

SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POÇOS ATRAVÉS DA CONSTRUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE PROGRAMA ANALÍTICO ESPECÍFICO

José Eduardo Alamy Filho¹ & Dante Contin Neto¹

Resumo – O aproveitamento das águas subterrâneas para abastecimento tem gerado setores com elevadas concentrações de poços tubulares. Essas concentrações aparecem geralmente nas regiões centrais das cidades ou em áreas de captação denominadas baterias de poços. A proximidade entre esses pontos de bombeamento acentua os problemas de interferências e intensifica os rebaixamentos da superfície piezométrica. Este trabalho discorre sobre a utilização de um programa computacional específico para o cálculo de rebaixamentos em sistemas de poços tubulares. Esse programa, construído em Visual Basic aplicado aos objetos do EXCEL 7.0, baseia-se nos modelos analíticos das funções integrais de poços (W) e na superposição de efeitos. A aplicação do programa na simulação de sistemas de bombeamento permite estimar a evolução temporal dos rebaixamentos, constituindo uma alternativa módica e interessante para tomadas de decisões quanto aos efeitos da introdução de novos poços no sistema.

Abstract – The use of groundwater for supply yields sectors with high well concentrations. These concentrations usually take place in downtown or in regions of water withdrawal called well systems. The nearness among pumping points brings interference problems and additional drawdowns of the piezometric surface. This paper relates an application of a computing program for simulation of well systems drawdowns. This program was built in Visual Basic language applied to EXCEL 7.0 objects and bases on the analytical models of well functions (W) and on the theory of superposition. The application of the program in pumping systems allows to estimate the drawdown increases with the time, being a cheap and interesting tool to decide about the drilling and operation of new wells in the actual system.

Palavras-chave – sistemas de poços; cálculo de rebaixamentos; funções de poços.

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

INTRODUÇÃO

A crescente exploração das águas subterrâneas, tanto por parte do poder público quanto por parte de setores privados, destaca a necessidade de ferramentas para tomadas de decisões referentes à perfuração de novos poços tubulares, de modo a evitar interferências significativas no sistema já existente e o esgotamento precoce dos mananciais. Diante disso, a utilização de modelos matemáticos, para avaliar o comportamento da superfície piezométrica diante de um campo de bombeamento e o escoamento das águas subterrâneas, permite avaliar formas de gerenciamento desse recurso.

Na prática, há disponibilidade de uma série de programas computacionais utilizados para estimar o escoamento das águas subterrâneas. A utilização de modelos numéricos tem demonstrado viabilidade na estimativa de escoamentos em grandes escalas de área. Contudo, quando se quer analisar regiões menores, os resultados desses modelos são, no mínimo, questionáveis, principalmente na avaliação dos rebaixamentos nos poços. Os modelos analíticos requerem dimensões uniformes para a camada aquífera. Assim, as variações na extensão do aquífero são convertidas de forma a se obter uma região uniforme equivalente. Da mesma forma, os contornos e descontinuidades são idealizados para se adaptarem a formas geométricas mais elementares. Apesar disso, métodos analíticos, como o modelo das funções integrais de poços (W), permitem avaliar, de uma maneira mais real, os rebaixamentos nos poços. Esse método também representa uma alternativa útil na estimativa do comportamento da superfície piezométrica em pequenas regiões, como baterias de poços, por exemplo.

FUNÇÕES INTEGRAIS DE POÇOS (W)

Os rebaixamentos calculados pelo programa são auferidos do método das funções de poços. Dessa forma, os valores de rebaixamentos causados por um poço num determinado ponto, representado por um poço de observação, são obtidos pela multiplicação da função de poço (W) por uma constante ($Q/4\pi T$), onde Q representa a vazão do poço e T a transmissividade do aquífero. Os modelos de funções são selecionados no programa de acordo com a situação de cada poço bombeado em relação ao meio aquífero. Assim, os modelos disponíveis são os seguintes:

- **Modelo 1** (THEIS, 1935) - aquífero confinado, isotrópico e poço totalmente penetrante:

$$W = \int_u^{\infty} \left(\frac{e^{-u}}{u} \right) du = W(u) \quad (1)$$

- **Modelo 2** (HANTUSH, 1964) – aquífero confinado, anisotrópico e poço parcialmente penetrante:

$$W = W(u) + \frac{2m^2}{\pi^2(l-d)(lo-do)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi l}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi d}{m} \right) \right] \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi lo}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi do}{m} \right) \right] \int_u^{\infty} \frac{e^{\left(-y - \frac{(n\pi x)^2}{4y} \right)}}{y} dy \quad (2)$$

- **Modelo 3** (HANTUSH e JACOB, 1955), (HUNT, 1983) – aquífero confinado, isotrópico, aquífero superposto e poço totalmente penetrante:

$$W = \int_u^{\infty} \left(\frac{1}{y} \right) \exp \left[-y - \frac{r^2}{4B^2 y} \right] dy = W(u, r/B) \quad (3)$$

- **Modelo 4** (HANTUSH, 1964) – aquífero confinado, anisotrópico, aquífero superposto e poço parcialmente penetrante:

$$W = W \left(u, \frac{r}{Br} \right) + \frac{2m^2}{\pi^2(l-d)(lo-do)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n^2} \right) \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi l}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi d}{m} \right) \right] \left[\text{sen} \left(\frac{n\pi lo}{m} \right) - \text{sen} \left(\frac{n\pi do}{m} \right) \right] \int_u^{\infty} \frac{e^{\left(\frac{-(r/Br)^2 + (n\pi x)^2}{4y} - y \right)}}{y} dy \quad (4)$$

- **Modelo 5** (NEUMAN, 1972,1973) – aquífero não confinado, anisotrópico e poço totalmente penetrante:

$$W = \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo(y\beta^{1/2}) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy \quad (5)$$

- **Modelo 6** (NEUMAN, 1974) – aquífero não confinado, anisotrópico e poço parcialmente penetrante:

$$W = \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo(y\beta^{1/2}) \cdot \left[uo(y) + \sum_{n=1}^{\infty} un(y) \right] dy \quad (6)$$

- **Modelo 7** (MOENCH e PRICKETT, 1972) – conversão de aquífero confinado para não confinado e poço totalmente penetrante:

$$W_{\text{nãoconf.}} = W(u_{nc}) - W(v) \quad W_{\text{conf.}} = W(u_c) \cdot \exp[v(S_c / S_{nc} - 1)] \quad (7)$$

- **Modelo 8** (BOULTON e STRELTSOVA, 1975) – aquífero não confinado, aquífero de superposto e poço parcialmente penetrante:

$$W = \left(\frac{1}{\frac{l}{m} - \frac{d}{m}} \right) \cdot \int_0^{\infty} 4y \cdot Jo(\rho \cdot y) \cdot \left[u_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y) \right] dy \quad (8)$$

Descrições mais detalhadas destes modelos podem ser encontradas no trabalho de DAWSON e ISTOK (1991) e no trabalho de ALAMY FILHO (2002). Este último apresenta ainda os algoritmos para o cálculo das funções de poços. A solução dos modelos analíticos de funções requer uma série de considerações simplificadoras, dentre elas podem-se citar:

- 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 bombeada é constante para cada intervalo de tempo considerado;
- As perdas de carga nos filtros e na entrada da bomba são tomadas como desprezíveis;
- O aquífero é compressível e elástico;
- O poço bombeado tem diâmetro infinitesimal.

