

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA OPERAÇÃO A LONGO PRAZO DE POÇO TUBULAR

João Alberto Bottura \*  
José Luiz A. Filho \*

## RESUMO

A aplicação do modelo numérico bidimensional FLOWIADI, desenvolvido por Kinzelbalch (1986) e modificado pelo Grupo de Hidrogeologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, foi realizado com o objetivo de analisar a operação de longo prazo de um dos poços tubulares, de propriedades da Rhodia S/A - Indústrias Químicas e Têxteis, localizada no município de Santo André, porção sul da grande São Paulo; onde em 1990 foi realizada avaliação da situação e eficiência do seu sistema de captação por poços tubulares.

Com base nos resultados da simulação foi possível avaliar as evidências de recarga induzida, pelo bombeamento, a partir do Rio Tamanduateí.

## 1 - INTRODUÇÃO

Em 1990, o IPT realizou para a Rhodia S/A - Indústrias Químicas e Têxteis, avaliação da situação dos quatorze poços existentes em seu parque industrial, dos quais quatro estavam em operação. Foi feita a caracterização hidráulica do aquífero e analisada a capacidade de produção dos poços.

Localmente foi reconhecida a presença de sedimentos aluvionares com espessura da ordem de 15-30m, sobrepostos as rochas do embasamento cristalino, micaxistos e gnaisses afetados por intenso sistema de fraturamento.

Os sedimentos aluvionares não apresentam interesse hidrogeológico, tendo em vista a alta capacidade de armazenamento e produção das rochas do embasamento. Estas constituem um aquífero confinado e anisotrópico, com horizontes aquíferos principais concentrados nas descontinuidades da matriz rochosa. Sua capacidade de

produção é alta, a transmissividade efetiva do maciço varia entre 9,6 e 45,0 m<sup>3</sup>/h/m com coeficiente de armazenamento entre 9x10<sup>-4</sup> e 5x10<sup>-3</sup> (Quadro 1).

QUADRO 1 - Características hidráulicas locais

POÇO	REBAIXAMENTO			RECUPERAÇÃO			MÉDIA	
	T (M <sup>3</sup> /H/M)	S	S (M)	T (M <sup>3</sup> /H/M)	S (M)	T (M <sup>3</sup> /H/M)	S	
9	9.5		0.52	9.4	0.53	9.6		
2	41.8	4.7x10 <sup>-3</sup>	0.12	48.7	0.11	45.0	4.7x10 <sup>-3</sup>	
10	15.1	1.7x10 <sup>-3</sup>	0.33	16.8	0.29	15.8	1.7x10 <sup>-3</sup>	
12	24.0	8.8x10 <sup>-4</sup>	0.21	31.4	0.16	27.5	8.8x10 <sup>-4</sup>	

Foi constatada grande variabilidade espacial das características hidráulicas do aquífero, indicando anisotropia hidráulica orientada segundo o eixo NNE/SSW, coincidente com os principais lineamentos estruturais conhecidos.

A simulação foi feita com base nos resultados obtidos no ensaio de bombeamento executado no poço 09 e monitorado através dos poços 02, 10 e 12.

## 2 - MODELO UTILIZADO

A simulação foi executada mediante a aplicação do modelo numérico bidimensional FLOWIADI, desenvolvido por Kinzelbalch (1986) e modificado pelo Agrupamento de Hidrogeologia do IPT. Este efetua a resolução numérica por diferenças finitas, da equação diferencial de fluxo subterrâ-

\* Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - Divisão de Geologia e Recursos Minerais - Agrupamento de Hidrogeologia.

neo em regime transitório ou permanente, para aquíferos livres e confinados, isotrópicos ou anisotrópicos.

## 2.1 - CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

A área simulada foi discretizada em uma malha retangular, com 14 nós na direção X e 12 na Y, com espaçamento regular e constante de 44 m entre os nós, de forma que a área de interesse ficasse totalmente dentro da malha (figura 1). Em decorrência da situação topográfica local, a superfície potenciométrica inicial foi considerada plana com datum = 0 (zero).

As características hidráulicas, determinadas através do ensaio executado no poço 9, foram adotadas para a área discretizada (quadro 1). Para o coeficiente de armazenamento foi considerado constante, e uniformemente distribuído o valor de  $1,0 \times 10^{-3}$ . Para o coeficiente de transmissividade, foram adotadas áreas de distribuição homogênea em função dos valores determinados para cada um dos pontos interpretados no ensaio executado. Recargas decorrentes da precipitação pluviométrica não foram consideradas. A vazão de exploração utilizada foi a mesma do ensaio,  $28 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Com base no cone de rebaixamento induzido durante o ensaio de bombeamento executado no poço 9 (figura 3), foi determinado um coeficiente de anisotropia  $K_x / K_y = 2,0$ , com o principal eixo orientado na direção X.

