

MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA CURVA DO REBAIXAMENTO DO CONE DE DEPRESSÃO EM AQÜÍFEROS FREÁTICOS

Paulo Roberto Garcia¹ & Antonio Carlos Zuffo²

Resumo - A representação matemática das curvas de depressão em lençóis freáticos bem como de seus raios de influência é de suma importância nas atividades humanas que envolvem água no sub-solo. Essas atividades podem ser de naturezas diversas, tais como: drenagem subterrânea, rebaixamento de nível d'água em obras de engenharia, exploração de água subterrânea para abastecimento, entre outras. O conhecimento desses equacionamentos facilita o gerenciamento em canteiros de obras, economizando tempo e dinheiro. As equações existentes são, em sua maioria, deduções empíricas e não muito práticas para aplicação in situ. Este trabalho propõe três modelos representativos dessas equações fundamentados na experiência profissional, na modelagem matemática, no cálculo integral e diferencial e em apenas um teste de bombeamento. Nos três tipos de equações propostos, os parâmetros dos aquíferos são diretamente considerados mas, não explicitados; tais equações possibilitam a determinação dessas curvas tanto no regime permanente quanto no transitório. O processo de análise e conclusões baseia-se em regressões não lineares, ajustando-se uma função representativa em um modelo que considera as condições de contorno e as perdas que aparecem no sistema. A análise dos dados dos testes de bombeamentos realizados com aqueles obtidos pelos modelos existentes evidenciou tanto a praticidade quanto a simplicidade dos modelos propostos.

Abstract - The mathematical representation of the depression curves in free groundwater table as well as their respective influence rays is very important to the human activities that involve groundwater and sub-soil works. Those activities originate from several sorts, such as: underground drainage, lowering of water level, groundwater exploration, among others. The Knowledge of those mathematical representations facilitates the management of building sites, saving time and money. The existent equations are, in their majority, empiric deductions and their application are not practical "in situ". This work proposes three representative models of those equations based on the

¹ Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia do Triângulo Mineiro – FETM
38066-005 Uberaba, MG – Fone (34) 3312 xxxx – tmfg@terra.com.br

² Departamento de Recursos Hídricos – Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP
13083-970 Campinas, SP – Fone (19) 3788-2357 – zuffo@fec.unicamp.br

professional experience, mathematical modeling, integral and differential calculation and on a pumping test. In the proposed equations the aquifers parameters are directly considered but not expressed; such equations make possible the determination of those curves in the permanent and in the transitory regime. The analysis process and conclusions are based on no lineal regressions; being adjusted to representative function in a model that considers the outline conditions and the losses that appear in the system. The data analysis of the pumping tests, accomplished with those obtained by the existent models, evidenced both practicality and simplicity of the proposed models.

Palavras-Chave - rebaixamento de aquíferos freáticos; cone de depressão; drenagem subterrânea.

INTRODUÇÃO

Na década de 70, o Brasil ficou marcado por grandes obras, tais como: a ponte Rio-Niterói, usina hidroelétrica de Itaipu, usina hidroelétrica de Paulo Afonso, o metrô do Rio de Janeiro, o de São Paulo, implantações de siderúrgicas, de mineradoras, acréscimo de subsolos nas edificações e outras obras. Nessa época, deu-se o início da utilização dos tirantes ancorados no solo, o que permitiu a estabilização dos maciços terrosos dessas grandes obras e, conseqüentemente, um aproveitamento melhor do subsolo, expandindo as construções subterrâneas, em função da redução dos custos e dos problemas causados pelos escoramentos convencionais. Estas obras de grande porte, sendo uma parcela enterrada, exigiram tecnologia mais apurada no rebaixamento do nível d'água com a proposta de trabalhar a seco. O estudo dos rebaixamentos torna-se complexo devido à interação entre várias ciências, impondo a conexão nas deduções de fórmulas e desprezando alguns fatores do meio físico a ser explorado.

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivos:

A aplicação de metodologias já utilizadas com sucesso em poços d'água, ou seja, técnicas de regressão não-linear de dados utilizando funções representativas com uma variável genérica dependente e uma variável genérica independente que representa a curva de rebaixamento do cone de depressão, por meio de modelações de equações, comparando-as com as fórmulas usuais de Sichardt e a de Schultze; Impor todos os parâmetros do aquífero freático, facilitando e simplificando os cálculos das alturas de rebaixamento do nível d'água e do raio de influência do lençol freático nos canteiros de obras, permitindo, desta forma, um melhor planejamento do

rebaixamento; Oferecer alternativas de modelos matemáticos de rebaixamento em função da quantidade de valores obtidos no campo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Histórico

O planejamento e o gerenciamento dos recursos de água subterrânea, bem como sua proteção, descontaminação e exploração, dependem da capacidade de quantificação dos fenômenos de fluxo e do transporte em sistemas aquíferos. A quantificação pode ser feita de várias maneiras, por medidas de campo ou por meio de modelação matemática. As abordagens realizadas, por meio de testes de bombeamentos medidos em campo, podem ser realizadas nas mais diversas condições, com vazão constante ou variável, na fase de bombeamento ou recuperação entre outras variações, sendo as mais diretas e precisas, mas devido aos altos custos ou à sua inaplicabilidade, elas são raramente utilizadas. Por outro lado, a representação artificial de uma realidade física pode ser realizada por meio de um modelo matemático. Os primeiros modelos em água subterrânea apareceram nos anos cinquenta e sessenta do século XX e eram predominantemente compostos por pequenas caixas de areia ou por placas paralelas de vidro, denominadas Hele-Shaw. Esses modelos físicos foram seguidos por modelos elétricos comparando a lei de Ohm para o fluxo elétrico, e a lei de Darcy para o fluxo de águas subterrâneas. Vários foram os modelos matemáticos desenvolvidos para representar os sistemas de aquíferos e os fenômenos de fluxo encontrados na natureza.