TEMPO DE BOMBEAMENTO

Os modelos de funções de poços utilizados no programa compreendem situações de escoamento não permanente. Este tipo de escoamento caracteriza-se pela evolução temporal dos rebaixamentos e ocorre desde o início do bombeamento do poço até o instante em que os níveis piezométricos praticamente não mais variam com o tempo. Assim, os rebaixamentos são grandes nos primeiros instantes de bombeamento, atenuando-se paulatinamente com o passar do tempo, até chegar a valores que praticamente não se alteram (Figura 1). Este comportamento mostra, com clareza, que as equações para escoamento não permanente também cobrem os casos em que a variação dos rebaixamentos com o tempo é desprezível.

A Figura 1 representa casos de variação temporal dos rebaixamentos para bombeamentos contínuo e intermitente. Nos casos de intermitência, percebe-se que, a partir do instante em que a bomba é desligada (*td*), ocorre uma recuperação do nível piezométrico, indicada pela queda dos

valores de rebaixamentos. Não obstante, o nível piezométrico inicial (nível estático) não é atingido, pois um rebaixamento residual subsiste nos instantes (t_r) após a interrupção do bombeamento.

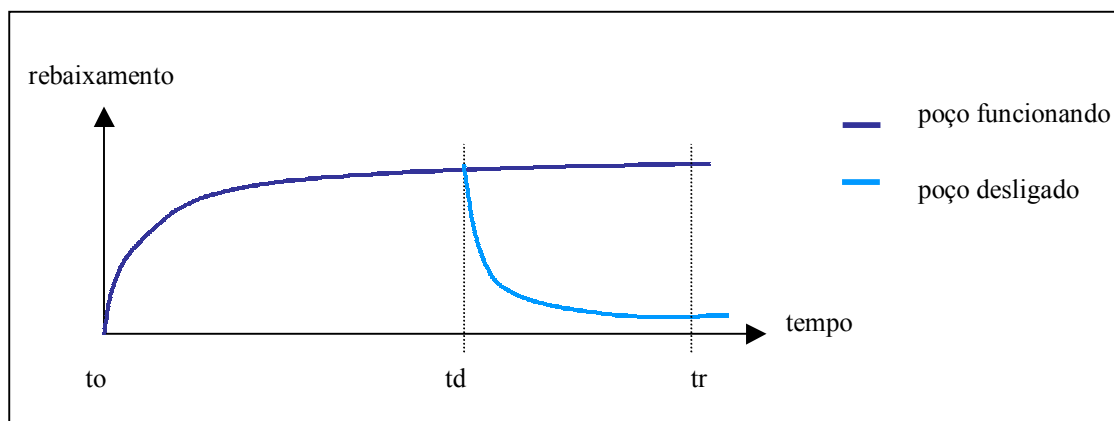


Figura 1. Variação dos rebaixamentos com o tempo.

SUPERPOSIÇÃO DE EFEITOS

A teoria da superposição assume, neste trabalho, grande destaque, sendo a principal ferramenta no cálculo dos rebaixamentos totais nos poços. O programa computacional desenvolvido utiliza modelos conceituais que se baseiam nas hipóteses de extensão infinita dos aquíferos e taxas de bombeamento constantes. Além disto, as equações dos modelos de escoamento são lineares na variável independente rebaixamento, permitindo a aplicação da superposição de efeitos. Assim, os rebaixamentos finais são obtidos pelo somatório das soluções individuais, calculadas para cada poço do sistema. Além da avaliação de interferências entre poços, a superposição pode ser utilizada para estimar efeitos de recarga, aquíferos não infinitos e recuperação dos níveis piezométricos após interrupção do bombeamento.

O PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE POÇOS

O Microsoft EXCEL, versão 7.0, apresenta como uma de suas ferramentas a linguagem de programação Visual Basic (Figura 2). Essa linguagem, empregada dentro de um outro programa, também recebe o nome de Visual Basic for Applications (VBA). Largamente utilizado na construção de macros, o VBA utiliza o Visual Basic aplicado aos objetos do EXCEL. O objetivo das macros no EXCEL é reduzir o número de operações repetitivas por parte do usuário. No presente trabalho, elas compõem todo o programa, automatizando e conduzindo os cálculos mediante simples operações de teclado e mouse.

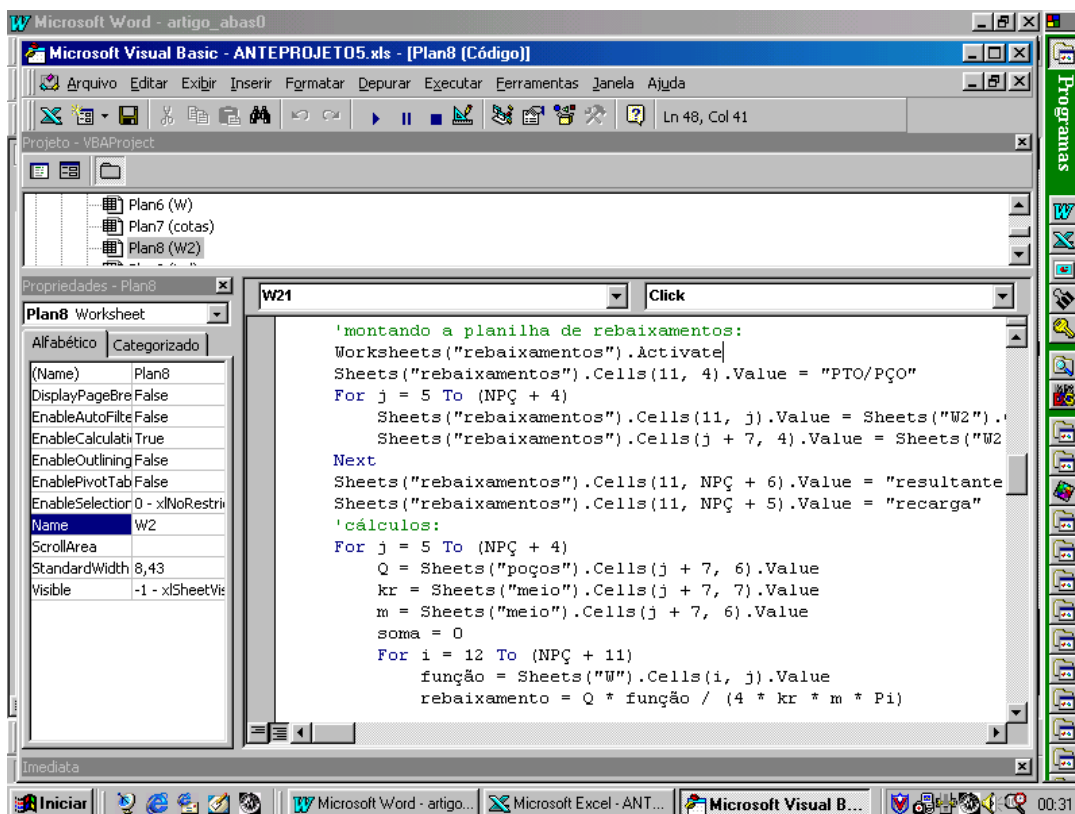


Figura 2. Trecho de código do programa, escrito em Visual Basic.

As planilhas do EXCEL constituem as estruturas principais do programa, atuando como dispositivos de saída e apresentação de dados. As operações são executadas mediante a construção de tabelas, ativadas pelo acionamento de botões presentes nas próprias planilhas. Assim, o usuário transfere cada etapa de cálculo de uma planilha para outra, sem necessidade de maiores conhecimentos acerca do ambiente de programação.

