

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO MANANCIAL SUBTERRÂNEO DE RIBEIRÃO PRETO - SP
3. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Abelardo A.A. Montenegro e Antonio M. Righetto

Dept. de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
São Carlos - SP - Brasil - CEP. 13.560

ABSTRACT

A numerical groundwater flow model applying Finite Elements Methods has been constructed for a multiaquifer system in Ribeirão Preto, São Paulo State, Brazil. This model has been used to analyze the hydrodynamic behavior and piezometric surfaces of the system, from its hydraulic properties and to evaluate the consequences of development alternatives. The aquifers modeled were the Botucatu (a sandstone aquifer) and the Serra Geral (a fractured medium), which are hydraulically connected with a intervening aquitard.

The calibrated model has been subsequently used to predict responses of the aquifers over a planning horizon under a uniform development alternative.

KEYWORDS

Modelo numérico quase-tridimensional em águas subterrâneas; Elementos Finitos; Aquífero Serra Geral; Aquífero Botucatu.

INTRODUÇÃO

O manancial subterrâneo da cidade de Ribeirão Preto é caracterizado pela superposição de dois aquíferos, separados por uma camada semi-permeável intermediária: o Serra Geral, superior, fraturado e freático e o aquífero Botucatu, arenito parcialmente homogêneo e isotrópico, semi-confinado em parte do domínio pelo Serra Geral e aflorante em alguns locais. Os poços em Ribeirão Preto exploram predominantemente o arenito inferior.

O estudo objetiva a obtenção de um modelo matemático para ser utilizado no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos da cidade de Ribeirão Preto a fim de possibilitar o planejamento do sistema de extração por poços, o acompanhamento do rebaixamento da superfície piezométrica e propiciar condições para o estudo da poluição das águas.

O estudo inclui o desenvolvimento do modelo computacional, descrição do domínio e levantamento das características hidrogeológicas, calibração do modelo e simulações numéricas.

O modelo matemático foi construído utilizando-se a técnica dos elementos finitos para um sistema multicamada. Em Montenegro e Righetto, (1988), são apresentados detalhes do equacionamento e as técnicas numéricas utilizadas.

A descrição do domínio é apresentada em Montenegro et al., (1988) onde são fornecidas as principais características do aquífero Botucatu e do Serra Geral na região da cidade de Ribeirão

Preto.

Este trabalho apresenta os estudos realizados para a calibração do modelo e simulações para a obtenção de piezometrias futuras do manancial, para um horizonte de planejamento de 13 anos, sob a hipótese de expansão uniforme de consumo.

SIMULAÇÕES E CALIBRAÇÕES NUMÉRICAS

O modelo computacional desenvolvido foi previamente submetido a uma fase de correção em domínios regulares, homogêneos, isotrópicos e simétricos, para os quais poder-se-ia utilizar soluções analíticas aproximadas, que tratassem o problema do escoamento radial em torno dos poços do domínio.

Foram efetuadas, nestes domínios simplificados, testes com os principais parâmetros envolvidos, que possibilitaram também investigações de metodologias eficientes para escolha do esquema transiente (basicamente, análises com intervalos de tempo e parâmetro de ponderação α e do processo iterativo (influência do parâmetro de relaxação λ)).

Após uma simulação permanente, seguia-se uma simulação transiente, considerando-se as extrações do domínio.

Concluída a fase de testes e correções partiu-se para simulações no domínio representativo do manancial subterrâneo de Ribeirão Preto, avaliando-se e adaptando-se as conclusões em domínios simplificados, para o problema real.

Já na fase de preparação dos dados de entrada, referentes a Ribeirão Preto, detectou-se regiões de Serra Geral vazias, onde a piezometria do sistema era inferior a cota de base deste aquífero.

Desenvolveu-se então uma subrotina de expansão - contração da malha que, a cada tempo de simulação, verificava os nós efetivos do Serra Geral e os não-efetivos. Na vizinhança dos não-efetivos, implantava-se um contorno de Neuman de fluxo nulo e a malha era então, contraída ou expandida, caso o modelo estivesse a simular o rebaixamento do sistema ou sua recuperação, respectivamente.

