto, já que não foram encontrados muitos trabalhos nesta linha.

Associada ao estudo da evolução geológica, a análise do fraturamento pode indicar direções estruturais ou regiões mais favoráveis à obtenção de poços produtivos. Nestes locais, tendem a se concentrar descontinuidades abertas pela maior componente horizontal do tensor tectônico ou neotectônico. No entanto, fraturas abertas também se formam por alívio de tensão e outras, originalmente fechadas, também estão sujeitas à abertura após a remoção da carga litostática pela erosão das rochas sobrejacentes. Estes fenômenos podem mascarar os resultados da correlação dos poços produtivos com estruturas abertas por ação tectônica. Mas as estruturas sujeitas à abertura por alívio de tensão são relativamente rasas e os poços mais profundos tendem a explorar fraturas de origem tectônica, conforme o modelo de Lachassagne et al. (2001). Assim, considera-se o método apropriado, desde que não sejam descartados os demais fatores que podem interferir na produtividade dos poços e desde que os casos sejam analisados também em escala de detalhe.

## 8.2 CONCLUSÕES

Dentre os fatores que potencialmente interferem na produtividade dos poços em terrenos cristalinos, foi possível identificar alguns diretamente e outros indiretamente ligados à existência de poços produtivos na área de estudos.

A influência do litotipo só existe se houver contribuição carbonática na constituição litológica, como ocorre em metassedimentos do Grupo São Roque. Dentre os demais litotipos do Embasamento Cristalino, não foi possível identificar grandes variações nos valores de produtividade.

O manto de intemperismo e a presença de coberturas sedimentares são importantes para manter a recarga do aquífero presente na rocha fraturada. No entanto, a espessura destas camadas na seção geológica dos poços não exerce influência direta sobre a produtividade dos mesmos.

A compartimentação morfoestrutural da área exerce influência por apresentarem ou não pedimentos e/ou coberturas sedimentares que aumentam as possibilidades de recarga. Na bacia do rio Jundiáí, os compartimentos mais propícios à obtenção de boas produtividades são o Compartimento Central e o Compartimento Jardim. Os limites entre os diversos compartimentos também constituem zonas propícias à percolação pois ali se concentram estruturas favoráveis ao fluxo subterrâneo. Estas são as estruturas que compõem as zonas de cisalhamento e zonas de falhas de abrangência regional.

Quanto às estruturas mesoscópicas, a foliação milonítica exerce influência indireta, na medida em que favorece reativações pela deformação dútil posterior. Mas as estruturas fundamentais, diretamente ligadas à obtenção de poços produtivos, são as falhas e juntas, sendo necessário que elas sejam originalmente abertas ou que tenham sido submetidas a esforços distensivos durante reativações tectônicas.

Os eventos tectônicos mais importantes na área e que propiciam a formação de estruturas e de regiões sujeitas à abertura constituem o evento distensivo da separação continental no final do Mesozóico e o evento transcorrente relacionado à atuação da Neotectônica. De acordo com a análise do fraturamento e a definição do quadro evolutivo, as estruturas geológicas mais importantes, no que se refere a zonas de fraturas potencialmente abertas, têm direção:

- NE-SW: que correspondem a zonas de fraturas associadas à tectônica distensiva que atuou do final do Mesozóico ao Terciário Inferior;
- NW-SE: compostas por falhas normais e juntas abertas no regime neotectônico;
- E-W: que se tornam importantes quando associadas às estruturas NW-SE, onde caracterizam zonas transtrativas.