Os cálculos de rebaixamentos utilizados no programa levam em conta duas opções: sistemas de bombeamento contínuo (sem desligamento de bombas) e sistemas de bombeamento intermitente (com desligamento de bombas). De uma forma geral, as diretrizes de cálculo seguem o esquema indicado pela Figura 3.

É interessante que se conheça previamente a quantidade total de poços a serem considerados na simulação dos sistemas. Porquanto uma análise anterior da extensão do problema (poços, área de estudo, períodos de bombeamento, etc.) torna-se das mais convenientes. Este procedimento evita uma série de transtornos, dentre eles, a necessidade de se retornar aos procedimentos de cadastro quando os cálculos estão já adiantados.

O fornecimento das coordenadas dos poços é obrigatório para que sejam calculadas as distâncias entre eles. O sistema de coordenadas utilizado neste trabalho é cartesiano. Como exemplo, podem-se utilizar as coordenadas UTM nas direções norte-sul e leste-oeste, não havendo porém, nenhuma obrigatoriedade de se aplicar esta regra. Quando não se dispõe das coordenadas

dos poços estudados, estas podem ser levantadas, de maneira relativa, através de medições em mapas.

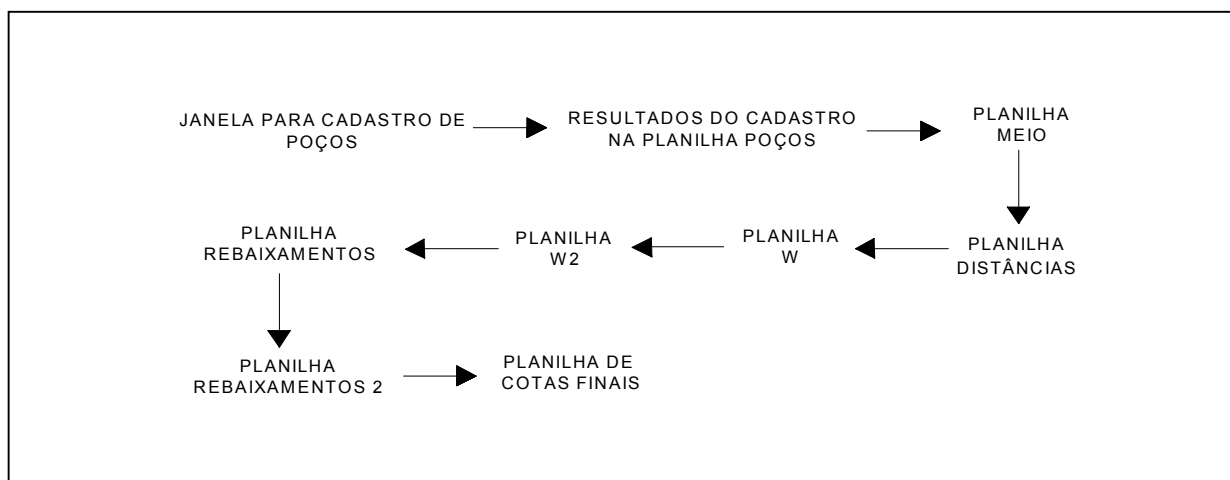


Figura 3 . Esquema sequencial das operações do programa.

Outro conceito da mais fundamental importância refere-se aos períodos de bombeamento. Neste trabalho tais períodos são fixados por datas (dia/ mês/ ano). Estas datas são introduzidas ao aplicativo na fase de cadastramento dos poços. No caso de simulações sem desligamento de bombas duas datas são necessárias: aquela de início ou inauguração do poço, e aquela em que, no decorrer da operação, foi coletado o nível dinâmico. Os rebaixamentos são então calculados a partir deste nível medido e a cota dinâmica final no poço é obtida da subtração, ao nível dinâmico verificado, dos rebaixamentos totais estimados. Nos casos de simulações com desligamento de bombas um novo dado, correspondente à data em que a bomba foi desligada, deve ser adicionado ao formulário de cadastro. No final do cadastro, uma caixa de diálogo é aberta para fixação da data de referência, que representa o instante em que se quer conhecer os níveis dinâmicos finais nos poços. A Figura 4 representa o formulário que permite cadastrar os poços.

Definem-se pois, três intervalos de tempo que são calculados no final do processo de cadastramento e anexados à planilha POÇOS. O intervalo chamado TEMPO1 abrange toda operação do poço desde a inauguração até a data de referência. O intervalo TEMPO2 abrange a operação desde a inauguração até a data de medição em campo dos níveis dinâmicos. Eventualmente este TEMPO2 pode ser nulo quando se considera o nível medido igual ao nível estático do poço, dessa forma as datas de inauguração e de medição são coincidentes. O TEMPO3 aparece apenas nos casos de interferências com desligamento de bombas e compreende a operação desde a inauguração até a data em que houve a interrupção do bombeamento. A Figura 5 ilustra esses três intervalos definidos.

Microsoft Excel - ANTEPROJET05
CADASTRO DE POÇOS TUBULARES

LISTA DE MODELOS :

- MODELO 1 : TRANSIENTE, CONFINADO
- MODELO 2 : TRANSIENTE, CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 3 : TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO
- MODELO 4 : TRANSIENTE, CONFINADO, AQUITARD SUPERPOSTO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 5 : TRANSIENTE, NÃO CONFINADO
- MODELO 6 : TRANSIENTE, NÃO CONFINADO, PENETRAÇÃO PARCIAL
- MODELO 7 : TRANSIENTE, CONVERSÃO DE CONFINADO PARA NÃO CONFINADO

NÚMERO DE POÇOS A SEREM ANALISADOS:

NÚMERO DO POÇO :

COORDENADAS UTM (m) : L - O :

N - S :

PROFUNDIDADES DAS EXTREMIDADES DO FILTRO (m) :

TOPO :

BASE :

INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO POÇO : DATA DA COLETA DE CAMPO :

DIA : MÊS : ANO : DIA : MÊS : ANO :

VAZÃO (m³/h) : MODELO :

COTA D'ÁGUA (m) :

LIMPAR PLANILHA CADASTRAR CONTINUAR CADASTRO VER CADASTRO VOLTAR

Pronto

Microsoft Word - artigo... Microsoft Excel - ... Microsoft Visual Basic - ...

Figura 4 . Formulário de cadastro dos poços.

