

PROCEDIMENTO ANALÍTICO PARA A ESTIMATIVA DE REBAIXAMENTOS CRÍTICOS EM POÇOS PARCIALMENTE PENETRANTES

José Eduardo Alamy Filho¹; Harry Edmar Schulz¹ & Dante Contin Neto¹

Resumo – A utilização de modelos matemáticos constitui uma alternativa módica e cada vez mais relevante no projeto e planejamento de sistemas de abastecimento de água. O presente trabalho tem por fundamento apresentar uma ferramenta analítica para estimar a penetração de poços tubulares submetidos a bombeamento contínuo e situados em aquíferos livres. Esta estimativa é feita em função dos rebaixamentos excessivos que podem causar desativação do poço por problemas de cavitação da bomba. A partir desta idéia pode-se também prever a vida útil de poços submetidos a condições de bombeamento e penetrações pré-fixadas. Adicionalmente é apresentada uma série de simulações, permitindo demonstrar a aplicabilidade do modelo analítico descrito.

Abstract – Mathematical modeling sets up a cheap and outstanding tool for water supply design and planning. This paper describes an analytical model in order to evaluate well screen penetrations under continuous pumping rates and placed in unconfined aquifers. This evaluation is done according to excessive drawdowns which can cause well exhaustion by pump cavitation problems. In addition this model can estimate the life time of wells under pumping and penetration conditions previously specified. Furthermore, some simulations are presented in order to apply the proposed mathematical procedure.

Palavras-chave - rebaixamentos, poços parcialmente penetrantes, modelagem analítica.

INTRODUÇÃO

A despeito da crescente utilização de poços tubulares no abastecimento de água, a existência de ferramentas matemáticas que estimem a penetração das seções filtrantes dos mesmos é ainda escassa. De uma forma geral, destaca-se a conveniência de se explorar toda a espessura saturada do

¹ Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, caixa postal 359, CEP 13560-970, São Carlos, SP, zealamy@bol.com.br, heschulz@sc.usp.br, dantecn@terra.com.br.

aquífero, uma vez que este procedimento pode resultar no fornecimento de vazões maiores. Todavia, poços perfurados em formações aquíferas geralmente não são completados em toda espessura saturada da formação. Esse procedimento é muito comum e tem em vista, principalmente, a redução dos custos inerentes à perfuração. A reduzida penetração de poços em aquíferos confinados pode ainda ser justificada quando da verificação de elevadas cargas hidráulicas sobre o topo da formação, de modo que, para a vazão de projeto, os níveis dinâmicos estejam sempre acima do nível superior do aquífero.

Em aquíferos livres, contudo, poços com pequena penetração, quando submetidos a um bombeamento contínuo, podem ser inutilizados em curto prazo. Este processo ocorre quando os níveis dinâmicos se aproximam do nível da bomba submersa, de maneira a provocar reduzidas alturas de sucção e conseqüentes problemas de cavitação. Poços com reduzidas penetrações são restritos a baixa produção, uma vez que a extração de maiores volumes de água pode redundar em rebaixamentos mais acentuados. Fatores como esses destacam a necessidade de se explorar melhor a espessura saturada do aquífero, proporcionando um aumento da penetração da bomba e do filtro do poço. Uma solução amplamente utilizada na prática consiste na instalação do filtro no terço inferior da formação. Outra alternativa prática consiste no bombeamento do poço até que os níveis dinâmicos sejam mantidos um pouco acima do topo do filtro.

Testes de poços, realizados em campo, antes do início da operação do sistema, permitem estimar a vazão que pode ser extraída do poço de modo a evitar a exaustão do mesmo por rebaixamentos excessivos. Esses testes, contudo, são executados quando o poço já está construído, com a penetração da seção filtrante concluída. Assim, embora estimem a taxa de bombeamento e forneçam elementos para a escolha da bomba, os testes de poços não contribuem na escolha da penetração do filtro.

Ainda que os modelos numéricos sejam, na atual conjuntura, dominantes no cálculo dos escoamentos subterrâneos, a utilização de funções analíticas vem assumindo uma relevância significativa na avaliação dos efeitos de determinadas singularidades e contornos (Método dos Elementos Analíticos e Método das Funções de Poços). Os procedimentos analíticos, via de regra, demandam um menor esforço computacional, permitindo o cálculo transiente dos níveis dinâmicos através de funções contínuas no espaço.

Diante das circunstâncias previamente relatadas, este trabalho descreve uma formulação analítica para estimar rebaixamentos em aquíferos livres. Adicionalmente faz-se uma proposição da utilização deste método para avaliar a vida útil de poços em operação contínua, diante dos rebaixamentos críticos que podem decorrer da exploração excessiva do sistema. Esta ferramenta

algumas propriedades do aquífero, como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e rendimento específico.

MODELO TRANSIENTE DE NEUMAN

Equacionamento geral

A equação diferencial que governa o escoamento transiente num aquífero livre é obtida a partir de uma combinação entre a Lei de Darcy e o Princípio da Conservação de Massa. Num sistema de coordenadas radial, esta equação é descrita por :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r}\right) \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{k_v}{k_r} \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S_s}{kr} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} \quad (1)$$

Onde:

- s = rebaixamento [L];
- r = distância radial entre o poço e um ponto em que se deseja calcular o rebaixamento [L];
- k_r = condutividade hidráulica radial do aquífero [LT^{-1}];
- k_v = condutividade hidráulica vertical do aquífero [LT^{-1}];
- z = distância vertical medida a partir da base do aquífero [L];
- S_s = armazenamento específico do aquífero [L^{-1}];
- t = tempo [T].

A *Figura 1* ilustra, de maneira didática, as grandezas físicas importantes no desenvolvimento das formulações descritas neste item.

Do modelo conceitual representado pela *Figura 1*, podem-se definir os seguintes termos:

- d = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço bombeado [L];
- l = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço bombeado [L];
- do = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) ao topo do filtro do poço de monitoramento [L];
- lo = distância da superfície piezométrica (antes do início do bombeamento) à base do filtro do poço de monitoramento [L];
- k_r = condutividade hidráulica radial do aquífero [LT^{-1}];

- k_v = condutividade hidráulica vertical do aquífero [$L T^{-1}$];
- m = espessura saturada do aquífero antes de se iniciar o bombeamento [L];
- r = distância radial do poço bombeado a um ponto qualquer do poço de monitoramento [L];
- s = rebaixamento da superfície piezométrica durante o bombeamento [L];
- S = armazenamento elástico do aquífero, adimensional;
- S_s = armazenamento específico do aquífero (S/m) [L^{-1}];
- S_y = rendimento específico do aquífero, adimensional;
- z = coordenada vertical com origem na base do aquífero [L];
- Q = taxa de bombeamento (vazão) [$L^3 T^{-1}$].