Simulações Permanentes

Quando são analisados aquíferos com condições t - dependentes, é de grande importância a escolha da solução inicial que, de preferência, deve representar uma realização da hidrodinâmica local.

A razão em se ter escolhido 1983 como ano de partida é óbvia. É para este ano que se dispõe de dados de níveis estáticos, dinâmicos e de extração do sistema.

Teoricamente, a verdadeira condição permanente deve ter existido 30 ou 40 anos atrás, quando o bombeamento era bastante pequeno. entretanto, é impraticável iniciar-se o modelo em anos anteriores a 1983, devido à carência de dados.

O modelo inicialmente produz uma solução quase-permanente para Ribeirão Preto, tendo como dados de entrada os níveis estáticos e transmissividades nos nós (extrapolados a partir dos valores nos poços), e desprezando-se tanto a armazenabilidade quanto o bombeamento. Desenvolve-se a partir daí um processo iterativo quase-linear até a convergência (devido à existência de aquíferos freáticos).

Nestas simulações, são calibradas as transmissividades/condutividades do Botucatu, conjuntamente com a condutividade do aquitarde (suposta uniforme em todo o domínio).

Cabe aqui salientar a boa qualidade dos dados de transmissividade disponíveis para o Botucatu,

que foram efetivamente calibrados apenas na zona central da cidade de Ribeirão Preto, para que se mantivessem os gradientes (praticamente uniformes) originários da zona sudeste da cidade. Não foram realizadas calibrações com o Serra Geral propriamente dito, em virtude da quase total ausência de informações quanto ao seu comportamento hidrodinâmico. Para inicialização do modelo permanente, foram adotados, para o Serra Geral, os níveis estáticos do nós homólogos (sob uma mesma vertical, através do aquítarde) no Botucatu, bem como as condutividades anisotrópicas geradas com base nas características do fissuramento.

Dá-se especial atenção à condutividade do aquítarde, de modo a se controlar o derrame durante as iterações do quase linear (provocada por ajustes de cargas nos dois aquíferos), cujo sentido depende da relação entre as cargas dos aquíferos.

Simulações Transientes

Inicializadas com a solução quase-permanente comentada anteriormente, estas simulações são conduzidas até o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico, levando-se em consideração as extrações e armazenabilidades nos nós. Durante estas simulações, são calibradas as armazenabilidades dos aquíferos e aquítarde.

No caso específico de Ribeirão Preto, devido à inércia apresentada pelo Serra Geral (devido basicamente a sua alta armazenabilidade), seria impraticável a calibração da armazenabilidade do aquítarde, assumida nula nas simulações.

Continua-se controlando o derrame através do aquítarde, de modo a não se promover rebaixamentos/levantamentos piezométricos excessivos no sistema.

Controla-se, aqui, a infiltração vertical a partir da superfície. No caso específico de Ribeirão Preto, o equilíbrio dinâmico obtido (ano de 1983), dispensou a infiltração, que então foi assumida nula no interior do domínio, que não inclui as regiões de forte recarga devida aquele fator.

Obtido o equilíbrio dinâmico, verifica-se os rebaixamentos, comparando-os com os fornecidos pelos poços do sistema. Caso os aquíferos estejam, globalmente, rebaixados/levantados, procura-se ajustar a condutividade do aquítarde. em caso de discrepâncias locais, altera-se as armazenabilidades dos nós vizinhos, aumentando este parâmetro ou o diminuindo, caso o rebaixamento esteja, respectivamente, superestimado ou subestimado.