Hidráulica de poços

Projeto de rebaixamento

O projeto de um sistema de rebaixamento requer a determinação das dimensões do espaçamento e penetração dos poços ou ponteiras e a vazão da água a ser retirada do estrato permeável de forma a provocar o abaixamento do nível d'água requerido ou um certo alívio das pressões hidrostáticas. A dimensão e a capacidade dos tubos coletores e as bombas dependerão das vazões de descargas para os respectivos rebaixamentos. Portanto, é necessário estabelecer as relações fundamentais entre as descargas dos poços e das ponteiras e os correspondentes rebaixamentos produzidos nos estratos permeáveis em que eles penetram.

Cone de impressão e depressão de um aquífero freático e o cálculo do raio de influência

Existem obras em que o rebaixamento do lençol freático pode ser realizado por processos simples de captação de água e outros que exigem uma tecnologia mais apurada. Dentre estas tecnologias, tem-se: o bombeamento da água em um poço que provoca, progressivamente, o seu abaixamento até que o equilíbrio seja atingido. Esta região do espaço, que antes do bombeamento continha água, corresponde à área drenada, por meio de drenagem, é chamada de cone de depressão. Pode-se determinar esta região do espaço por meio de seus elementos tais como: a altura que equivale à diferença entre o nível estático e o nível dinâmico; a geratriz que é o novo nível equipotenciométrico; o raio da base maior que é o raio de influência e o raio da base menor que é o raio da tubulação para sucção da água. Na realidade, o nível da água no poço encontra-se abaixo do ponto final do cone, devido às perdas friccionais na entrada do filtro e no próprio poço que será ajustado nos modelos. A Figura 1 ilustra um caso ideal de um tronco de cone.

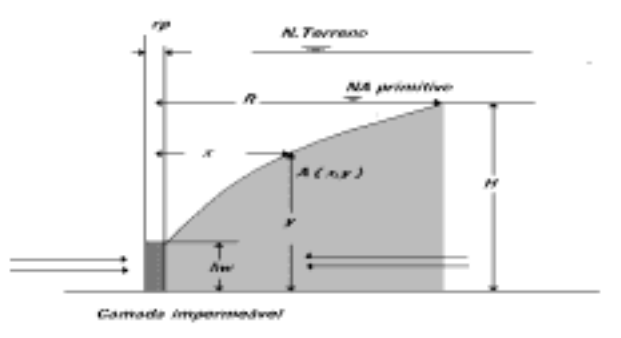


Figura 1 - Elementos básicos de um tronco de cone de depressão.

ESTUDO DO CASO

O município de Uberaba situa-se na microrregião do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gérias, com latitude Sul $19^{\circ}45'27''$ e longitude Oeste a $47^{\circ}57'36''$. A localização do município do ponto de vista geo-econômico é altamente estratégica em função da equidistância média de 500 Km, de Belo Horizonte, São Paulo, Brasília e Goiânia. Foi escolhido um local com área de 8.200 m², de fácil acesso, ficando próximo à rodovia MG-427 que liga Uberaba a Volta Grande.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na exploração

Para obras de engenharia que são realizadas abaixo da linha d'água de aquíferos freáticos é necessário definir a quantidade de água que deve ser retirada ou a que altura o lençol freático no poço deverá ser rebaixado para permitira realização dos trabalhos a seco. Neste caso, o regime de trabalho a ser buscado é o do regime de exploração. Fisicamente, a resposta a estes e a outros problemas similares são obtidos com o uso dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos, obtidos por meio de testes de bombeamento *in-loco*. Neste caso é necessário um planejamento para se definir uma diretriz específica em relação ao tipo de informação que se deseja obter e, portanto, especificar quais os equipamentos e aparelhos serão necessários.

A preparação do teste de rebaixamento pressupõe as seguintes condições: 1) Conhecer as características do poço e do tipo de aquífero captado; 2) Dispor do perfil técnico do poço e o perfil litológico atravessado pela perfuração; 3) Informações do sondador, tais como: a) presença de fraturas ou fendas; b) a variação do nível d'água ou c) perda d'água.

Para a abertura e construção de poços, utiliza-se, em geral, um dos seguintes métodos: Escavação direta; jato hidráulico; cravação; hidráulico-rotativo.

Neste trabalho, foram utilizados os métodos de escavação direta e jato hidráulico, pois o solo permitiu o uso desses equipamentos.

Sondagem e Cravação a Trado

Em função da experiência dos sondadores no trabalho de campo, aplicou-se o trado-cavadeira, até que o material começasse a desmoronar; daí por diante, usou-se o trado espiral até que se encontrou uma certa resistência à perfuração e daí por diante, o jato hidráulico.

Trado e Jato Hidráulico

Essa ferramenta com movimento de rotação abre um furo com 0,15 a 0,20m de diâmetro, trazendo para o exterior o material escavado. A ferramenta está ligada a um cabo de cerca de 1,50m permitindo, entretanto, emendar novas hastes suplementares, enroscando-as. O método do jato hidráulico é muito aplicável na construção de pequenos poços, assim como em perfurações para sondagens do subsolo. Em obras hidráulicas, também é utilizado para construção de baterias de poços destinados a forçar a depressão do lençol freático.

Medidores do nível d'água e disposição dos poços perfurados

Os poços de verificação foram dispostos em três ramos, formando entre si ângulos de 120°, conforme ilustrado na Figura 2, constituídos com um medidor no poço central e doze piezômetros nos poços testemunhos com o objetivo de medir o rebaixamento do lençol freático (Quadro A-1 e Quadro A-2-Anexo).