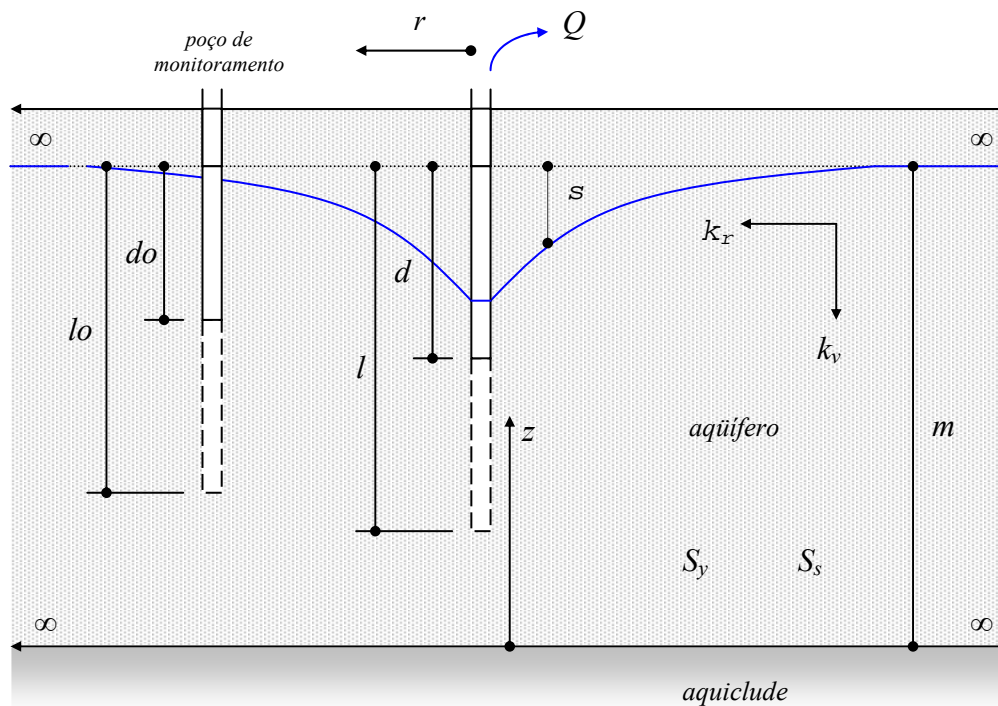


Figura 1. Esquema do aquífero, ilustrando as grandezas relevantes na modelagem analítica

NEUMAN (1974) derivou uma solução analítica para a equação diferencial (1), aplicando algumas hipóteses simplificadoras e condições de contorno. Tal procedimento é fundamental na investigação de soluções analíticas para equações diferenciais parciais. Dentre as hipóteses utilizadas no equacionamento destacam-se as seguintes:

- Todas as formações, em torno do poço, são constituídas por camadas horizontais que se estendem infinitamente na direção radial ao mesmo;
- A superfície piezométrica inicial (antes do início do bombeamento) é horizontal e se estende infinitamente na direção radial ao poço;
- O aquífero é homogêneo;

- A água subterrânea apresenta densidade e viscosidade constantes;
- O escoamento pode ser descrito pela Lei de Darcy;
- A vazão do poço é constante para cada intervalo de tempo considerado;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são consideradas desprezíveis;
- O aquífero é compressível e elástico;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal.

Da mesma forma, podem-se citar as seguintes condições de contorno:

- Antes do início do bombeamento, os rebaixamentos são nulos em qualquer ponto na vizinhança do poço;
- Após o início do bombeamento e a distâncias infinitas do poço bombeado, os rebaixamentos também são nulos;
- Na base do aquífero, a variação do rebaixamento com a profundidade é nula;
- A superfície piezométrica é um contorno móvel. Quando este contorno sofre declínio, a água dos poros flui da superfície piezométrica para o aquífero;

Assim, a solução exata para a equação governante (1) fornece o rebaixamento em um determinado ponto situado a uma distância r do poço bombeado. Conforme foi previamente ilustrado pela *Figura 1*, esse ponto é representado por um poço de monitoramento. A equação final é descrita por:

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \int_0^{\infty} 4y \cdot J_0 \left(y\beta^{1/2} \right) \cdot \left[u_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y) \right] dy \quad (2)$$

Onde:

- y = variável independente de integração ($0 \leq y \leq \infty$);
- $T = k_r \cdot m$ = transmissividade do aquífero [L^2T^{-1}].

Apesar da aparência reduzida da *Equação (2)*, sua resolução apresenta uma certa complexidade inerente aos termos presentes na integral. Esses termos são representados por funções especiais e necessitam de um tratamento numérico cuja descrição torna-se conveniente.

A função $J_0(x)$

O termo $J_0(x)$ corresponde à função de Bessel de primeira espécie e ordem zero de uma variável independente genérica x . Esta função é descrita pela *Equação (3)*. Seu comportamento é periódico e amortecido, como ilustrado pela *Figura 2*.

$$J_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{2n}}{n!} \quad (3)$$

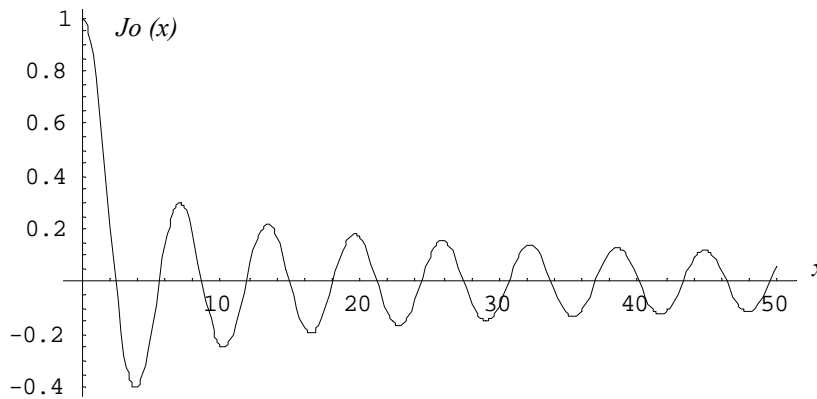


Figura 2 . Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero .

Os termos $u_o(y)$ e $u_n(y)$

Estes termos são construídos pela seguinte combinação entre funções exponenciais, hiperbólicas e trigonométricas:

$$u_o(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 - \gamma^2)]\} \cdot [\sinh(\gamma \cdot z_{2d}) - \sinh(\gamma \cdot z_{1d})]}{[y^2 + (1 + \sigma)\gamma^2 - (y^2 - \gamma^2)^2 / \sigma] \cosh(\gamma)} \cdot \frac{\{\sinh[\gamma \sigma(1 - d_d)] - \sinh[\gamma \sigma(1 - l_d)]\}}{(z_{2d} - z_{1d}) \cdot \gamma \sigma \cdot (l_d - d_d) \sinh(\gamma)} \quad (4)$$

$$u_n(y) = \frac{\{1 - \exp[-ts\beta(y^2 + \gamma^2)]\} \cdot [\sin(\gamma \cdot z_{2d}) - \sin(\gamma \cdot z_{1d})]}{[y^2 - (1 + \sigma)\gamma^2 - (y^2 + \gamma^2)^2 / \sigma] \cos(\gamma)} \cdot \frac{\{\sin[\gamma \sigma(1 - d_d)] - \sin[\gamma \sigma(1 - l_d)]\}}{(z_{2d} - z_{1d}) \cdot \gamma \sigma \cdot (l_d - d_d) \sin(\gamma)} \quad (5)$$

Onde:

- $ts = \frac{T \cdot t}{S_s \cdot m \cdot r^2} \quad (6)$

- $\sigma = \frac{S_s \cdot m}{S_y} \quad (7)$

- $$\beta = \frac{r^2}{m^2} \cdot \frac{k_v}{k_r} \quad (8)$$

- $$z_{2d} = \frac{(m - do)}{m} \quad (9)$$

- $$z_{1d} = \frac{(m - lo)}{m} \quad (10)$$

- $$l_d = \frac{l}{m} \quad (11)$$

- $$d_d = \frac{d}{m} \quad (12)$$

- $$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (13)$$

- $$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (14)$$

Os termos γ_o e γ_n , presentes nas *Equações (4) e (5)*, são as raízes das seguintes equações:

$$\sigma \cdot \gamma_o \cdot \sinh(\gamma_o) - (y^2 - \gamma_o^2) \cdot \cosh(\gamma_o) = 0, \quad \text{com: } \gamma_o^2 < y^2 \quad (15)$$

$$\sigma \cdot \gamma_n \cdot \sin(\gamma_n) + (y^2 + \gamma_n^2) \cdot \cos(\gamma_n) = 0, \quad \text{com: } (2n-1)(\pi/2) < \gamma_n < n\pi \quad n \geq 1 \quad (16)$$

Neste ponto é conveniente destacar que, apesar do caráter analítico das formulações, alguns procedimentos numéricos são indispensáveis em algumas etapas de solução. Um exemplo ocorre no cálculo dos termos γ_o e γ_n , uma vez que as *Equações (15) e (16)* não apresentam solução estritamente analítica. Para este caso, pode ser aplicado o método de Newton-Raphson, permitindo o cálculo iterativo dos termos γ_o e γ_n como:

$$\gamma_{o_{n+1}} = \gamma_{o_n} - \frac{\sigma \gamma_{o_n} \cdot \sinh(\gamma_{o_n}) - (y^2 - \gamma_{o_n}^2) \cosh(\gamma_{o_n})}{\sinh(\gamma_{o_n}) \cdot [\sigma - (y^2 - \gamma_{o_n}^2)] + \cosh(\gamma_{o_n}) \cdot (\sigma \gamma_{o_n} + 2\gamma_{o_n})} \quad (17)$$

$$\gamma_{n_{n+1}} = \gamma_{n_n} - \frac{\sigma \gamma_{n_n} \cdot \sin(\gamma_{n_n}) + (y^2 + \gamma_{n_n}^2) \cos(\gamma_{n_n})}{\sin(\gamma_{n_n}) \cdot [\sigma - (y^2 + \gamma_{n_n}^2)] + \cos(\gamma_{n_n}) \cdot (\sigma \gamma_{n_n} + 2\gamma_{n_n})} \quad (18)$$

Procedimento de integração da *Equação (2)*

A *Equação (2)* é aqui convenientemente reescrita como:

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \int_0^{\infty} 4y \cdot J_0 \left(y\beta^{1/2} \right) \cdot \left[u_o(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y) \right] dy$$

$$\text{Onde: } \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo \left(y\beta^{1/2} \right) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy = \int_0^{\infty} F(y) dy \quad (19)$$

Como a função $F(y)$ não admite integração analítica exata, sua solução implica na necessidade de se recorrer aos procedimentos de quadratura numérica. Uma alternativa de baixo custo computacional consiste na aplicação da regra de Simpson 1/3, que fornece uma boa aproximação para a *Equação (19)*. Por este procedimento, o domínio da função é dividido num número finito de intervalos ($y_0 \leq y \leq y_{\infty}$), com $y_0 = 0$ e $y_{\infty} \rightarrow \infty$. A equação discretizada para o cálculo da integral fornece:

$$\int_0^{\infty} F(y) dy \approx \frac{\Delta y}{3} \cdot \left[F(y_0) + 4 \cdot \sum F(y_{\text{impar}}) + 2 \cdot \sum F(y_{\text{par}}) + F(y_{\infty}) \right] \quad \text{onde: } \Delta y \approx dy \quad (20)$$

Estimativa do rebaixamento no poço bombeado

Os rebaixamentos avaliados no próprio poço podem ser estimados pela *Equação (2)*, fazendo-se a distância $r \rightarrow \phi / 2$ (onde ϕ é o diâmetro do poço) e o comprimento do filtro do poço de monitoramento tender ao comprimento do filtro do poço bombeado, ou seja:

$$s_w = \lim_{r \rightarrow \phi / 2} \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo \left(y\beta^{1/2} \right) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy \quad \text{para } d = do \text{ e } l = lo \quad (21)$$

É conveniente comentar que o procedimento analítico para a estimativa dos rebaixamentos precisa ser acoplado a dois métodos numéricos (Newton-Raphson e Simpson 1/3, por exemplo). Isto decorre da complexidade das equações geradas pela solução exata da equação diferencial governante. Em suma, pode-se dizer, a rigor, que a resolução das equações analíticas de Neuman utiliza um procedimento quase-analítico.