A equação do poço 9, determinada através de ensaio escalonado, foi utilizada para o cálculo do rebaixamento real induzido no aquífero pelo seu bombeamento (quadro 2).

$$s = 1,2 \times 10^{-1} (h/\text{m}^2) Q + 9,2 \times 10^{-3} (h^2/\text{m}) Q^2$$

## 2.2 - CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para a calibração e avaliação da aplicabilidade do modelo foram feitas simulações em duas condições básicas, considerando ou não a influência local do Rio Tamanduateí. Na calibração procurou-se a melhor aproximação aos dados reais registrados ao final das 24 horas de bombeamento, para isto, foram ajustados os valores dos coeficientes de

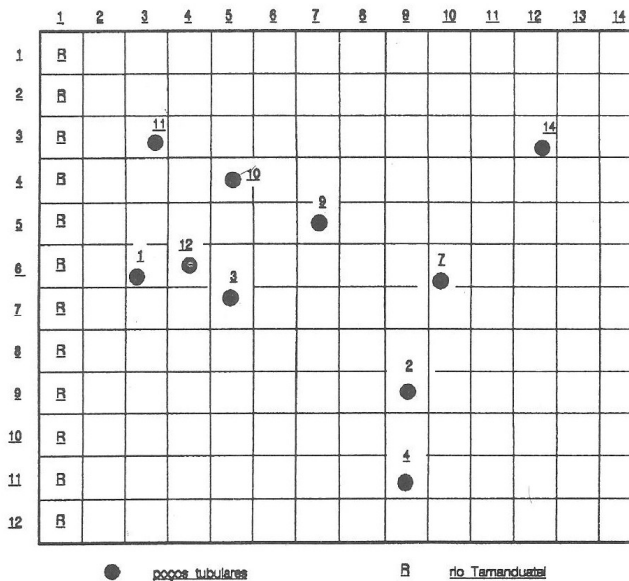


FIGURA 01 - MALHA ADOTADA

transmissividade e armazenamento, de acordo com a distribuição em domínios homogêneos como definido na caracterização hidráulica local (IPT, 1991). Os valores ajustados são apresentados na FIGURA 2. Os resultados calibrados, para 24 horas de bombeamento contínuo, são como apresentados nas tabelas 1 e 2 e no quadro 2.

QUADRO 2 - Rebaixamento gerados na calibração do modelo de simulação

Poço	Sm (m) * simulado	Sm (m) ** simulado	Sr (m) real
9	3.48	3.44	3.40
10	0.70	0.60	0.67
12	0.41	0.30	0.28
2	0.17	0.17	0.23

\* sem influência do rio

\*\* com influência do rio

Sm - Sr - rebaixamento

Os resultados obtidos mostram estreita correlação entre os dados simulados e reais, indicando condições satisfatórias de calibração.

Verifica-se no quadro 3, que a melhor correlação entre os dados reais e de calibração obtida para o poço 12 é quando ele está influenciado pela recarga do Rio Tamanduateí.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
2	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
3	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
4	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
5	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
6	*	*	*	*	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
8	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
9	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
10	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
11	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
12	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

FIGURA 02 - MATRIZ DE TRANSMISSIVIDADES

### 3 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para a simulação considerou-se operação contínua do poço 9 durante 360 dias, com geração dos resultados do rebaixamento para períodos intermediários correspondentes a 1, 90 e 360 dias de operação. Os resultados desta simulação, influenciados ou não pelas recargas oriundas do Rio Tamanduateí, são como a seguir apresentados (tabelas 3, 4, 5 e 6 e quadros 3 e 4).

Para a simulação sem influência da recarga pelo rio Tamanduateí, os resultados, acima representados, mostram que o nível dinâmico no poço 9 não estabiliza, e a expansão

QUADRO 3 - Rebaixamentos gerados no poço 9 sem influência da recarga do rio Tamanduateí

Poço	TEMPO (dias)			
	Sm			Sr
	1	90	360	1
9	3.48	3.56	3.58	3.40
10	0.70	0.79	0.82	0.67
12	0.41	0.49	0.51	0.28
2	0.17	0.22	0.24	0.23

Sm - Simulado

Sr - real

QUADRO 4 - Rebaixamentos gerados no poço 9 com influência da recarga do rio Tamanduateí

Poço	TEMPO (dias)			
	Sm			Sr
	1	90	360	1
9	3.44	3.44	3.45	3.40
10	0.60	0.55	0.55	0.67
12	0.30	0.26	0.26	0.28
2	0.17	0.19	0.19	0.23

Sm - Simulado

Sr - real

do seu cone é contínua para toda a área de interesse. As figuras 4a e 4b apresentam a posição e forma do seu cone de rebaixamento.