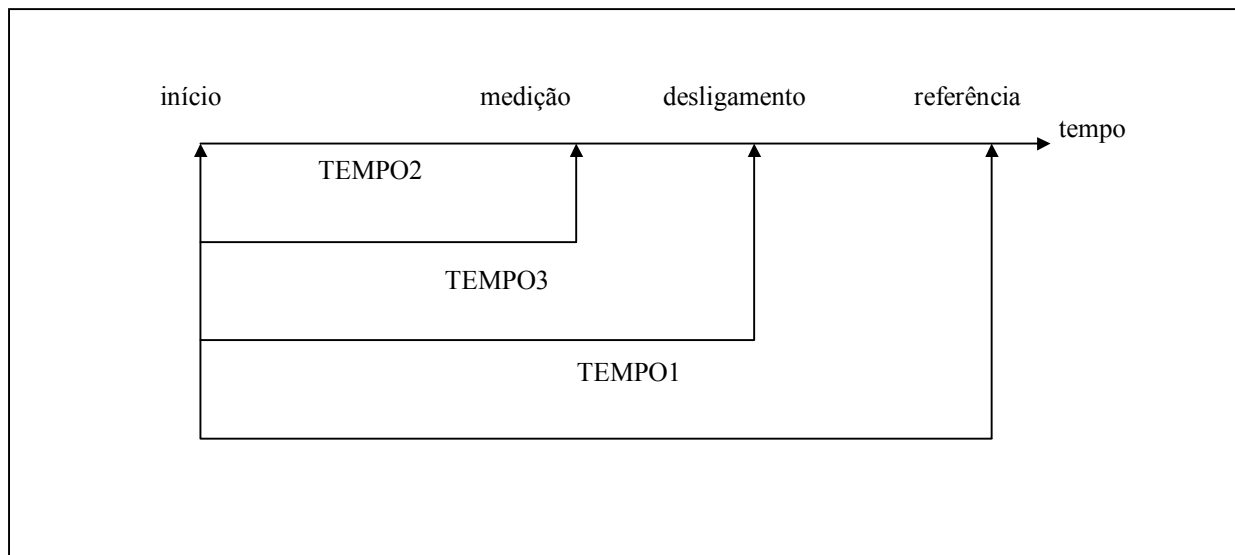


Figura 5 . Intervalos de tempo definidos no aplicativo.

Vale lembrar que a data de desligamento pode percorrer toda a escala de tempo, não precisando necessariamente estar entre as datas de medição e de referência. Ainda, estes intervalos não precisam ser calculados previamente pelo usuário, uma vez que, a partir das datas informadas no cadastro, tais períodos são determinados automaticamente pelo programa.

As Planilhas

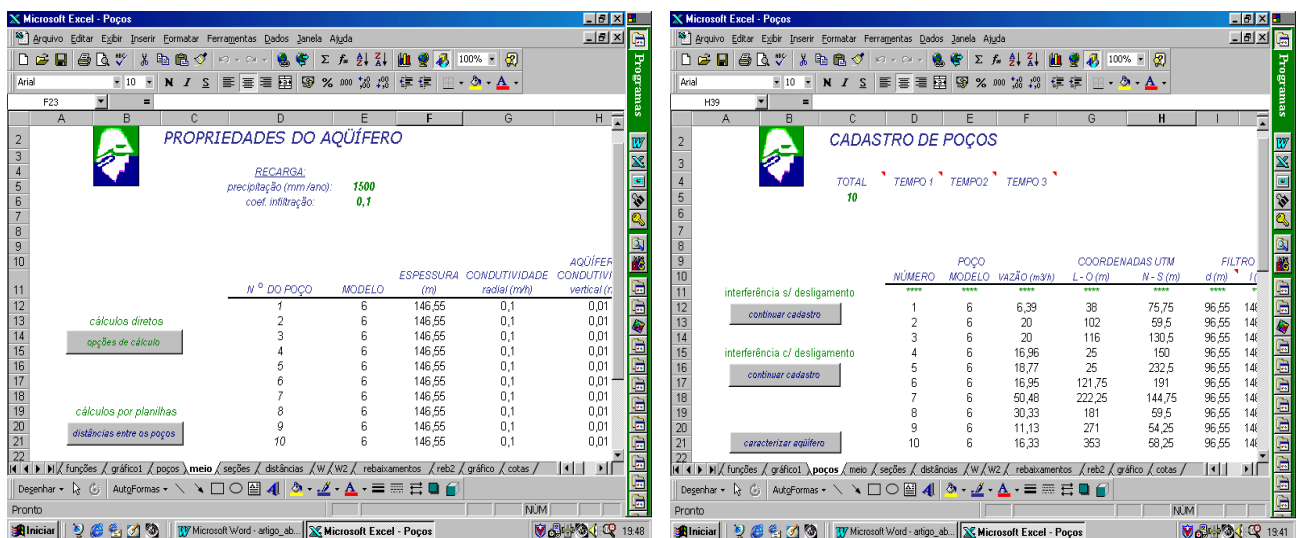


Figura 6 . Planilhas que representam a base dos dados da simulação.

A planilha POÇOS encerra, além dos dados fornecidos pelo processo de cadastro, os intervalos de tempo calculados. As características dos poços são dispostas em cada linha da tabela como ilustra a Figura 6.

Na planilha MEIO são afixados os dados cadastrais das formações subterrâneas mediante preenchimento de caixas de diálogo que são apresentadas automaticamente. Além das características das formações subterrâneas no local de cada poço, essa planilha resume ainda os dados necessários à recarga devido à precipitação. A planilha MEIO assume, juntamente com a planilha POÇOS, importante papel, pois ambas encerram a base de dados para o cálculo das planilhas seguintes. A planilha DISTÂNCIAS, que resume as distâncias entre os poços, é por exemplo, calculada a partir das coordenadas armazenadas na planilha POÇOS.

Em termos de tempo de execução, a parte mais dispendiosa do programa reside no cálculo das planilhas de funções de poços. A planilha W resume os valores das funções dos poços para o intervalo TEMPO1. Assim, aproveitam-se os intervalos correspondentes já calculados para cada poço durante o processo de cadastro dos mesmos. A Figura 7 ilustra as planilhas de funções de poços.

A planilha W2 apresenta grande semelhança com a planilha anterior. Nela resumem-se os valores das funções para um intervalo obtido dos valores TEMPO1 e TEMPO2 de cada poço. Para delimitar este intervalo, fez-se uma abstração, utilizando um sistema genérico de dois poços (i e j), ilustrada pela Figura 8. Neste caso, o poço i é considerado ativo e o poço j é tomado como poço de observação.

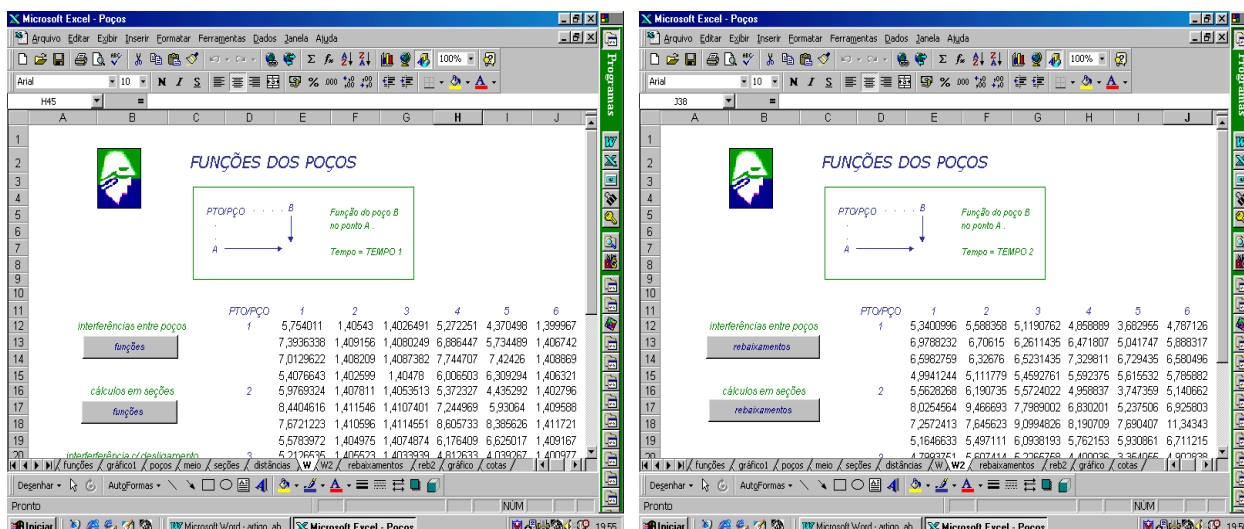


Figura 7 . As planilhas de funções de poços W e W2.