SIMULAÇÕES

Após a extensa, porém conveniente, descrição do equacionamento, é de grande utilidade a realização de algumas simulações. Esta etapa demonstra a aplicabilidade e o comportamento das equações, traçando importantes relações entre o modelo matemático teórico (*Equações (2) e (21)*) e as estimativas práticas conduzidas por ele. Neste item foram avaliados vários cenários, desde aspectos de bombeamento até aspectos relacionados às propriedades hidráulicas do aquífero. Esses

cenários permitem avaliar como variam os rebaixamentos em poços parcialmente penetrantes situados em formações não confinadas. Os dados utilizados nas simulações representam, na sua maioria, valores médios do Aquífero Guarani (Sistema Botucatu-Pirambóia) na região de afloramento do município de Ribeirão Preto (CONTIN NETO, 1996).

Estimativa de rebaixamentos críticos e da vida útil do poço para um filtro com penetração conhecida

Neste caso, pode-se estimar a vida útil de um poço com um filtro de penetrações (d e l) conhecidas, em função dos rebaixamentos causados por ele próprio. Neste caso, foram utilizados os seguinte valores:

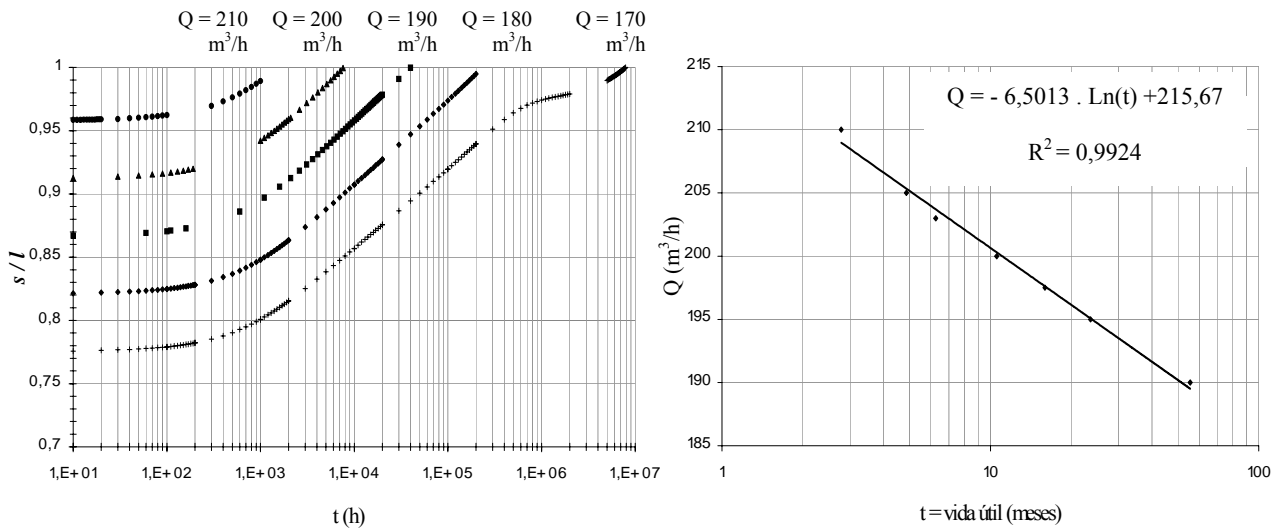
- espessura (m) = 100 m;
- condutividade hidráulica radial (k_r) = 0,1 m/h;
- condutividade hidráulica vertical (k_v) = 0,01 m/h;
- armazenamento elástico do aquífero (S) = 10^{-4} ;
- rendimento específico do aquífero (S_y) = 0,25;
- distância entre o topo do filtro e o topo do aquífero (d) = 35 m;
- distância entre a base do filtro e o topo do aquífero (l) = 50 m;

Os *Gráficos 1.a e 1.b* ilustram os resultados da simulação.

Os resultados derivados dos *Gráficos 1.a e 1.b* permitem estimar a vazão máxima que pode ser extraída de um poço, de modo a evitar sua exaustão num período de bombeamento contínuo pré-fixado. Note-se que, neste caso e nas demais simulações, o rebaixamento crítico é aquele que faz a relação $(s / l) \approx 1$. Na prática, a inutilização do poço principia com o processo de cavitação da bomba. Neste estudo, considerou-se que as cotas da bomba e da base do filtro são iguais.

Gráfico 1 . a) Variação temporal dos rebaixamentos no poço ($s/l \times t$ (h))

b) Relação entre a vazão do poço e a sua vida útil em relação ao rebaixamento teórico máximo possível



Efeitos da anisotropia do aquífero

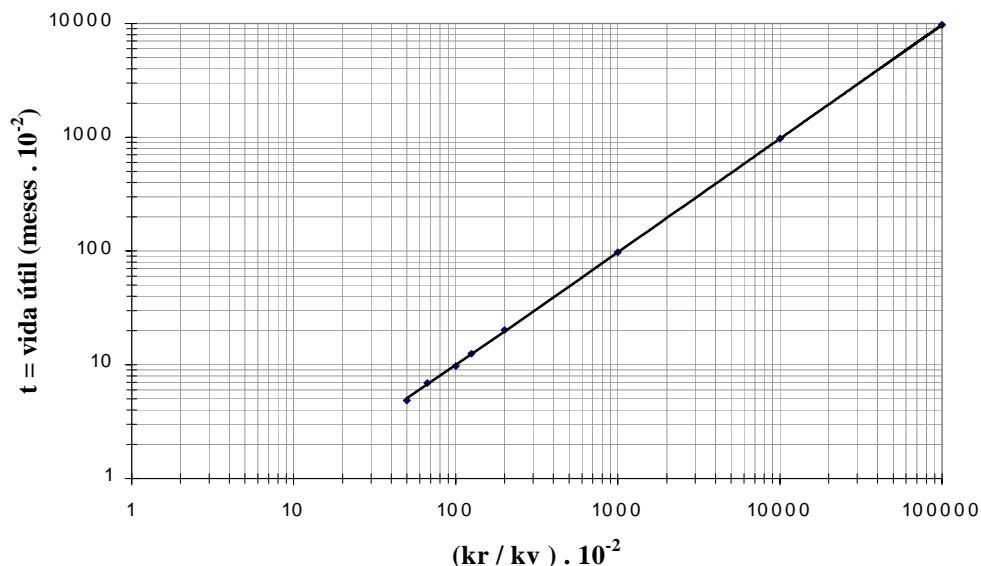
É importante comentar que o modelo analítico utilizado abrange cenários de anisotropia. Isto implica que as condutividades hidráulicas podem ser diferentes nas direções radial e vertical. Condições isotrópicas ocorrem quando as partículas individuais da formação geológica são aproximadamente esféricas. Todavia, esse cenário raramente é observado. De acordo com KRUSEMAN e DE RIDDER (1990), nos processos sedimentares de formação do aquífero, as partículas tendem a sofrer deposição sobre as partes planas, fazendo com que a condutividade hidráulica radial seja significativamente maior do que a condutividade hidráulica vertical.