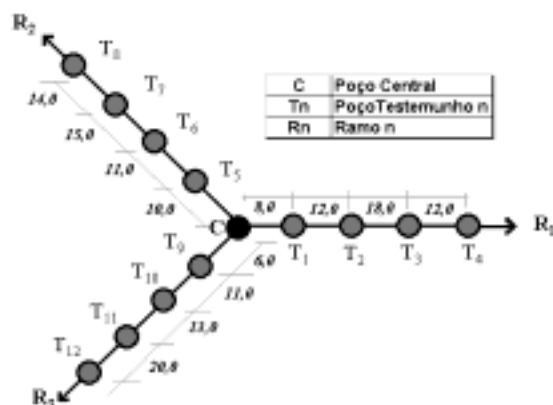


Figura 2 - Disposição em planta dos poços testemunhos e do central

Existem três modelos para a medição rotineira dos níveis d'água em poços a saber: 1) Medidor elétrico e tubo lateral para medição; 2) medidor pneumático e 3) piezômetros.

Os medidores utilizados neste trabalho foram do tipo elétrico modelo HS-30 da Hydrometric, nos poços testemunhos, e no central o piezômetro.

Medidor de vazão

As medidas das vazões durante os testes foram realizadas por hidrômetro, junto com um totalizador de horas.

Projeto de Rebaixamento.

Com o intuito de projetar um rebaixamento do lençol freático na área e este não apresentar resultados distorcidos, foi realizado um estudo preliminar para a verificação da influência de possíveis poços existentes e explorados por pequenos sítiantes da região.

Também é necessária uma investigação do local escolhido para a perfuração e para a identificação das principais características do poço. Foram utilizados os seguintes parâmetros: diâmetro do poço, profundidade, tipo de revestimento, bem como o tipo e características do filtro e dos materiais que o envolvem. Foram realizadas medidas de nível d'água e obtida a média dos níveis d'água nos poços perfurados.

A permeabilidade do solo foi obtida por dois procedimentos distintos: 1) foi realizado um ensaio *in-loco* de permeabilidade; 2) em laboratório foram analisadas quatro amostras indeformáveis, retiradas da área de estudo, nas quais foram realizados os testes de permeabilidade, por meio de permeômetros de carga constante além dos ensaios para o cálculo da porosidade e do índice de vazios.

Durante a investigação geotécnica, ocorreram dois tipos de aquíferos: o freático e o artesiano, sendo que o primeiro foi de interesse primordial neste trabalho. Visando a uma melhor avaliação do projeto de rebaixamento, foram programados dois ensaios de bombeamento em um poço central e doze poços testemunhos dispostos geometricamente e atendendo às necessidades de um possível estudo tridimensional, conforme apresentado na Figura 2.

No poço central, foi instalada uma bomba de recalque vertical, submersa a uma profundidade de 9,25 metros com capacidade de extração superior à vazão do poço e doze poços testemunhos onde foram feitos as leituras dos respectivos rebaixamentos. Como houve necessidade de um trabalho ininterrupto, instalou-se um conjunto moto-bomba que trabalhou durante todo o período de teste unido a um grupo gerador e a um hidrômetro que mediu as vazões que foram retiradas. A locação e as distâncias dos poços foram realizadas por uma equipe de topógrafos, locando e nivelando conforme características e obstáculos existentes no local.

Durante o teste, os dados foram grafados em papel monologarítmico. No eixo das ordenadas, os níveis d'água foram representados em uma escala aritmética enquanto que, no eixo das abscissas, o tempo de bombeamento foi representado em uma escala logarítmica (Método da linha reta – Jacobi). O gráfico resultante indicou quando houve uma estabilização ou quando se obteve uma tendência definida pelos pontos de rebaixamento-tempo que permitiram a finalização do teste.

Os modelos de bomba de recalque usados foram o 4RS e 4SD, respectivamente para Q_{w_1} e Q_{w_2} da empresa Leão S.A.

Ensaio Extras

Foi realizado *in loco*, o ensaio de infiltração conforme recomendações contidas no Boletim nº4 de junho de 1981, da ABGE.

RESULTADOS

O raio de influência depende dos parâmetros do aquífero, do processo de exploração, da vazão e do tempo de exploração. De posse desses valores, obteve-se as curvas representativas do tronco do cone de depressão para cada instante.

Na análise e ajustes de várias curvas e regressões não-lineares, chegou-se à conclusão de que, dentre essas, destacaram-se as equações do terceiro e segundo graus, além da exponencial. No entanto, em função do coeficiente angular da equação do segundo grau, optou-se pela sua inversão, justificado pelo seu decréscimo, aliado às condições de contorno e de um ajuste para cada modelo. As equações matemáticas desta forma são descritas nos modelos propostos a seguir.

Modelos propostos

Inversa da curva do 2º grau.

Dada uma equação do segundo grau com o gráfico simétrico ao eixo das ordenadas, calculando a inversa, tem-se:

$$x = ay^2 - ah_w^2 \quad (1)$$

Rearranjando a equação, obtêm-se

$$y = \sqrt{\frac{x + ah_w^2}{a}} \quad (2)$$

Analisando em função da curva representativa do rebaixamento, para as seguintes condições de contorno, tem-se:

- Condição de contorno 1:

se $x = 0$, tem-se correspondente $y = h_w$, substituindo em (2), obtêm-se:

$$y = \sqrt{\frac{ah_w^2}{a}}, \text{ logo } y = h_w \quad (3)$$

- Condição de contorno 2:

se $x=R$, temos $y = H$

$$H^2 = \left(\frac{R + ah_w^2}{a} \right)^2 \quad (4)$$

- Rearranjando, chega-se a:

$$a = \frac{R}{(H^2 - h_w^2)} \quad (5)$$

Substituindo em (2) o valor obtido em (5), tem-se:

$$y = \sqrt{\frac{x(H^2 - h_w^2) + Rh_w^2}{R}} \quad (6)$$

Devido às perdas friccionais na entrada do filtro e no próprio poço, a fórmula (6) foi acrescida de um coeficiente de aproximação y_1 , determinado por processos de aproximação, conclui-se que para qualquer valor de r , é possível calcular o valor da altura de rebaixamento por meio de uma aproximação da equação:

$$y = \sqrt{\frac{x(H^2 - h_w^2)}{R} + h_w^2} + \frac{(H - h_w) \left[1 - \left(\frac{h_w}{H} \right)^{2,2} \right]}{\left(1 + 5 \frac{r_w}{H} \right) \left[1 + 0,02Ln \left(\frac{x}{r_w} \right) \right]} \quad (7)$$

Modelação de uma curva do 3º grau.