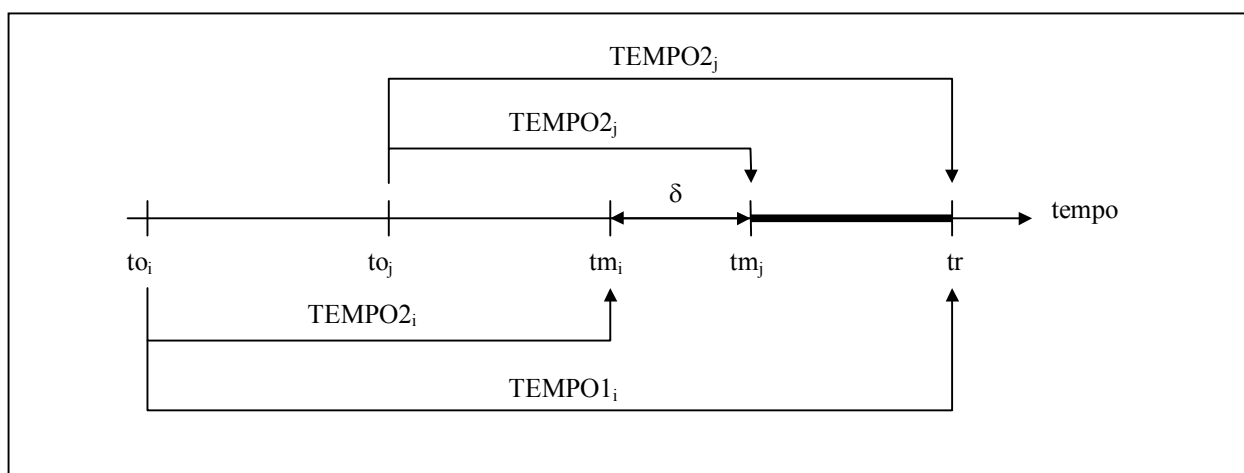


Figura 8 . Artificio para cálculo do intervalo de tempo da planilha W2.

Da Figura 8, definem-se os seguintes termos:

- to_i = tempo de início ou de inauguração do poço i ;
- to_j = tempo de início ou de inauguração do poço j ;
- tm_i = instante de coleta de nível dinâmico no poço i ;
- tm_j = instante de coleta de nível dinâmico no poço j ;
- tr = tempo de referência (comum a todos os poços);
- $\delta = tm_j - tm_i$

Assim, o intervalo de tempo a ser considerado no cálculo da planilha W2 é definido por:

$$\Delta t = TEMPO2_i + \delta, \text{ onde : } \delta = (TEMPO1_i - TEMPO2_i) - (TEMPO1_j - TEMPO2_j) \quad (9)$$

Esta formulação é geral e pode ser aplicada em análises de vários poços, uma vez que as funções são avaliadas dois a dois, ou seja, pela ação de um poço ativo em outro poço considerado como passivo. Um bom exemplo é quando se calcula o rebaixamento do poço i nele mesmo. Neste caso, o intervalo δ é nulo e o período considerado corresponde ao valor TEMPO2 para o próprio poço i .

As planilha REBAIXAMENTOS e REB2 resumem os valores dos rebaixamentos calculados a partir das planilhas W e W2, respectivamente. Os valores significativos dos rebaixamentos que um poço causa em outro são lidos por coluna, de acordo com a Figura 9.

Da diferença entre os rebaixamentos totais calculados nas planilhas REBAIXAMENTOS e REB2 é que se obtêm os rebaixamentos finais a serem descontados dos níveis dinâmicos medidos de cada poço.

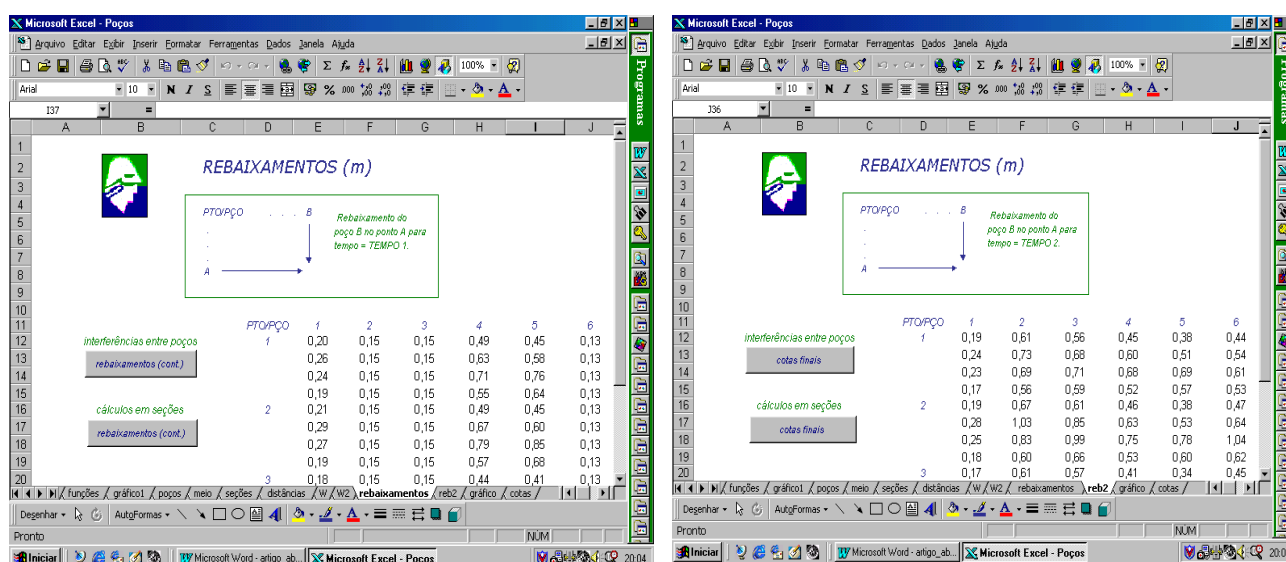


Figura 9 . As planilhas de rebaixamentos .

Com a apresentação da planilha COTAS terminam os cálculos de interferências entre poços. Nela aparecem os valores dos níveis dinâmicos medidos, dos rebaixamentos totais e dos níveis dinâmicos finais (ver Figura 10). Por convenção, nessa tabela, os valores dos rebaixamentos aparecem negativos, quando indicam decréscimo de cota dos níveis dinâmicos dos poços e positivos, quando indicam recuperação dos mesmos.

Assim, a avaliação completa de rebaixamentos em sistemas de poços deve seguir a construção dessas planilhas. Os rebaixamentos, para cada intervalo de tempo de simulação, são calculados a partir dos níveis dinâmicos medidos em campo. Contudo, esses níveis dinâmicos também podem ser retirados de eventuais simulações anteriores do sistema de poços considerado.