A simulação apresentada neste item pretende avaliar o comportamento dos rebaixamentos e da vida útil de um poço submetido a diferentes cenários de anisotropia. Os dados utilizados nos cálculos foram os seguintes:

- vazão extraída (Q) = 50 m^3/h ;
- espessura do aquífero (m) = 50 m;
- condutividade hidráulica radial (k_r) = 0,1 m/h;
- armazenamento elástico do aquífero (S) = 10^{-4} ;
- rendimento específico do aquífero (S_y) = 0,25;
- distância entre o topo do filtro e o topo do aquífero (d) = 10 m;
- distância entre a base do filtro e o topo do aquífero (l) = 20 m;

Os resultados são ilustrados pelo *Gráfico 2*.

Gráfico 2. Variação da vida útil do poço em relação ao fator de anisotropia (k_r / k_v)



Os resultados da simulação indicam que quanto maior o fator (k_r / k_v), maior é a vida útil do poço. Embora a condutividade hidráulica radial seja um fator mais relevante na avaliação dos rebaixamentos, uma vez que relaciona-se com a transmissividade da formação, pode-se inferir que, quanto mais anisotrópico for o aquífero, menos pronunciada é a evolução temporal dos rebaixamentos. Isto vem destacar o efeito causado pela condutividade vertical. A relação entre a vida útil do poço e o fator de anisotropia (k_r / k_v) é aproximadamente linear e segue, para as condições especificadas pelos dados de entrada deste problema, a seguinte relação:

$$t = 0,0972 \cdot \left(\frac{k_r}{k_v} \right) + 0,00222 \quad \text{com } [t] = \text{meses} \quad (22)$$

Estimativa do comprimento do filtro

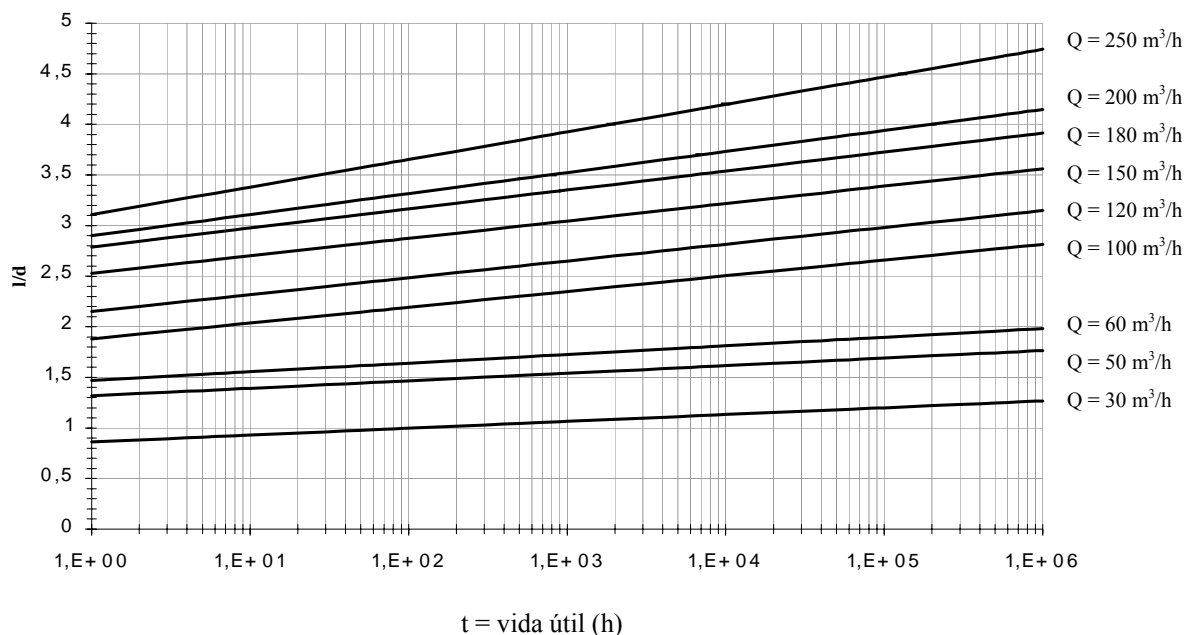
Esta simulação tem como objetivo prever a cota de base de um filtro (l), para uma vida útil previamente requerida, diante de vários cenários de vazão. Convém salientar que, neste caso, a base do filtro (d) é mantida constante, sendo seu comprimento ($l - d$) gradualmente elevado. Os dados utilizados na simulação foram:

- espessura (m) = 100 m;
- condutividade hidráulica radial (k_r) = 0,1 m/h;

- condutividade hidráulica vertical (k_v) = 0,01 m/h;
- armazenamento elástico do aquífero (S) = 10^{-4} ;
- rendimento específico do aquífero (S_y) = 0,25;
- distância entre o topo do filtro e o topo do aquífero (d) = 10 m.

O *Gráfico 3* ilustra os resultados obtidos:

Gráfico 3 . Estimativa da penetração da seção filtrante do poço para diferentes cenários de vazão



Os resultados desta simulação demonstram que pequenos acréscimos na profundidade do filtro permitem ampliar significativamente a vida útil do poço. Isto pode ser explicado pelo efeito de um bombeamento contínuo, o qual gera rebaixamentos sempre crescentes no poço e na sua vizinhança. Esses rebaixamentos são, contudo, mais acentuados nos primeiros instantes de bombeamento, sofrendo uma atenuação com o tempo, até chegarem a valores que praticamente não mais se alteram. Isto vem salientar a importância do comprimento do filtro e da penetração da bomba, de forma a evitar a exaustão do poço por rebaixamentos excessivos. As curvas traçadas no *Gráfico 3* constituem uma interessante ferramenta na escolha do comprimento do filtro para uma determinada vazão requerida.

Efeitos de poços interferentes

Todas as simulações conduzidas até aqui consideraram o efeito do bombeamento de um único poço. Diante da crescente exploração dos mananciais subterrâneos, a densidade de poços já pode ser considerada bastante elevada em zonas urbanas e industriais, destacando a importância de se avaliar

o comportamento de sistemas de poços. Este estudo geralmente leva em conta a teoria da superposição de efeitos. Por esta teoria, o rebaixamento total num determinado ponto pode ser obtido pela soma dos rebaixamentos individuais causados por cada poço do sistema.