Considerando uma equação do terceiro grau completa $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ (8) e, impondo as condições de passagem nos pontos, para as seguintes condições de contorno:

- Condição de contorno 1:

para $x=0$, tem-se $y = h_w$, substituindo em (8), obtêm-se:

$$y = a(0)^3 + b(0)^2 + c(0) + d$$

$$\text{logo} \quad d = h_w \quad (9)$$

- Condição de contorno 2:

fazendo $x = r_1$ implica em $y = h_1$, substituindo em (8) acrescido do valor de d , chega-se a:

$$h_1 = a(r_1)^3 + b(r_1)^2 + c(r_1) + h_w ,$$

rearranjando a equação torna-se:

$$a(r_1)^3 + b(r_1)^2 + c(r_1) = h_1 - h_w \quad (10)$$

- Condição de contorno 3:

fazendo $x = R$, obtêm-se $y = H$, substituindo em (8) acrescido do valor de d , obtêm-se:

$$H = a(R)^3 + b(R)^2 + c(R) + h_w, \text{ trabalhando a equação, tem-se:}$$

$$a(R)^3 + b(R)^2 + c(R) = H - h_w \quad (11)$$

- Condição de contorno 4:

fazendo $x = R_1$ para qualquer $R_1 > R$ com a curva estabilizada, tem-se o valor de $y = H$, substituindo em (8) acrescido do valor de d , obtêm-se:

$$H = a(R_1)^3 + b(R_1)^2 + c(R_1) + h_w, \text{ trabalhando a equação, chega-se a:}$$

$$a(R_1)^3 + b(R_1)^2 + c(R_1) = H - h_w \quad (12)$$

$$\begin{cases} a(r_1)^3 + b(r_1)^2 + c(r_1) = h_1 - h_w \\ a(R_1)^3 + b(R_1)^2 + c(R_1) = H - h_w \\ a(R)^3 + b(R)^2 + c(R) = H - h_w \end{cases}$$

com essas quatro condições de contorno, pode-se montar um sistema linear.

Sendo que a condição de contorno 1, o valor de $d = h_w$

Resolvendo o sistema e substituindo os valores de a, b, c e d , mais às perdas friccionais na entrada do filtro e no próprio poço, a fórmula foi acrescida de um coeficiente de aproximação y_1 , determinado por processos de aproximação, chegando-se a:

$$\begin{aligned}
y = & \frac{(h_1 - h_w)(R_1 R^2 - R R_1^2) + (H - h_w)[R_1^2 - r_1 R^2 + R_1^2 r_1 - R_1 r_1^2]}{R_1 R r_1 [R_1^2 + R_1^2 r_1 + R_1 R^2 - R R_1^2 - R_1 r_1^2 - R^2 r_1]} x^3 \\
& + \frac{(h_1 - h_w)(R R_1^3 - R_1 R^3) + (H - h_w)[r_1^3 R_1 + R^3 r_1 - R_1^3 r_1 - R r_1^3]}{R_1 R r_1 [R_1^2 + R_1^2 r_1 + R_1 R^2 - R R_1^2 - R_1 r_1^2 - R^2 r_1]} x^2 + \\
& \frac{(h_1 - h_w)(R_1^2 R^3 - R^2 R_1^3) + (H - h_w)[r_1^3 R^2 + R_1^3 r_1^2 - R_1^2 r_1^3 - r_1^2 R^3]}{R_1 R r_1 [R_1^2 + R_1^2 r_1 + R_1 R^2 - R R_1^2 - R_1 r_1^2 - R^2 r_1]} + h_w \\
& + \frac{(H - h_w) \left[1 - \left(\frac{h_w}{H} \right)^{2,4} \right]}{\left(1 + 5 \frac{r_w}{H} \right) \left[1 + 0,02 \text{Ln} \left(\frac{r}{r_w} \right) \right]} \quad (13)
\end{aligned}$$

Modelação de uma curva exponencial.

Impondo uma fórmula geral exponencial, obtém-se:

$$y = A.e^{(Cx+D)} = A.e^{Cx} . e^D \quad (14)$$

Quando $x = 0$, tem-se $y = h_w$, logo $h_w = A.e^D$, quando $x = R$, tem-se $y = H$, substituindo em (14), conclui-se que :

$$H = A.e^D . e^{Cx} = h_w . e^{Cx} \quad (15)$$

$$\frac{H}{h_w} = e^{CR}, \quad \text{logo: } \text{Ln}H - \text{Ln}h_w = CR \quad (16)$$

Isolando o valor de C, obtém-se: $C = \frac{\text{Ln}H - \text{Ln}h_w}{R}$, substituindo em (14), chega-se a:

$$y = h_w . e^{\frac{\text{Ln}H - \text{Ln}h_w}{R} . x} \quad (17)$$

Devido às perdas friccionais na entrada do filtro e no próprio poço, a fórmula foi acrescida de um coeficiente de aproximação y_1 , determinado por processos de aproximação, acrescentando na fórmula o valor y_1 , chega-se a:

$$y = h_w \cdot e^{\frac{\ln H - \ln h_w}{R} \cdot x} + \frac{(H - h_w) \left[1 - \left(\frac{h_w}{H} \right)^{2,4} \right]}{\left(1 + 5 \frac{r_w}{H} \right) \left[1 + 0,02 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) \right]} \quad (18)$$

Validade dos modelos das equações e comparações com as fórmulas de Schultz e Sichardt no ensaio de bombeamento.