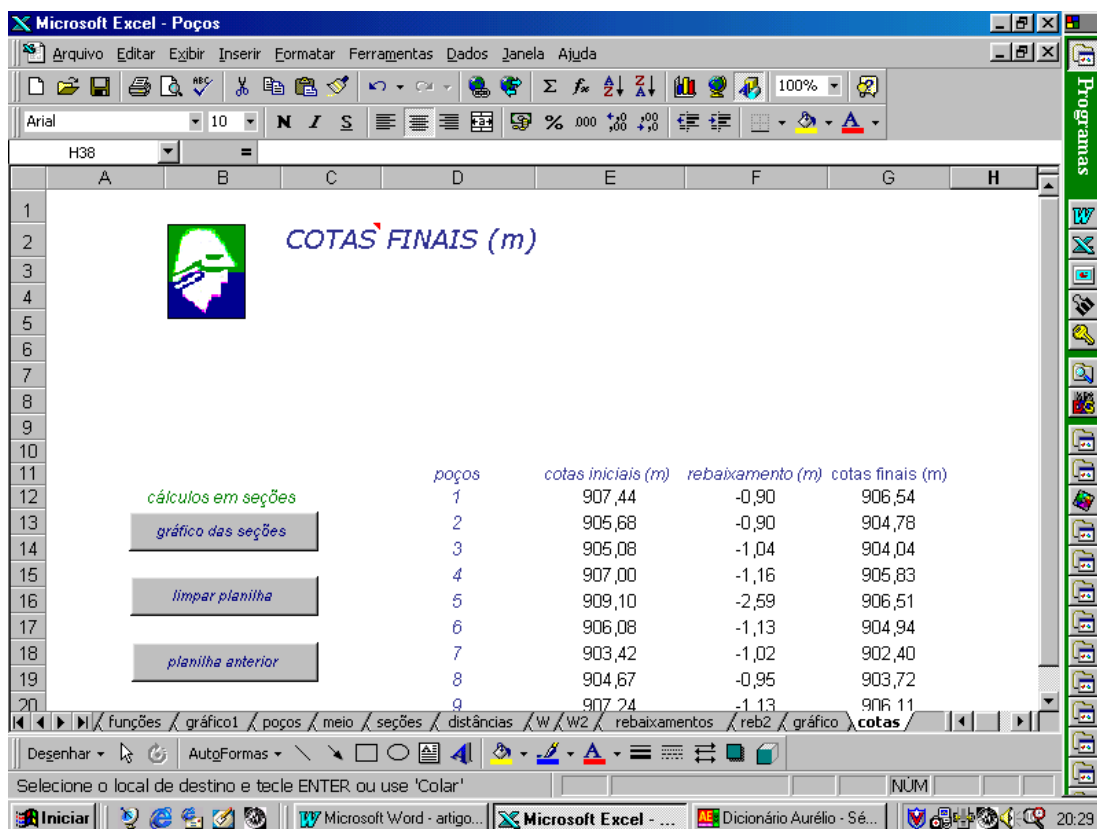


Figura 10 . A planilha de níveis dinâmicos calculados para a data de referência.

SIMULAÇÃO DE UMA BATERIA DE POÇOS

As simulações seguintes têm o objetivo de avaliar a evolução dos rebaixamentos nos poços de uma bateria de bombeamento. Esses sistemas geralmente apresentam grande número de poços distribuídos numa área reduzida.

A bateria considerada nesta análise apresenta dez poços situados numa região de afloramento do aquífero Botucatu-Pirambóia. Assim, as propriedades utilizadas representam valores médios do sistema Botucatu-Pirambóia (CONTIN NETO, 1996):

- condutividade horizontal (k_r) = 0,1 m/h;
- condutividade vertical (k_v) = 0,01 m/h;
- armazenabilidade (S) = 0,0001;
- produção específica (S_y) = 0,2.

A Figura 11 representa o perfil inicial do sistema e as penetrações dos filtros dos poços utilizados na bateria analisada. A Tabela 1 resume os principais dados do sistema de poços.

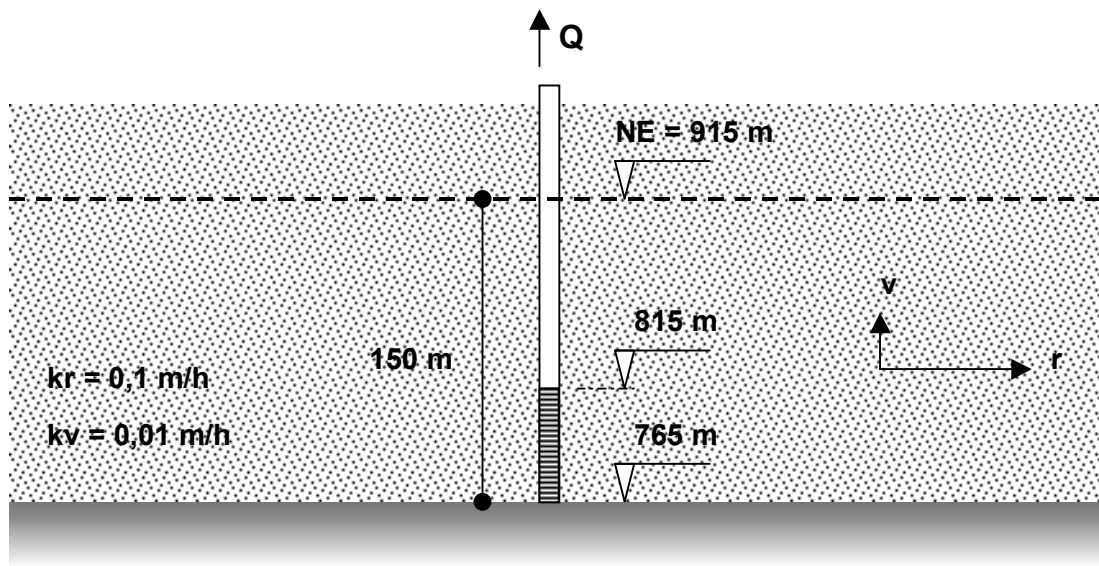


Figura 11 . Esquema dos poços da bateria .

Tabela 1 . Poços utilizados nas simulações.

poço	vazão (m ³ /h)	coordenadas		data início
		X (m)	Y (m)	
1	6,39	38,00	75,75	01/01/05
2	20,00	102,00	59,50	01/01/00
3	20,00	116,00	130,50	01/01/00
4	16,96	25,00	150,00	01/01/05
5	18,77	25,00	232,50	01/01/10
6	16,95	121,75	191,00	01/01/00
7	50,48	222,25	144,75	01/01/00
8	30,33	181,00	59,50	01/01/00
9	11,13	271,00	54,25	01/01/00
10	16,33	353,00	58,25	01/01/10

Este sistema foi dimensionado para abastecer uma população máxima de 16587 hab numa situação final, quando todos os dez poços estiverem funcionando. Este cálculo considerou um consumo médio per capita de 300 L/ hab.dia. O primeiro estágio contou com a ativação dos poços 2, 3, 6, 7, 8 e 9; atendendo a uma população inicial de 9484 hab. Após intervalos de cinco anos foram adicionados ao sistema os poços 1 e 4 (01/01/2005), e os poços 5 e 10 (01/01/2010), completando a demanda total. A etapa final das simulações considerou o desligamento dos poços 2, 3, 6, 8 e 9. Este raciocínio possibilitou verificar a recuperação da superfície piezométrica na região devido aos efeitos conjuntos de desligamento dos poços e da recarga. A precipitação média anual sobre o setor analisado foi tomada como 1500 mm/ ano. Para efeitos de recarga, assumiu-se que 10% dessa precipitação atingiria o aquífero.

A Tabela 2 resume os níveis dinâmicos calculados para cada data tomada como referência. Os Gráficos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ilustram a evolução dos rebaixamentos da superfície piezométrica na vizinhança dos poços.