Os poços utilizados nesta simulação estão situados numa região não confinada do aquífero Guarani (sistema Botucatu-Pirambóia) no município de Ribeirão Preto. Ao sistema já existente foram adicionados mais três poços hipotéticos, permitindo verificar uma aceleração dos rebaixamentos causados pela introdução de novos pontos de extração. A *Tabela 1* resume os dados principais dos poços utilizados nesta estimativa (CONTIN NETO, 1996).

Tabela 1 . Dados do sistema de poços

poço	coordenadas UTM (m)		cotas dos filtros (m)		Q (m ³ /h)	início da operação	níveis dinâmicos iniciais
	x	y	topo	base			data: 01/01/1996
145	208890	7662660	401,55	329,95	200,25	15/03/92	466,61
103	208670	7660840	414,12	314,68	167	15/01/81	447,39
125	210850	7661500	436,81	347,27	124,62	30/03/87	459,44
106	209530	7660000	406,01	354,96	81,78	01/06/86	461,3
141	210250	7659860	425,7	355,7	169,48	07/06/91	452,9
100	209690	7658750	421,74	353,21	50	28/06/70	430,9
133	212500	7658070	440	338	346,5	15/08/89	468,63
1	210000	7660500	420	400	200	01/01/03	458
2	209900	7660000	415	390	200	01/01/07	457
3	209800	7660200	430	415	50	01/01/03	459

Na *Tabela 1*, os poços em negrito correspondem àqueles que serão adicionados ao sistema. Convém reparar que estes poços apresentam uma pequena extensão da seção filtrante, sendo, pois, susceptíveis a apresentarem rebaixamentos críticos. Os valores dos níveis dinâmicos iniciais foram retirados de simulações encontradas na literatura (ALAMY FILHO, 2002). O *Gráfico 4* ilustra a superfície piezométrica na data inicial (01/01/1996) e a superfície de base do aquífero. Os cálculos foram conduzidos com auxílio do aplicativo desenvolvido por ALAMY FILHO (2002). Os resultados das simulações são apresentados pela *Tabela 2*.

Gráfico 4 . Superfície piezométrica inicial e superfície de base do aquífero

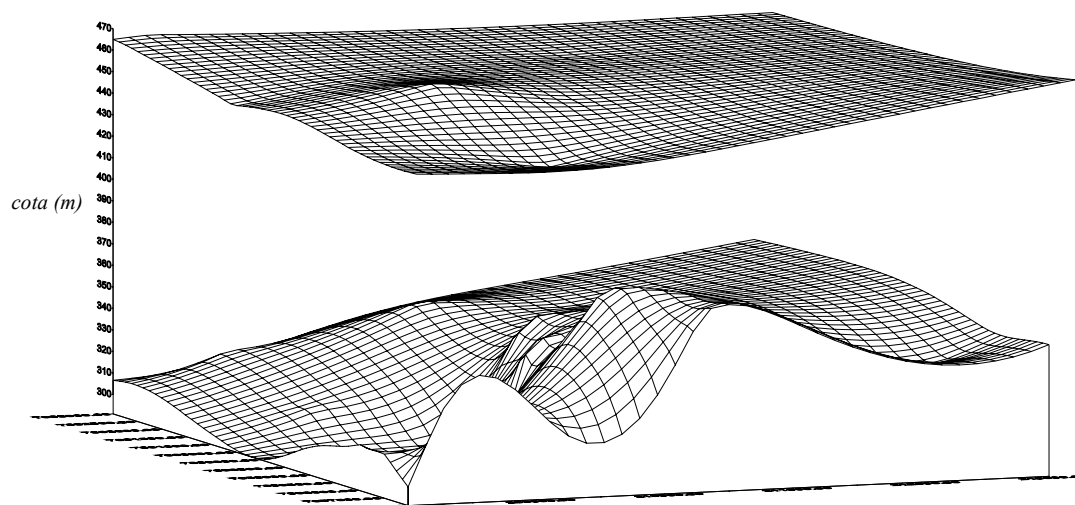


Tabela 2 . Níveis dinâmicos calculados

Poços	Níveis Dinâmicos Simulados (m)												
	01/01/96	01/01/97	01/01/99	01/01/03	01/01/04	01/01/05	01/01/07	01/01/08	01/01/09	01/01/10	01/01/15	01/01/20	01/01/25
145	466,61	466,01	465,00	463,36	462,91	462,48	461,54	460,61	459,71	459,33	457,59	456,17	454,96
108	447,39	446,79	445,70	443,88	443,12	442,25	440,77	439,21	437,45	436,69	435,11	433,30	432,13
125	459,44	458,82	457,70	455,80	455,03	454,15	452,64	451,13	449,51	449,04	447,38	445,77	444,37
106	461,30	460,65	459,48	457,52	455,09	453,71	451,85	447,43	442,34	442,47	440,87	439,16	437,70
141	452,90	452,21	450,99	448,97	446,88	445,51	443,64	439,29	434,26	434,36	432,74	431,00	429,53
100	430,90	430,33	429,29	427,49	426,88	426,18	424,86	423,27	421,33	420,61	418,38	416,68	415,26
133	468,63	468,08	467,10	465,48	465,05	464,69	463,95	463,20	462,43	462,08	460,24	458,77	457,54
1	458,00	457,31	456,07	454,04	430,71	409,08	407,09	403,54	399,38	440,43	439,17	437,47	436,00
2	457,00	456,32	455,11	453,11	449,68	448,17	446,25	430,14	408,53	409,29	407,78	406,06	404,59
3	459,00	458,32	457,10	455,09	440,24	438,64	436,66	430,75	424,10	425,76	424,38	422,67	421,20

Os Gráficos de 5 a 10 ilustram a variação temporal dos rebaixamentos no setor analisado.