Os testes das fórmulas modeladas foram realizados aleatoriamente, independentes do sistema de aquífero e de bombeamento estarem no regime transitório ou permanente.

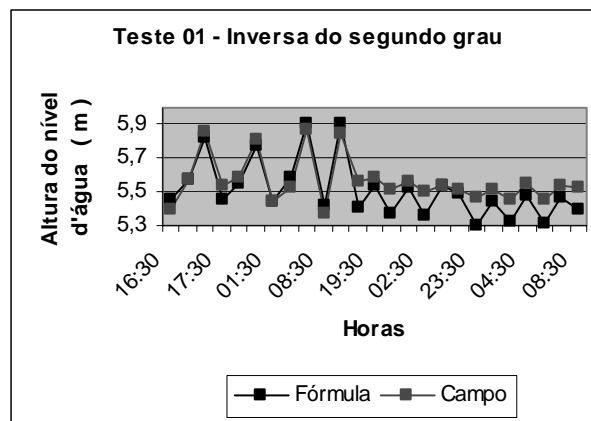


Figura 6.1- Teste da inversa do segundo grau.

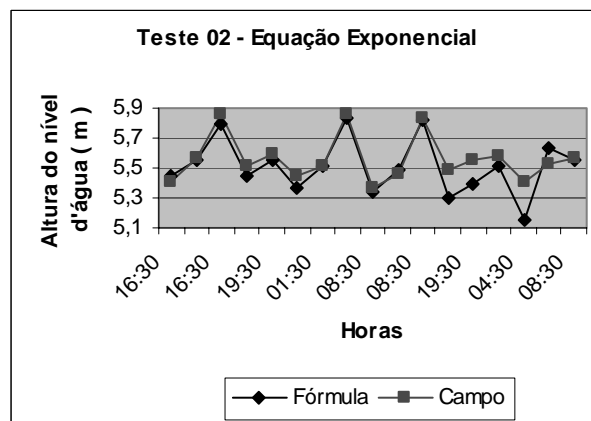


Figura 6.2- Teste da equação exponencial.

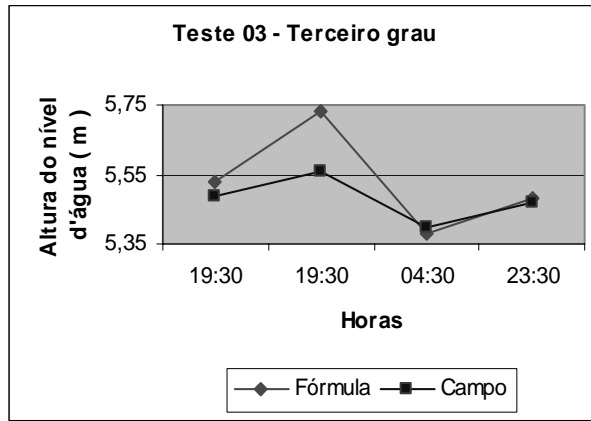


Figura 6.3-Teste da equação do terceiro grau.

Valores calculados (m) - Teste 01					
Leituras	Inversa da equação do 2°	Equação do 3°	Equação Exponencial	Schultze	Sichardt
36,00 (raio)	36,00	36,00	36,00	21,40	38,80
5,84 (altura)	5,92	5,86	5,83		
Diferença	0,08	0,02	0,01		2,80

Figura 6.4- Comparações entre as fórmulas teste 01

Leituras	Inversa da equação do 2°	Equação do 3°	Equação Exponencial	Schultze	Sichardt
18,00 (raio)	18,00		18,00		22,80
5,52 (altura)	5,59	5,57	5,51		
Diferença	0,07	0,05	0,01	0,20	4,70

Figura 6.5- Comparações entre as fórmulas.

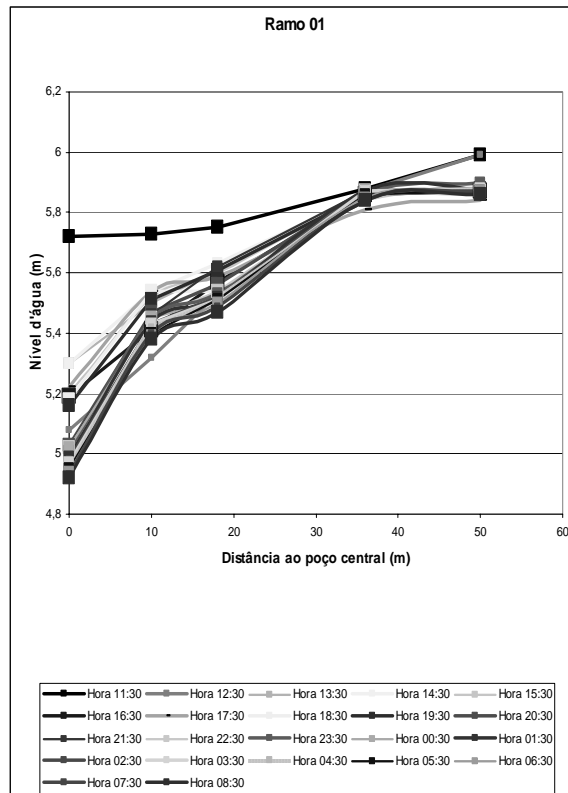


Figura 6.6 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 01, vazão Q_{w1} .