As simulações transientes são realizadas a partir de soluções quase-permanentes simuladas para o Botucatu e para o Serra Geral. Iniciado o bombeamento, as armazenabilidades são calibradas de modo a garantir o ajuste entre o equilíbrio dinâmico simulado e o mapa de níveis dinâmicos disponível para 1983. A correspondência, a nível global, é muito boa; entretanto, a nível local, o ajuste é apenas parcial. Este pode ser atribuído, basicamente, a falhas nas leituras de campo dos níveis dinâmicos (devido à interferência entre poços), a eventuais vazões de extração não fornecidas, e à condição de contorno constante no tempo, que não permite rebaixamentos próximos à fronteira do domínio.

No contato horizontal Botucatu-Serra Geral, a implantação de contorno de Dirichlet de carga variável no tempo (regulada pelo Botucatu), além de fisicamente estar mais próxima à realidade, produzir melhores resultados que contorno de Neuman de fluxo nulo.

Nas simulações transientes, o controle automático do intervalo de tempo conduziu a bons resultados, aliado a um parâmetro de ponderação $\alpha = 0,70$. A relaxação se mostrou mais adequada para $\lambda = 0,30$, principalmente nos tempos iniciais de simulação.

O equilíbrio dinâmico de Ribeirão Preto foi obtido decorridos 186 horas do início do bombeamento.

Como não houve significativo rebaixamento entre as soluções quase-permanente e transiente em e-

quilíbrio, poucos nós do domínio mudaram de regime, passando de confinado para freático.

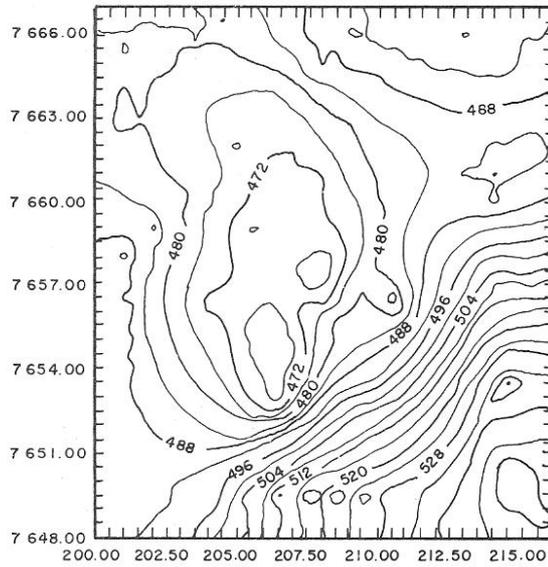


Fig. 1. Cargas potenciométricas para a condição de equilíbrio dinâmico simulado para o Botucatu (1983)

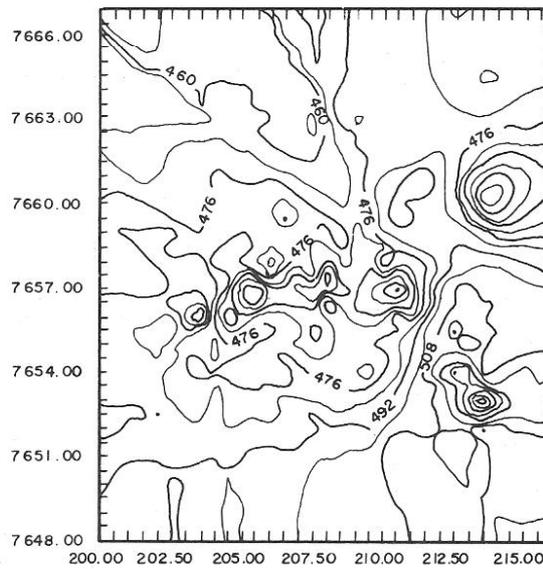


Fig. 2. Níveis dinâmicos observados para o Botucatu (1983)

Assim, as instabilidades no transiente devido à atualização de regime dos nós são discretas, não conduzindo à necessidade de redução do passo de tempo. Adotou-se relaxação com $\lambda = 0,30$, de modo a garantir convergência praticamente sem instabilidade.