Gráfico 5. Níveis dinâmicos em 01/01/1996

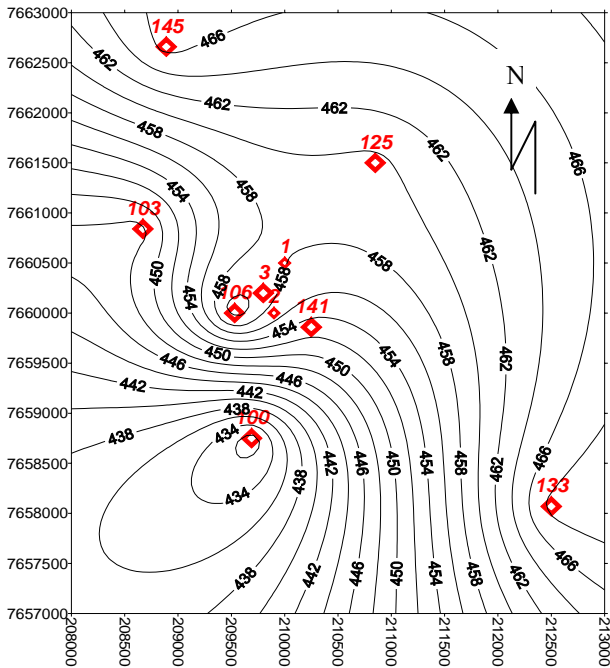


Gráfico 6. Níveis dinâmicos em 01/01/2003

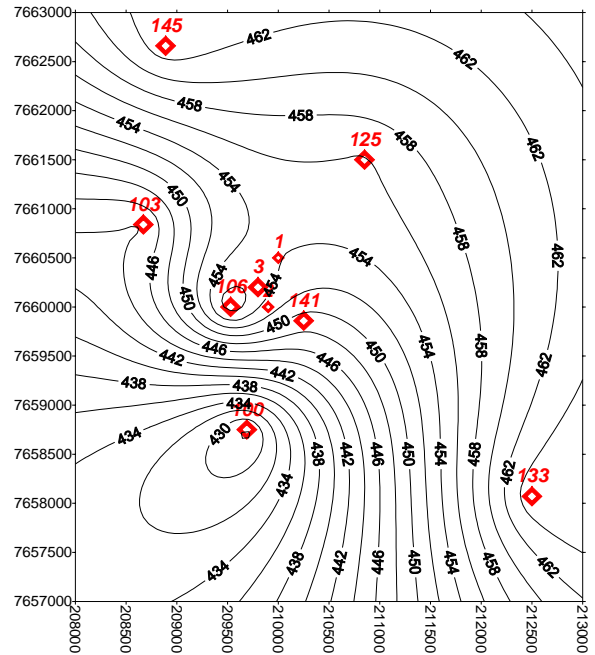


Gráfico 7. Níveis dinâmicos em 01/01/2009

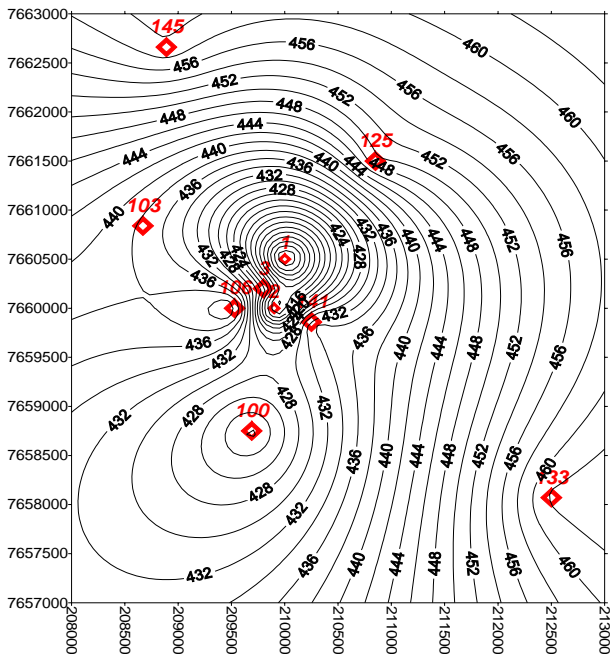


Gráfico 8. Níveis dinâmicos em 01/01/2025

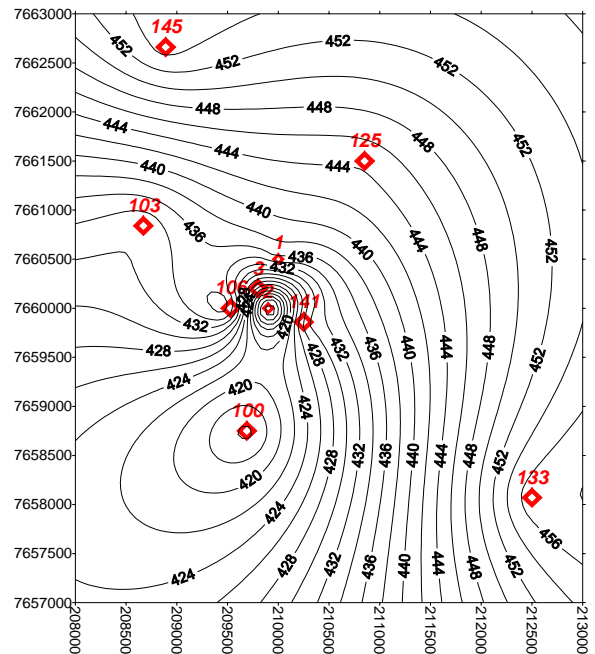


Gráfico 9 . Variação da superfície piezométrica do aquífero no período de simulação (1996 a 2025)