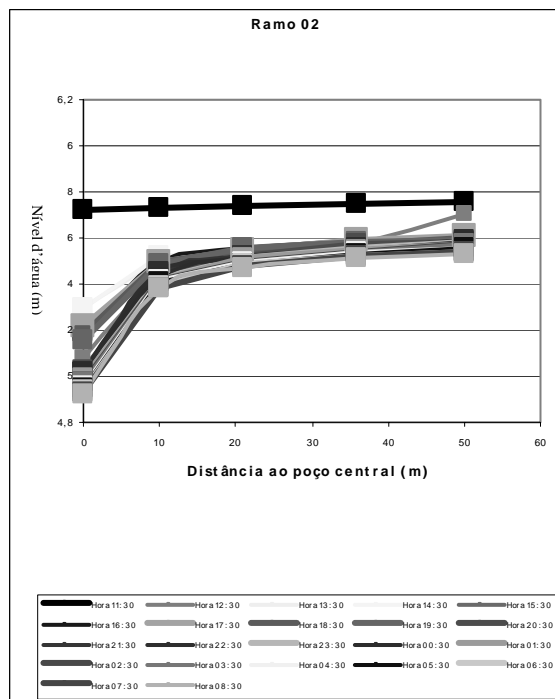


Figura 6.7 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 02, vazão Q_{w1} .

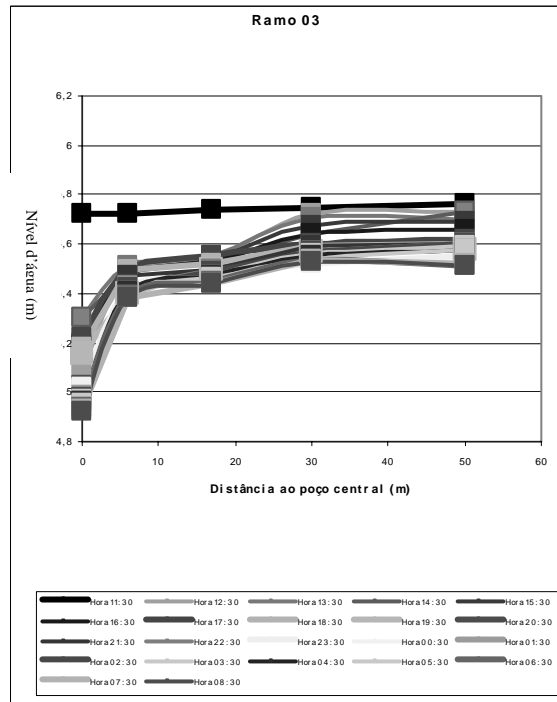


Figura 6.8 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 03 , vazão Q_{w_1}

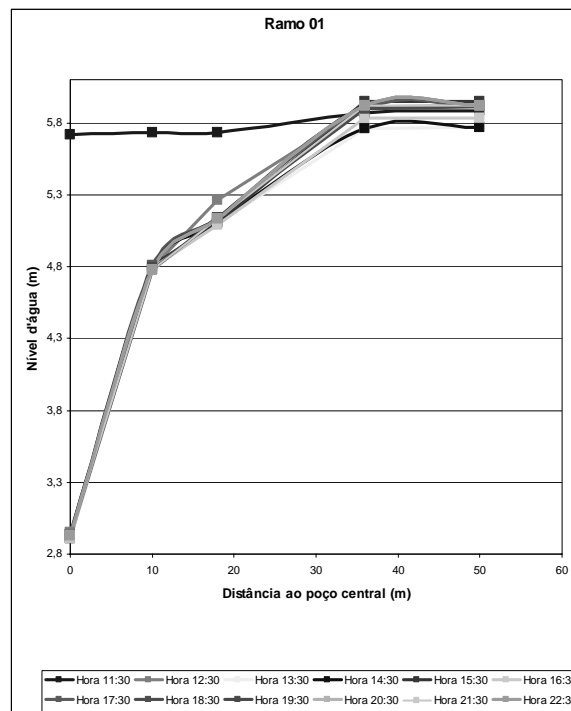


Figura 6.9 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 01, vazão Q_{w_2} .

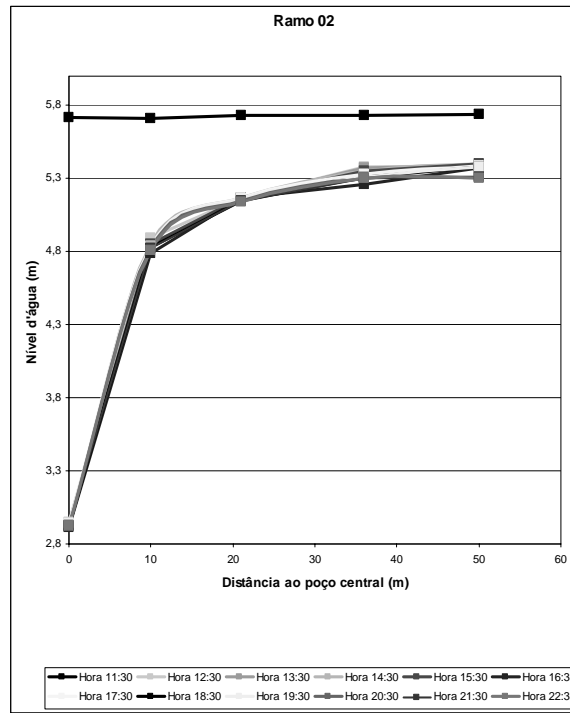


Figura 6.10 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 02, vazão Q_{w_2} .