Tabela 2 . Níveis dinâmicos calculados pelo programa.

poço	níveis piezométricos (m) nas datas de referência						
	01/01/00	01/01/01	01/01/05	01/01/06	01/01/10	01/01/15	01/01/20
1	915,00	909,74	909,12	907,45	907,44	906,54	911,66
2	915,00	907,33	906,71	905,69	905,68	904,78	912,01
3	915,00	906,78	906,16	905,09	905,08	904,04	911,45
4	915,00	910,08	909,47	907,00	907,00	905,83	910,61
5	915,00	910,76	910,14	909,10	909,10	906,51	910,70
6	915,00	907,66	907,04	906,08	906,08	904,94	911,51
7	915,00	904,71	904,09	903,42	903,42	902,40	907,67
8	915,00	906,04	905,42	904,67	904,67	903,72	911,73
9	915,00	908,40	907,78	907,24	907,24	906,11	911,83
10	915,00	910,61	910,00	909,58	909,58	907,26	911,24

Gráfico 1 . Níveis dinâmicos em 01/01/2001.

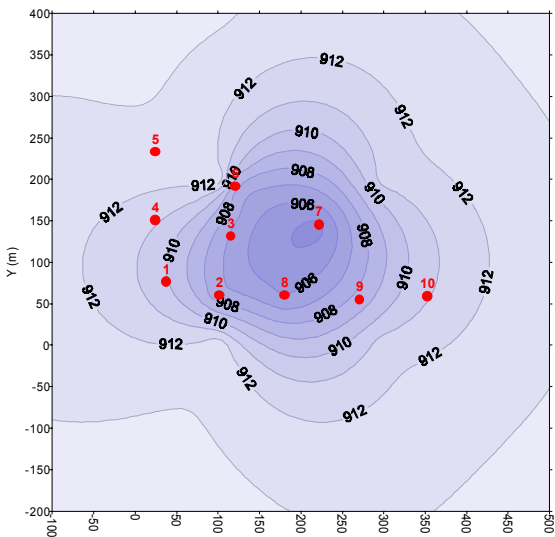


Gráfico 2 . Níveis dinâmicos em 01/01/2005.

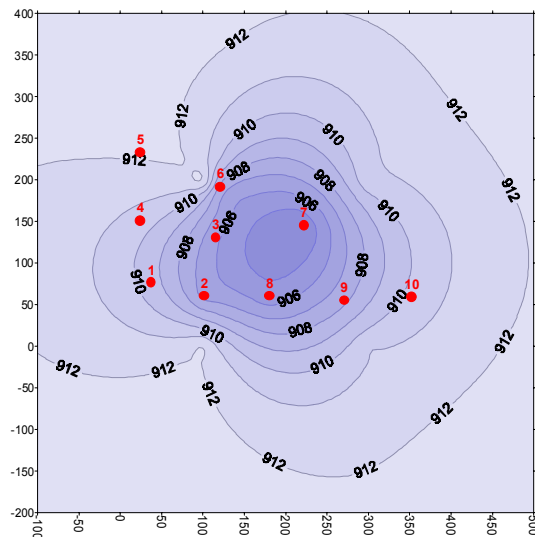


Gráfico 3 . Níveis dinâmicos em 01/01/2006.

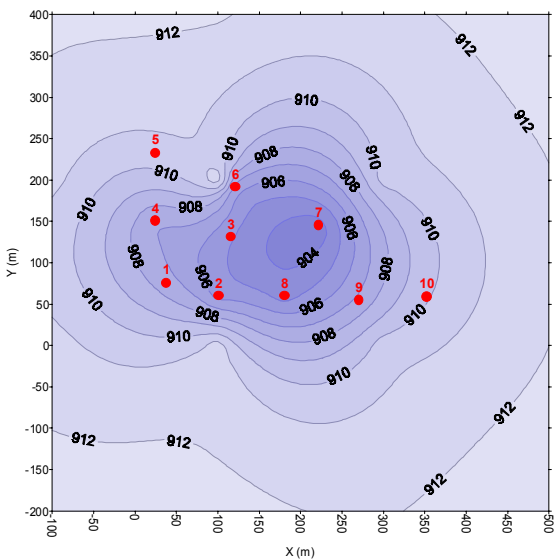


Gráfico 4 . Níveis dinâmicos em 01/01/2010.

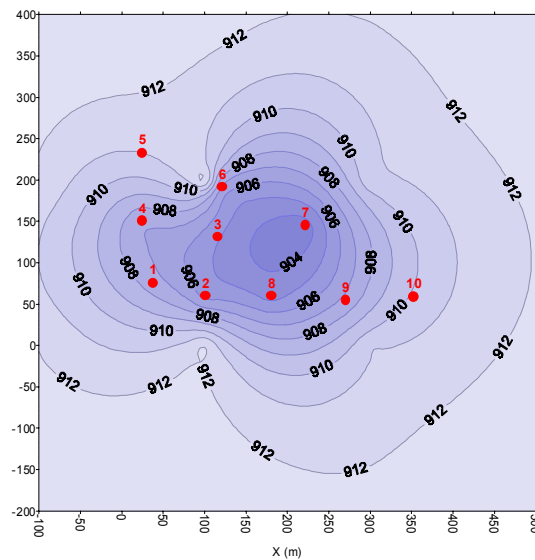


Gráfico 5 . Níveis dinâmicos em 01/01/2015.

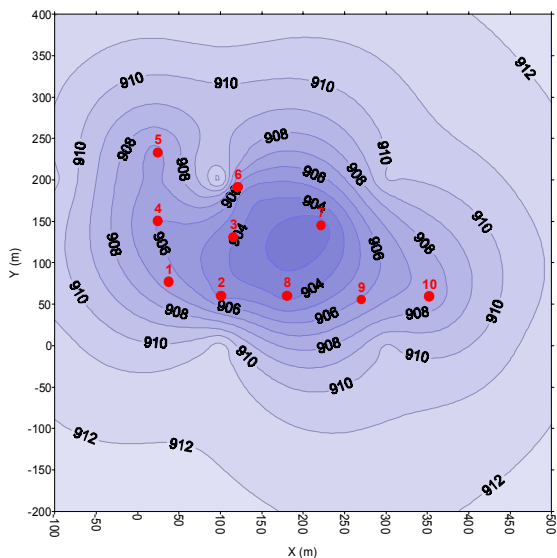


Gráfico 6 . Níveis dinâmicos em 01/01/2020.