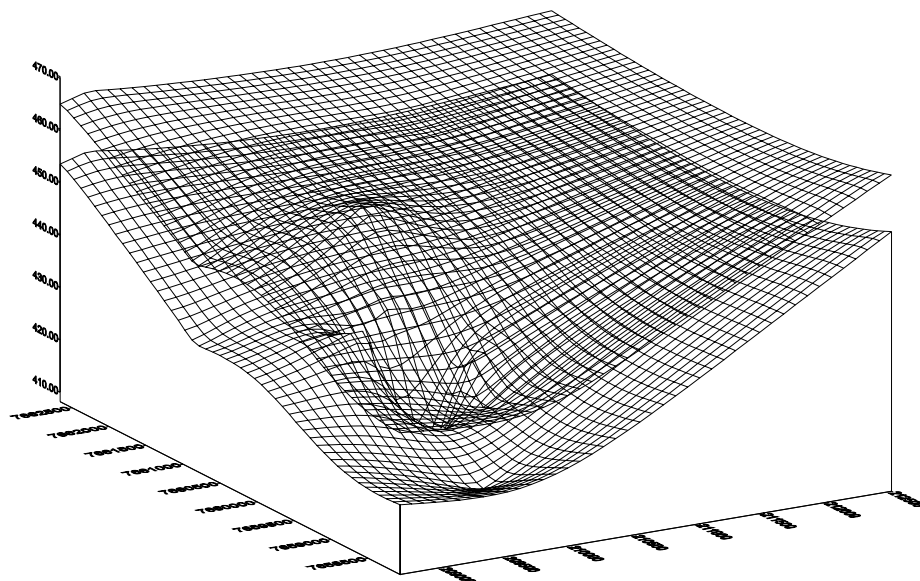
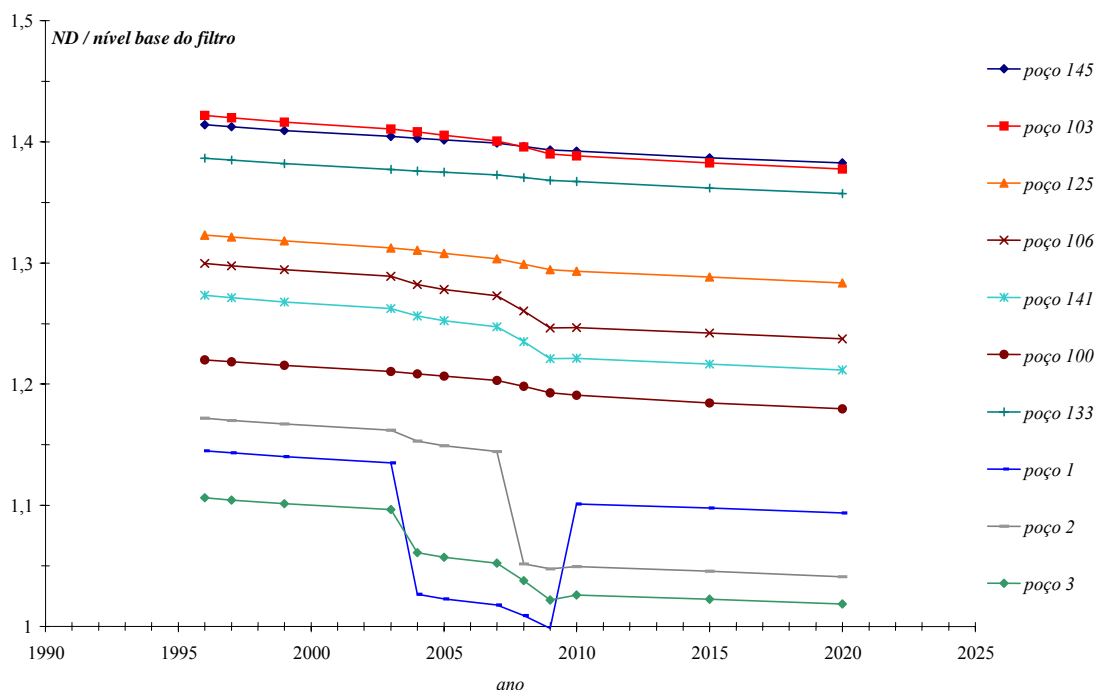


Gráfico 10 . Relação entre os níveis dinâmicos e a cota de base dos filtros e sua evolução temporal



A análise dos Gráficos 5 a 10 permite verificar os efeitos causados pelo acréscimo de novos poços num sistema que apresentava um quadro aproximado de equilíbrio. É interessante comentar que, como os poços introduzidos ao sistema original apresentam pequenas penetrações das seções

filtrantes, além de estarem bastante próximos, foram os principais prejudicados, uma vez que sofreram rebaixamentos maiores. Note-se que os poços originais, por apresentarem maiores extensões de filtro, praticamente não tiveram sua vida útil afetada.

De todos os poços do setor, apenas o *poço 1* sofreu exaustão por rebaixamentos excessivos (ver *Gráfico 10*). Após a inutilização desse poço, percebe-se uma recuperação dos níveis dinâmicos na sua vizinhança, uma vez que houve uma interrupção de bombeamento. Este comportamento contribuiu para aumentar ligeiramente a vida útil dos *poços 2 e 3*. Todavia, a introdução de novos pontos de bombeamento num sistema já em funcionamento contribui para acelerar os rebaixamentos no setor, reduzindo a vida útil dos poços vizinhos.

CONCLUSÕES

Embora a modelagem de escoamentos subterrâneos seja nitidamente dominada por métodos numéricos de solução, os modelos analíticos constituem uma importante e poderosa ferramenta que não pode ser desprezada. As soluções desses modelos geralmente apresentam continuidade no domínio espacial estudado, evitando a necessidade de discretização das equações. As representações de singularidades e contornos do aquífero por funções analíticas (Método dos Elementos Analíticos e Método das Funções de Poços com acoplamento à teoria das imagens) via de regra, apresentam menor custo computacional em relação aos modelos numéricos. Fatores como estes destacam sua capacidade preditiva.

A previsão de problemas de cavitação e conseqüente desativação do poço é uma alternativa interessante que pode ser matematicamente avaliada pelo procedimento descrito neste trabalho. Esta situação é comum em poços de penetração reduzida em aquíferos livres e de baixa transmissividade. Nesses casos os rebaixamentos podem ser bastante significativos, inutilizando o poço em prazos curtos. Este fato destaca a conveniência de se construir poços mais profundos que aproveitem melhor a espessura do aquífero. Em havendo restrições quanto ao comprimento do filtro, por questões econômicas ou de qualidade da água, o modelo analítico permite estimar a vazão que pode ser continuamente extraída pelo poço para uma vida útil previamente estipulada. Outra alternativa consiste no estudo de poços interferentes, circunstância cada vez mais comum em áreas densamente povoadas, industriais ou bateria de poços. Assim, pode ser quantificado o efeito da introdução de novos poços num sistema já operante. Conforme demonstrado pelas simulações apresentadas, o modelo analítico descrito pelas *Equações (2) e (21)* permite combinar vários cenários, constituindo uma ferramenta útil no fornecimento de diretrizes acerca da operação e perfuração de poços tubulares para abastecimento de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAMY FILHO, J. E. Determinação de rebaixamentos em sistemas de poços tubulares através da construção e aplicação de programa específico, *Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, Dissertação (mestrado), São Carlos, 2002.
- CONTIN NETO, D. Relatório Técnico do Projeto de Gestão da Quantidade de Águas Subterrâneas – Resultados. *FIPAI*, São Carlos, 1996.
- KRUSEMAN, G.P.; N. A. DE RIDDER Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, *International Institute for Land Reclamation and Improvement*, Wageningen, The Netherlands, 1990.
- NEUMAN, S.P. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water Resources Research*, v.10, n.2, p. 303-312, 1974.