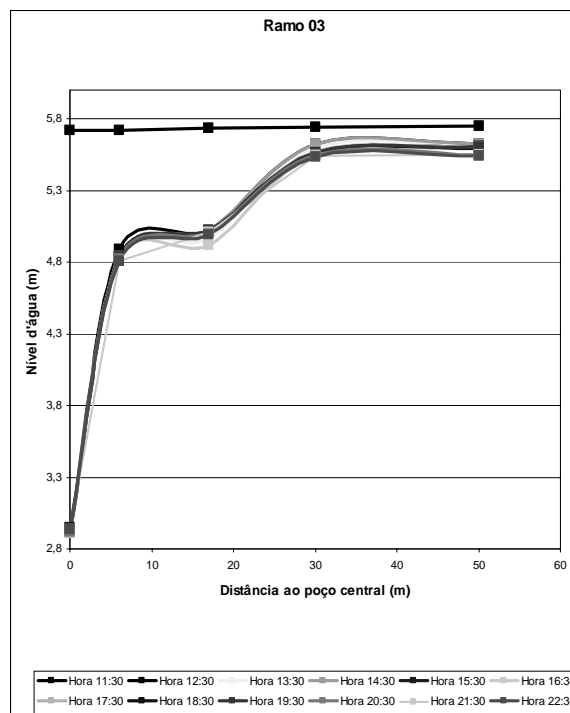


Figura 6.11 - Rebaixamento do nível d'água nos poços testemunhos cujas leituras foram realizadas por piezômetros, no Ramo 03, vazão Q_{w_2} .

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões

O estudo do rebaixamento do lençol freático se deu por meio de um bombeamento de um poço central com leituras piezométricas em seus poços testemunhos, no campo, procurando uma adequação para formulação da curva do cone de depressão, assim como o cálculo do raio de influência, impondo condições de contorno e estabelecendo parâmetros reais para sua determinação.

A proposta inicial trabalhou com o ajuste destas curvas impondo parâmetros retirados do campo, como os índices físicos do solo e as propriedades físicas do aquífero, no entanto, apenas com leituras piezométricas, conseguiu-se formular equações representativas da curva do cone, satisfazendo todos os cálculos de verificação. As diferenças concebidas foram mínimas, desprezíveis em relação às leituras de campo, o que traz ganho de tempo e praticidade na aplicação e na execução de obras de rebaixamento de lençóis freáticos. Com um mínimo de leituras piezométricas no campo, descritos anteriormente, é possível a determinação da curva do cone de depressão e do raio de influência tanto no regime permanente como no regime transitório, sem a necessidade da determinação dos demais parâmetros do aquífero.

No ajuste da equação do segundo grau, em função da análise do coeficiente angular do cone de depressão, optou-se pela sua inversão, obtendo-se, desta forma, valores mais próximos dos valores de campo. Na equação do 3º grau, obtiveram-se valores com 100% de aproximação em relação aos de campo, mas, fisicamente, ela apresenta em alguns instantes, um erro conceitual em relação à curvatura do cone de depressão que possui coeficiente angular positivo implicando em uma função sempre crescente. A curvatura da equação do 3º grau apresenta pontos de inflexão, e em determinadas situações, pontos de máximo e mínimo fora do ponto inicial e final da curvatura, não justificando fisicamente. Mesmo com essa avaliação física, pode-se usufruir de seus valores. Na exponencial, os valores distanciam-se um pouco dos de campo para raios de grandes valores, no entanto, com sucesso no objetivo deste trabalho.

Os equacionamentos propostos são básicos e podem se adaptar às situações reais, com maior ou menor grau de aprovação, em função das condições teóricas e das hipóteses formuladas, podendo realizar-se interpolações e extrapolações.

Na fórmula usual, Sichardt recomenda o valor de um coeficiente multiplicativo c igual a 0,30 e para linhas de poços ou ponteiras, há recomendações que situam c entre 1,5 e 2,0. Naturalmente essas aproximações são grosseiras e devem servir apenas como orientação inicial, uma vez que as hipóteses que mais se afastam da realidade são as que podem introduzir os maiores erros e que estão relacionadas com a homogeneidade e a isotropia admitidas. Por isso, exige-se uma

certa experiência ao tratar do problema. Na fórmula de Schultze, os parâmetros usados são mínimos, obtendo valores um pouco distantes do da fórmula de Sichardt.

Recomendações

Este trabalho propôs três modelos de equações para a determinação da altura do rebaixamento e do raio de influência para aquíferos freáticos baseados nos dados de apenas um poço.

Recomenda-se em estudos futuros, a aplicação desta metodologia para a verificação de sua aplicabilidade a outros poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]-ALONSO, U. R. - Rebaixamento Temporário de Aquíferos – p. 130 - Patrocinado pelas empresas Tecnogeo e Geofix 1999.
- [2]-BOLTON, N. S.: “The drawdown of the Watertable Under Non-Steady Conditions Near a Pumped Well in an Inconfined Formation”, Proc. Inst. Civil Engrs., v.3, p. 564 - 579, 1954.
- [3]-CHOW, V.T., On the de Termination of Transmissibility and Storage Coefficients from Pumping Test. Data, Trans. Amer. Geophysical Union, vol. 33 p. 397 - 404, 1952.
- [4]-CLEARY, R. In Ramos, F. et al – Engenharia Hidrológica - Rio de Janeiro: ABRH – Editora UFRJ 1989.
- [5]-EDWARD JOHNSON, INC – El Agua Subterránea Y Los Pozos - Libro de referência dedicado a la industria de los pozos de água – Primeira Edição – 1975 – Publicado por: Johnson Division, Cop Inc. - Saint Paul, Minhesota 55165.
- [6]-JACOB C. E.-Flow of Groundwater, in Engineering Hydraulics-(H.Rouse, ed.) John Wiley, and Sons, New York, p. 321 - 386, 1950.
- [7]-TODD, D. K., Ground Water Hydrology, Copyright John Wiley & Sons, Inc., Nova York, 1959.

ANEXOS

Quadro A-1 Vazões e alturas piezométricas no poço central e nos testemunhos,
primeiro bloco (Vazão Q_w).