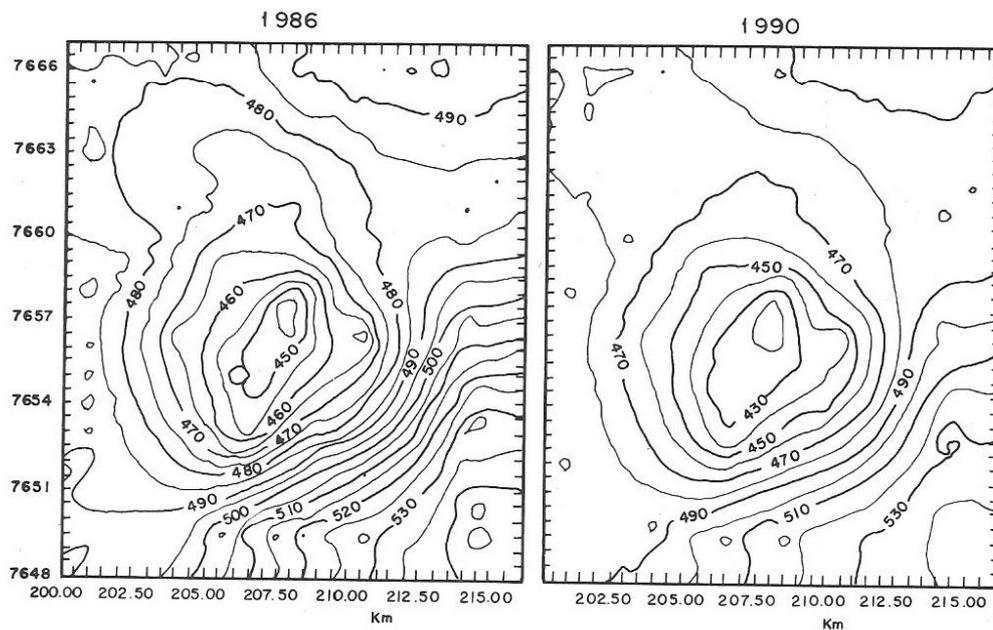
Projeções Futuras Simuladas

Inicializadas com base nos cenários de equilíbrio dinâmico e nas vazões de extração, todos referentes a 1983, estas simulações foram conduzidas assumindo-se um crescimento anual de demanda uniforme e igual a 5%. De modo a aumentar a eficiência das simulações, adotou-se um incremento de tempo uniforme e igual a 10 dias, associado a uma relaxação $\lambda = 1,30$.

Nota-se o excessivo rebaixamento na região Central, e a interferência nas zonas não-centrais da forte extração no domínio. A interface freático - confinado para o Botucatu também se desloca para próximo ao contorno viário de Ribeirão Preto, aumentando o risco de poluição ao principal manancial da cidade, devido à existência de forte contaminação superficial.

A medida que a interface Botucatu freático-confinado se afasta do centro de Ribeirão Preto, o Serra Geral vai, cada vez mais, tornando-se não-efetivo. Segundo as projeções simuladas, em 1995 apenas pequena parcela deste aquífero contribuirá para o Botucatu.

Os fortes rebaixamentos durante as simulações provocam instabilidades quando associadas a mudanças de regime nos nós do domínio (de confinados e freáticos). Nota-se, entretanto, que tais instabilidades são de curta duração, não conduzindo à divergência do esquema numérico, principalmente quando se utiliza uma aceleração no processo quase-linear (nas simulações, adotou-se $\lambda = 1,30$). De modo a reduzir o tempo de CPU, o intervalo de tempo entre soluções transientes consecutivas foi mantido uniforme e igual a 10 dias.



