

Conclusões e Considerações Finais

O trabalho de modelagem numérica desenvolvido nesta Tese alcançou o objetivo proposto, que foi o de fornecer uma primeira avaliação da dinâmica do fluxo subterrâneo e das reservas da micro-bacia de Barro Branco, incluindo estimativas de recarga subterrânea. A simulação de cenários de bombeamento permitiu a análise da sustentabilidade de vazões de exploração de água subterrânea, através de balanços de massa.

Um dos maiores problemas envolvendo a modelagem de fluxo em bacias compostas por aquíferos fraturados é a obtenção de parâmetros hidráulicos que representem adequadamente o meio. Além do alto custo envolvido na realização de ensaios hidráulicos e investigações geofísicas, existe uma grande incerteza na obtenção dos parâmetros e na sua espacialização, em função da grande heterogeneidade dos sistemas fraturados. Os parâmetros deste tipo aquífero dependem essencialmente da sua composição litológica, da natureza das tensões envolvidas na geração dos diversos sistemas de fraturas presentes (ambiente tectônico gerador das estruturas) e da profundidade de sua ocorrência. Maciços fraturados semelhantes quanto a estas características possuirão comportamento semelhante no que se refere aos seus parâmetros hidráulicos, independentemente do local de sua ocorrência.

Uma contribuição desta Tese é a proposta de construção de uma base de dados de condutividade hidráulica de rochas fraturadas a partir da enorme quantidade de

dados já existentes, gerados em projetos executados em diferentes locais do mundo e abrangendo os mais variados tipos litológicos e ambientes tectônicos. Grande parte dos dados foi gerada nas décadas de 70 a 90, quando maciços cristalinos foram investigados de forma detalhada para disposição de rejeitos radioativos. Existe ainda uma grande quantidade de dados de projetos civis e de mineração. A base de dados de condutividade hidráulica de rochas fraturadas ainda está em desenvolvimento.

A modelagem numérica de fluxo subterrâneo em bacias fraturadas pode então ser realizada a partir de dados normalmente disponíveis em projetos de pesquisa de recursos hídricos e de meio ambiente, que, via de regra, não dispõe de recursos financeiros para a execução de investigações do meio fraturado. Assim dados como geologia, solos, uso da terra, modelos digitais de elevação e dados de monitoramento hidrológico podem ser usados para a construção do modelo conceitual de fluxo da bacia. O mapeamento geológico de detalhe com a caracterização do ambiente tectônico gerador das estruturas permitirá encontrar um sítio semelhante na base de dados, cujas propriedades hidráulicas poderão ser utilizadas para alimentar o modelo numérico. O modelo conceitual hidrogeológico dependerá da identificação e caracterização geométrica das estruturas condicionantes do fluxo subterrâneo na bacia. Sem um modelo conceitual sólido, embasado na história tectônica e conhecimento geológico da área, é desaconselhável o uso de valores de condutividade hidráulica extraídos da base de dados. Os dados de condutividade hidráulica utilizados na Tese foram obtidos no sítio de Chalk River (AECL), Ontário, Canadá que é análogo ao de Barro Branco.

A avaliação de recursos hídricos da micro-bacia de Barro Branco fez parte do projeto PRODETAB/Aqüíferos – *“Planejamento Conservacionista e Modelagem Preditiva de Sistemas Aqüíferos do Cristalino para a Recarga Hídrica em Bacias Hidrográficas de Relevo Acidentado”* da Embrapa Solos, onde foram previstos, além da caracterização hidrogeológica, outros estudos de caracterização do meio físico, manejo dos solos e sócio-economia. A modelagem numérica de fluxo subterrâneo integrou dados de hidrologia de superfície e de propriedades físico-hídricas dos solos obtidos neste e em outros projetos desenvolvidos na região noroeste fluminense.

A modelagem permitiu algumas conclusões importantes sobre o regime hidrológico da bacia. Assim, os resultados da simulação histórica mostraram uma distribuição de carga hidráulica que não apresentou alterações significativas de ano para ano, com exceção do ciclo de 2006/2007, caracterizando uma condição de fluxo natural, sem bombeamento, correspondente a um equilíbrio dinâmico.

Os perfis 2D de distribuição de carga hidráulica mostraram a existência de sistemas de fluxo locais, restritos aos dois vales da bacia, com as áreas de recarga correspondentes aos divisores de água entre os vales do Ferreira e do Barro Branco, e as áreas de descarga correspondentes aos próprios vales. Em outros trechos os perfis mostraram a existência de sistemas intermediários com a recarga ocorrendo no vale do Ferreira e a descarga no vale do Barro Branco. Os perfis mostraram também o caráter influente dos pequenos córregos formadores do Barro Branco.