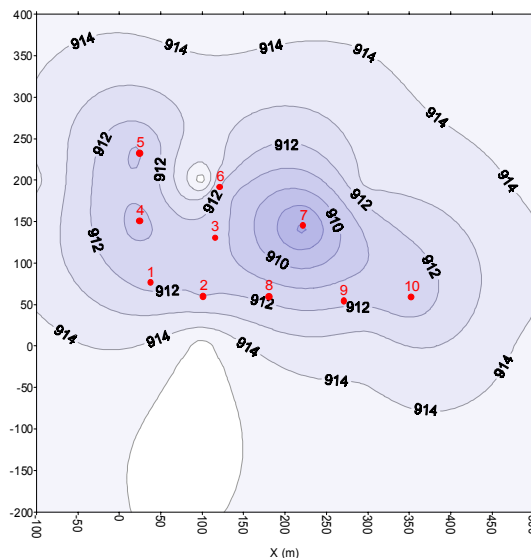
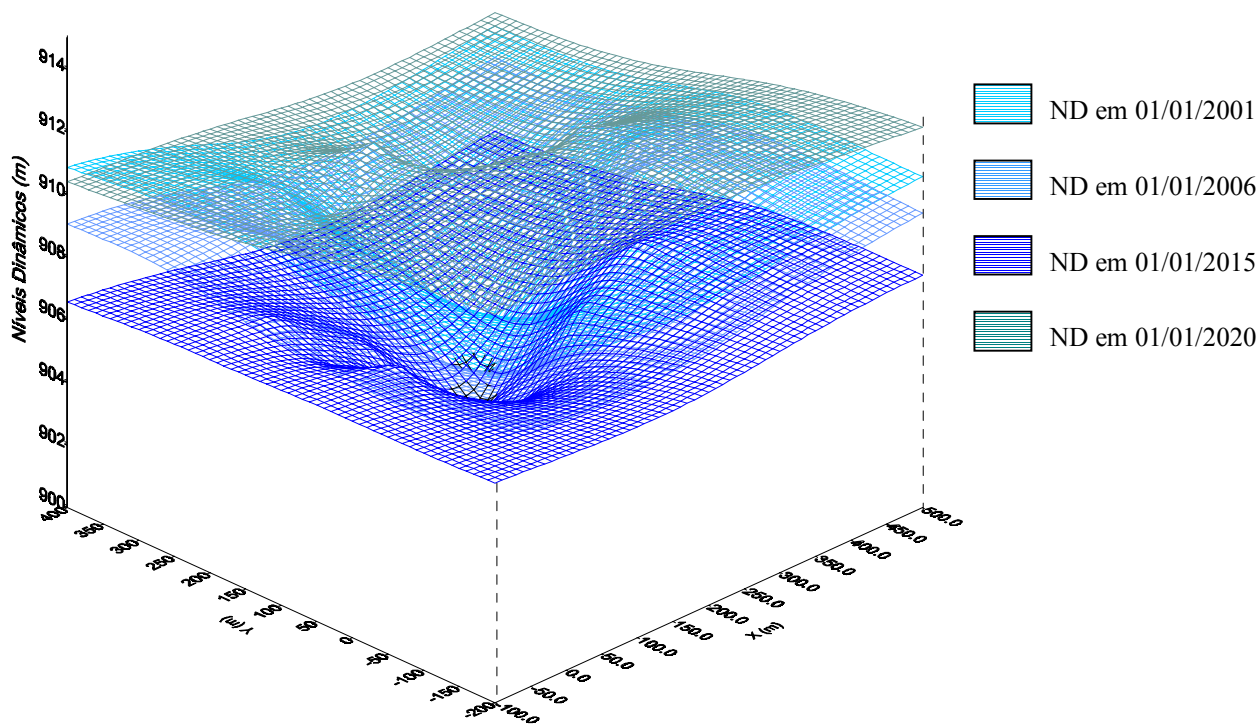


Gráfico 7 . Variação da superfície piezométrica.



CONCLUSÕES

A aplicação do programa em sistemas de dimensões reduzidas e altamente providos de poços tubulares constitui uma alternativa interessante na estimativa da variação temporal dos rebaixamentos nessas regiões. A utilização dos modelos de funções integrais de poços em regiões de pequena escala é bastante apropriada, uma vez que uma série de considerações dos modelos podem ser satisfeitas nesses setores. Assim, hipóteses acerca da horizontalidade das superfícies de

topo e base das formações, homogeneidade e continuidade do aquífero podem aproximar a realidade, se a análise for aplicada a áreas reduzidas.

Os resultados das simulações realizadas indicaram que os maiores rebaixamentos ocorreram nos primeiros instantes de funcionamento dos poços. Assim, os poços 2, 3, 6, 7, 8 e 9 apresentaram os maiores rebaixamentos no período de 01/01/2000 a 01/01/2001. O mesmo ocorreu com os poços 1 e 4, e com os poços 5 e 10, que apresentaram rebaixamentos mais elevados no período de 01/01/2005 a 01/01/2006 e no período de 01/01/2010 a 01/01/2015, respectivamente. Estes resultados revelam coerência com a Figura 1, uma vez que os maiores valores de rebaixamentos ocorreram para idades incipientes dos poços, havendo uma variação que é atenuada com o tempo. Assim, pode-se concluir que o funcionamento crítico de um poço, em termos dos rebaixamentos causados nele mesmo e nos poços vizinhos, ocorre nos primeiros instantes após a ativação do bombeamento.

O desligamento de metade dos poços da bateria a partir de 01/01/2015 causou uma recuperação dos níveis dinâmicos, aliada aos efeitos da recarga devido à precipitação. Da mesma forma que os rebaixamentos, esta recuperação é mais evidente nos primeiros instantes após a desativação do poço, sofrendo um abrandamento com o passar do tempo. Os Gráficos 6 e 7 ilustram esta recuperação.

Uma das grandes vantagens do programa é permitir o cálculo pontual dos rebaixamentos sem necessidade de discretizar a região analisada. Isto permite eliminar a subjetividade dos resultados inerente ao processo de discretização do domínio de escoamento. Da mesma forma, os detalhes de penetrações dos filtros dos poços, negligenciados na maioria dos modelos numéricos, são levados em conta nos modelos de funções integrais de poços. O tempo de simulação é reduzido e depende fundamentalmente do cálculo das duas planilhas de funções (W e W_2). Neste caso cada simulação foi desenvolvida em cerca de 25 minutos, todavia o tempo de execução aumenta com a introdução de um número maior de poços no sistema. A prontidão na entrada e saída de dados, torna o programa de fácil utilização, dispensando o usuário do conhecimento aprofundado em matemática computacional.

A simulação de uma bateria de poços permite revelar os pontos de maiores rebaixamentos e os efeitos da introdução de novos poços no sistema. Dessa maneira, o programa fornece importantes diretrizes a respeito da operação e gerenciamento desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- ALAMY FILHO, J. E. (2002) 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.
- BOULTON, N. S.; STRELTSOVA, T. D. (1975) New Equations for Determining the Formation Constants of an Aquifer from Pumping Test Data. *Water Resources Research*, vol. 11 (1), p. 148-153.
- CONTIN NETO, D. (1996) Relatório Técnico do Projeto de Gestão da Quantidade de Águas Subterrâneas – Resultados. FIPAI.
- DAWSON, K. J.; ISTOK, J. D. (1991) *Aquifer Testing – Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*, Lewis Publishers, Chelsea.
- HANTUSH, M. S. (1964) Hydraulics of Weels. In Chow, V. T. Ed., *Advances in Hydrosience*, vol.1, p. 281-442.
- HANTUSH, M. S.; JACOB, C. E. (1955) Non-steady Radial flow in an Infinite Leaky Aquifer. *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 36 (1), p. 95-100.
- HUNT, B. E. (1983) *Mathematical Analysis of Groundwater Resources*. Butterworth and Co.
- MOENCH, A. F.; PRICKETT, T. A . (1972) Radial flow in an Infinite Aquifer Undergoing Conversion from Artesian to Water Table Conditions. *Water Resources Research*, vol. 8 (2), p. 494-499.
- NEUMAN, S. P. (1972) Theory of flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of the Water Table. *Water Resources Research*, vol. 8 (4), p. 1031-1045.
- NEUMAN, S. P. (1973) Supplementary Comments on Theory of flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of Water Table. *Water Resources Research*, vol. 9 (4), p. 1102-1103.
- NEUMAN, S. P. (1974) Effect of Partial Penetration on flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. *Water Resources Research*, vol. 10 (2), p. 303-312.
- THEIS, C. V. (1935) The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groudwater Storage. *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 16, p. 519-524.