Figs.3 a.b. Evolução piezométrica futura para o Botucatu, na cidade de Ribeirão Preto

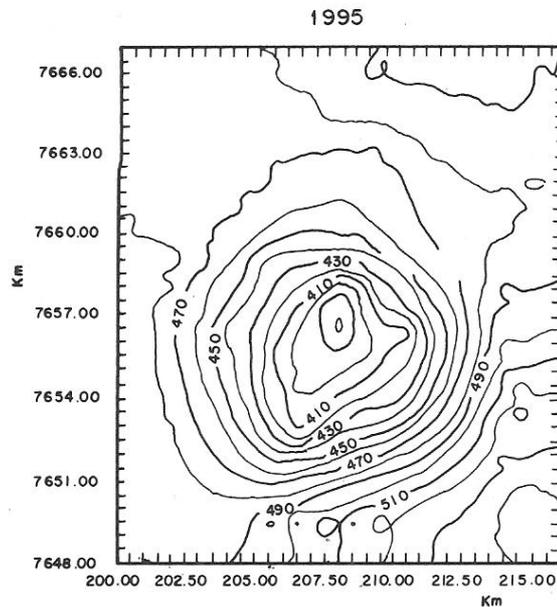


Fig. 3 c. Evolução piezométrica futura para o Botucatu, na cidade de Ribeirão Preto

CONCLUSÕES

A calibração dos parâmetros físicos do meio através do modelo numérico desenvolvido, conduziu a piezometrias simuladas próximas das obtidas com os dados de campo.

Entretanto, deve-se salientar que são ainda necessários muitos estudos de caracterização dos aquíferos presentes, além dos já realizados nas áreas de geologia e hidrogeologia, para que se possa contar com um modelo de gerenciamento plenamente calibrado e validado em Ribeirão Preto.

(1) As informações do perfil geológico e vazão de extração obtidas através dos poços da região, são muitas vezes contraditórias e inexatas.

Além disso, as interferências entre os poços prejudicam o estabelecimento da configuração piezométrica natural do sistema, a partir dos dados de níveis estáticos e dinâmicos.

(2) Não se dispõe de hidrógrafas dos poços de Ribeirão Preto, sobre um dado período histórico. Por essa razão, a etapa de validação do modelo, calibrado para o ano de 1983, ficou prejudicada.

As hidrógrafas dos poços são dados de mais alta importância quando se deseja dispor de um modelo efetivamente capaz de reproduzir situações reais e de prever situações futuras de um sistema subterrâneo.

(3) Os dados de vazão de extração, para o ano de 1983, são aceitáveis. Entretanto, é visível em algumas regiões dos mapas de piezometria simulada, sob regime freático, que alguns poços marcantes na região não tiveram seus dados fornecidos, o que conduziu à obtenção de rebaixamentos simulados inferiores aos observados. Tal discrepância não pode ser atribuída isoladamente a um eventual confinamento local do arenito, uma vez que a adoção, para tais regiões, de valores de armazenabilidades típicos de Botucatu artesianos ($1,2 \times 10^{-4}$ a 9×10^{-4}), não as eliminou.

(4) As transmissividades estão disponíveis em razoável número de testes de bombeamento, o que permitiu a confecção de um mapa de isotransmissividade para o arenito Botucatu.

(5) As armazenabilidades calibradas confirmam a tendência do sistema em evoluir para uma configuração onde não mais ocorra um efetivo confinamento. Nas regiões próximas aos principais cones de depressão, não foi possível, durante a calibração, obter do modelo computacional valores de rebaixamento próximos aos observados, sem que para isto se considerasse coeficientes de armazenabilidade típicos de Botucatu freático (adotado igual a 4×10^{-1}). A validação deste procedimento foi mais tarde, confirmada, através da comparação entre cotas de topo do Botucatu e cotas piezométricas, observando-se rebaixamentos aquém do topo do aquífero.

(6) A piezometria simulada para 1983 apresenta valores máximos e mínimos razoavelmente próximos aos observados. A forte interferência entre poços faz, entretanto, com que o mapa piezométrico observado não exiba as características de circulação e recarga regional do domínio. Tais informações podem ser obtidas a partir dos mapas fornecidos por Montenegro (1990), apresentando ótimo ajuste com as equipotenciais simuladas.