DIA	Qw	H em m a partir do topo da camada de argila siltosa pouco arenosa												
Hora	m ³ /h	Poço	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ05	PZ06	PZ07	PZ08	PZ09	PZ10	PZ11	PZ12
11:30	0,00	5,72	5,73	5,74	5,87	5,99	5,73	5,74	5,74	5,75	5,72	5,73	5,74	5,75
12:30	4,12	5,08	5,32	5,53	5,86	5,99	5,41	5,46	5,56	5,69	5,48	5,54	5,71	5,73
13:30	3,62	5,20	5,49	5,61	5,86	5,87	5,48	5,54	5,58	5,60	5,50	5,54	5,70	5,69
14:30	3,02	5,30	5,54	5,63	5,85	5,87	5,52	5,55	5,58	5,59	5,48	5,52	5,63	5,72
15:30	3,11	5,19	5,52	5,59	5,84	5,85	5,44	5,54	5,55	5,59	5,46	5,54	5,67	5,68
16:30	2,75	5,19	5,40	5,57	5,86	5,86	5,49	5,55	5,59	5,60	5,48	5,53	5,63	5,65
17:30	2,74	5,22	5,54	5,59	5,81	5,83	5,50	5,55	5,59	5,61	5,50	5,54	5,59	5,62
18:30	2,47	5,18	5,54	5,54	5,86	5,88	5,50	5,55	5,56	5,59	5,49	5,52	5,58	5,60
19:30	2,43	5,15	5,51	5,60	5,86	5,87	5,49	5,56	5,58	5,59	5,39	5,50	5,57	5,58
20:30	3,43	5,02	5,46	5,55	5,86	5,87	5,44	5,51	5,56	5,57	5,43	5,50	5,57	5,59
21:30	2,94	5,02	5,45	5,61	5,86	5,87	5,43	5,52	5,54	5,56	5,43	5,50	5,58	5,60
22:30	4,54	5,02	5,45	5,53	5,86	5,87	5,44	5,48	5,56	5,58	5,43	5,49	5,54	5,59
23:30	3,84	5,01	5,44	5,53	5,86	5,90	5,43	5,51	5,55	5,58	5,42	5,47	5,51	5,54
00:30	3,65	5,01	5,44	5,51	5,86	5,87	5,42	5,50	5,55	5,57	5,42	5,46	5,56	5,58
01:30	4,32	4,98	5,44	5,52	5,86	5,87	5,42	5,51	5,55	5,57	5,42	5,46	5,56	5,59
02:30	4,12	4,97	5,43	5,51	5,86	5,88	5,42	5,50	5,54	5,57	5,42	5,48	5,56	5,59
03:30	2,51	4,97	5,43	5,51	5,86	5,87	5,42	5,49	5,54	5,56	5,41	5,47	5,56	5,58
04:30	5,13	4,96	5,42	5,51	5,85	5,87	5,42	5,49	5,53	5,56	5,40	5,46	5,55	5,58
05:30	3,79	4,95	5,40	5,51	5,85	5,87	5,40	5,49	5,53	5,55	5,39	5,46	5,54	5,57
06:30	4,43	4,93	5,38	5,50	5,84	5,87	5,39	5,48	5,52	5,54	5,38	5,45	5,54	5,51
07:30	3,79	4,92	5,39	5,48	5,84	5,86	5,38	5,47	5,52	5,53	5,38	5,44	5,54	5,51
08:30	3,78	4,92	5,37	5,46	5,84	5,86	5,37	5,47	5,51	5,52	5,38	5,43	5,53	5,50

Quadro A-2 Vazões e alturas piezométricas no poço central e nos testemunhos,
primeiro bloco (Vazão Q_{w_2}).

DIA	Qw	H em m a partir do topo da camada de argila siltosa pouco arenosa												
Hora	m ³ /h	Poço	PZ01	PZ02	PZ03	PZ04	PZ05	PZ06	PZ07	PZ08	PZ09	PZ10	PZ11	PZ12
11:30	0,00	5,72	5,73	5,73	5,87	5,88	5,71	5,73	5,73	5,74	5,72	5,73	5,74	5,75
12:30	14,23	5,95	4,79	5,26	5,91	5,92	4,89	5,17	5,38	5,39	4,89	5,02	5,62	5,62
13:30	12,24	5,94	4,78	5,10	5,76	5,77	4,85	5,17	5,37	5,39	4,84	4,96	5,60	5,61
14:30	13,51	5,91	4,81	5,14	5,84	5,84	4,85	5,17	5,35	5,40	4,84	5,02	5,62	5,62
15:30	12,11	5,92	4,81	5,10	5,95	5,95	4,85	5,17	5,35	5,40	4,83	5,00	5,55	5,61
16:30	11,91	5,91	4,79	5,09	5,83	5,83	4,79	5,17	5,26	5,37	4,82	4,92	5,55	5,59
17:30	12,11	5,94	4,81	5,14	5,90	5,92	4,84	5,17	5,33	5,39	4,84	5,02	5,57	5,60
18:30	12,02	5,93	4,78	5,14	5,90	5,91	4,83	5,15	5,31	5,38	4,83	5,01	5,56	5,59
19:30	12,06	5,94	4,79	5,14	5,92	5,93	4,83	5,16	5,31	5,38	4,84	5,02	5,56	5,60
20:30	11,82	5,92	4,78	5,13	5,92	5,92	4,82	5,15	5,30	5,31	4,82	5,01	5,55	5,55
21:30	11,69	5,93	4,78	5,13	5,92	5,92	4,82	5,15	5,30	5,31	4,81	5,01	5,54	5,55
22:30	11,60	5,93	4,78	5,13	5,92	5,92	4,81	5,14	5,30	5,30	4,81	4,99	5,53	5,54