Os balanços de massa anuais, relativos ao período de 20 anos, mostraram uma alternância entre armazenamento e depleção nas reservas da bacia. O balanço de massa acumulado permaneceu negativo durante 17 anos consecutivos da série, de 1988 a 2004, tendo havido uma recuperação das reservas apenas nos últimos três anos. O valor médio de recarga direta neste período foi de 233 mm, correspondendo a um volume de $1,27 \times 10^6 \text{ m}^3$, e o de recarga total (incluindo o fluxo influente) de $1,76 \times 10^6 \text{ m}^3$. Os três últimos anos da série podem representar o início de uma seqüência de armazenamento.

As medidas de vazão na bacia apresentaram valores muito pequenos que evidenciaram uma grande fragilidade dos sistemas hídricos superficiais, mesmo em épocas úmidas. Esta situação torna-se ainda mais grave pela prática de construção de pequenas barragens ao longo dos cursos d'água, para uso na irrigação das lavouras. Dados históricos e registros jornalísticos dão conta da ocorrência de cenários de total secamento dos córregos, com imensos prejuízos para a lavoura e para a vida da população local.

O critério principal de estabelecimento da vazão sustentável de exploração deve levar em conta um nível de extração que não ocasione a piora deste quadro. Foi sugerido como regime de exploração sustentável aquele que não resultar em vazões abaixo de $1,50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, tomando por base os volumes de descarga

correspondentes aos anos mais secos da série, acrescidos de uma margem de segurança. Em anos muito secos, a rigor, não existe uma vazão de exploração sustentável na micro-bacia de Barro Branco.

A análise do balanço de massa da série histórica mostrou que os anos muito secos não são necessariamente os anos de menor precipitação pluviométrica, a exemplo do ano de 1999, cuja precipitação foi de 812,10 mm, sendo o quinto menor índice pluviométrico, mas possuindo a recarga mais baixa da série, de apenas 73,13 mm. Ficou demonstrado que a avaliação da vazão sustentável deve basear-se na análise do balanço de massa, ano a ano, através da utilização de um modelo numérico calibrado.

Os cenários simulados de exploração através de poços demonstraram que vazões da ordem de 20 m³/h impactam significativamente a vazão dos córregos na bacia. Foi demonstrado também que vazões da ordem de 5m³/h podem não produziram impacto significativo nas vazões superficiais.

O modelo pode ainda ser melhorado com o aporte de novos dados, se houver uma continuidade dos estudos na área, principalmente com a inclusão de monitoramento integrado de fluxo subterrâneo e superficial. Neste sentido, alguns pontos de melhoria podem ser ressaltados:

- Execução de levantamento altimétrico de precisão (DGPS) das cotas dos poços e estações fluviométricas e elaboração de um modelo digital de elevação que inclua mais pontos das áreas de baixada da bacia, com equidistância das curvas de nível de 1 m;
- Monitoramento integrado dos piezômetros e das estações fluviométricas através de medidores de nível automáticos, com intervalos curtos de medição de forma a registrar a faixa de variação diária da água subterrânea integrada com as medidas de vazão dos rios;
- Monitoramento integrado de eventos de chuva intensa para melhor caracterização da relação entre escoamento superficial e subterrâneo;
- Mapeamento sistemático de fraturas (*scan mapping*) nas áreas da bacia do São Domingos que ofereçam condições de afloramentos para uma melhor caracterização do meio fraturado.

- Avaliação das incertezas envolvidas nos procedimentos de aquisição de dados hidrometeorológicos e a precisão dos equipamentos utilizados.

O fluxo através do perfil de solo foi importante para a identificação de classes de recarga, em conjunto com o relevo. No entanto, em termos de avaliação da recarga direta no modelo, o fluxo não saturado influenciou apenas no intervalo de tempo de chegada da frente de umidade ao nível freático. Simulações de longo prazo não apresentam uma grande sensibilidade à condutividade hidráulica dos solos.

O controle do relevo na recarga subterrânea deveria ser estudado de uma forma sistemática, com o monitoramento do escoamento superficial e do fluxo hipodérmico em encostas de forma integrada com o monitoramento do nível freático.

A estimativa de recarga através do cálculo do fluxo de base, usada como dado de entrada no modelo, foi possível devido à grande monotonia fisiográfica da região noroeste do Estado do Rio de Janeiro. O cálculo do fluxo de base na bacia de contribuição da estação de Cardoso Moreira forneceu um valor regional que pôde ser aplicado em Barro Branco, como uma primeira aproximação. Os valores de recarga direta foram encontrados durante a calibração do modelo. Ficou claro, a partir da análise dos cenários de bombeamento, que para o estabelecimento de vazões de exploração sustentáveis é mais importante avaliar a captura da descarga superficial do que estimar a recarga. Projetos de avaliação de recursos hídricos para outorga de exploração por poços e estimativa de vazões insignificantes, devem concentrar esforços no monitoramento da água superficial com dados de qualidade, que é mais simples e menos dispendioso do que estudos de recarga subterrânea. Modelos numéricos de fluxo subterrâneo que disponham de dados de qualidade de monitoramento superficial poderão ser então usados para o estabelecimento de vazões insignificantes e níveis de exploração sustentáveis.