(7) Verificou-se nas simulações que é desprezível a contribuição da infiltração direta para a recarga do sistema, no interior do domínio em estudo.

(8) Assumiu-se condição de carga especificado no contorno do domínio, desprezando-se o rebaixamento nesta região com decorrer do bombeamento. Portanto, este contorno foi locado o mais distante das regiões de maior solicitação e as cargas obtidas a partir dos níveis estáticos dos poços nesta área. Este procedimento foi necessário, devido ao reduzido número de piezômetros nos bairros mais afastados, entretanto introduziu alguns erros de simulação nas zonas próximas a tal contorno. Deve-se incentivar a instalação de piezômetros na zona rural de Ribeirão Preto, principalmente na porção sudeste da cidade, onde parece se situar a principal zona de recarga regional do domínio.

(9) Sob a hipótese de evolução anual da demanda, homogênea e igual a 5%, haverá significativo rebaixamento piezométrico no manancial subterrâneo, com cones de depressão principais, em 1995, apresentando depressões da ordem de 60 metros em relação aos valores simulados para 1983 (comparar Figuras 1 e 3.c). Rebaixamentos desta magnitude incrementarão significativamente o custo da exploração subterrânea em Ribeirão Preto e certamente conduzirão parte do sistema de captação, constituído em sua grande maioria por poços de pequena penetração no Botucatu, ao colapso. Além disso, haverá aumento dos riscos de contaminação dos aquíferos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Osmar Simelli, pela participação decisiva e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York.
- Bear, J. (1979). Hydraulics of Groundwater, Israel - McGraw-Hill.
- Chorley, D.W. and Frind, E.O. (1978). An Iterative Quasi-Three-Dimensional Finite Element Model for Heterogeneous Multiaquifer Systems. Water Resources Research, 14(5):943-952.
- Cirilo, J.A., Cabral, J.J.S.P., França, H.P.M. and Neto, B.G.M.V. (1987). Utilização de Modelos Matemáticos para Acompanhamento da Exploração de Aquíferos Confinados ou Semi-Confinados. VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Salvador, BA, (4):1-10.
- DAEE (1974). Estudo de Águas Subterrâneas - região administrativa 6, Ribeirão Preto.
- Ehlig, C. and Halepaska, J.C. (1976). A Numerical Study of Confined - Unconfined Aquifers Including Effects of Delayed Yield and Leakage. Water Resources Research, 12 (6).
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Groundwater, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Fujinawa, K. (1977). Finite Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer Systems: The

- Behavior of Hydrological Properties in an Aquitard while being pumped, Journal of Hydrology, 33:59-72.
- Fujinawa, K. (1977). Finite Element Analysis of Groundwater Flow in Multiaquifer Systems: A Quasi-Three-Dimensional Flow Model, Journal of Hydrology, 33:349-362.
- Montenegro, A.A.A. (1990). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto - São Paulo, Dissertação de Mestrado, EESC-USP.
- Montenegro, A.A.A. and Righetto, A.M. (1988). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto 1 - Descrição do Domínio, V Congresso de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo SP.
- Montenegro, A.A.A. and Righetto, A.M. (1988). Modelação Matemática do Manancial Subterrâneo de Ribeirão Preto 2 - Modelação Matemática, V Congresso de Águas Subterrâneas (ABAS), São Paulo SP.
- Narasimhan, T.N., Neuman, S.P. and Witherspoon, P.A. (1978). Finite Element Method for Subsurface Hydrology Using a Mixed Explicit-Implicit Scheme, Water Resources Research, 14(5): 863-877.
- Pinder, G.F. and Frind, E.O. (1972). Application of Galerkin's procedure to aquifer analysis, Water Resources Research, 9(1):108-120.
- Prickett, T.A. and Lonquist, C.G. (1971). Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation, Illinois State Survey, Urbana, Bulletin 55.
- Wang, H. and Anderson, M. (1982). Introduction of Groundwater Modeling - Finite Difference and Finite Element Methods, W.H. Freeman and Company - San Francisco.