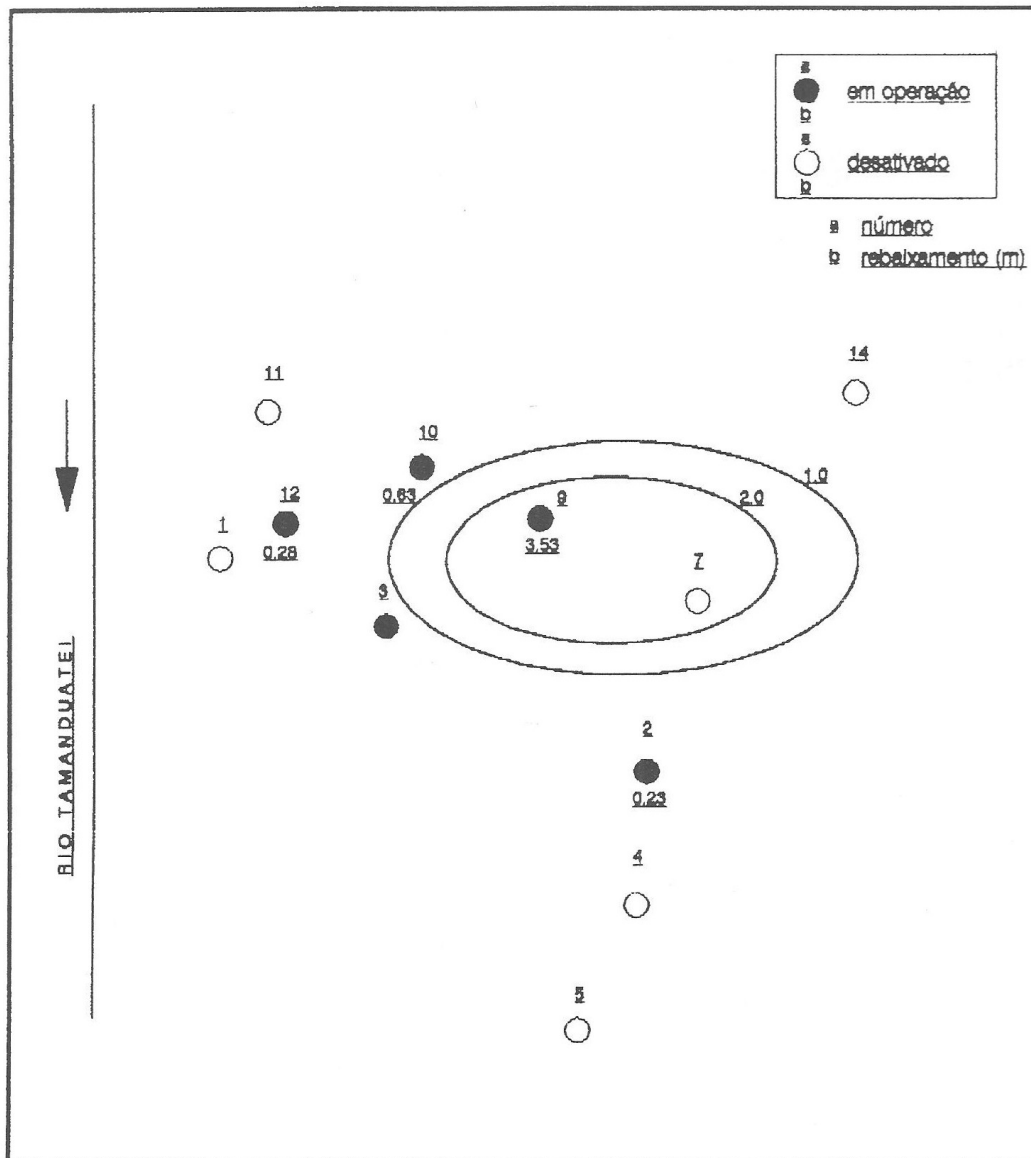
Os resultados da simulação quando considerada a recarga direta a partir do Rio Tamanduateí, mostram que o nível dinâmico do poço 9, atinge estabilização rápida, e a expansão do seu cone de rebaixamento é totalmente compensado pelas recargas do Rio Tamanduateí. As figuras 4c e 4d apresentam a posição e forma do cone de rebaixamento quando sob influência das recargas do Rio Tamanduateí.

### 4 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Tendo em vista a correlação obtida entre os resultados reais e de calibração, pode-se considerar que a aplicação do modelo numérico de simulação gerado através do FLOWIADI modificado, apresenta bons resultados e reflete com boa margem de segurança as condições reais de operação do poço 9.

Com base nestes resultados, pode-se inferir algumas considerações:

- Tendo em vista as condicionantes geológicas e hidrogeológicas locais, é válido concluir-se que a operação do poço 9 induz recarga oriunda do Rio Tamanduateí;
- Mesmo em decorrência dos pequenos rebaixamentos induzidos no aquífero pelo poço 9, a recarga é facilitada pelos condicionantes hidrogeológicos locais, principal eixo de transmissividade perpendicular ao rio;
- as interferências induzidas pelo poço 9, medidas e simuladas, mesmo diante das condicionantes hidrogeológicas locais e alta transmissividade do



**FIGURA 03 - CONE DE REBAIXAMENTO DO POÇO 9**

aqüífero são significativas, pois chegam a atingir no poço 10, situado a 91 m do poço 9, cerca de 20% do rebaixamento induzido no aqüífero pela sua operação.

d) Como as recargas induzidas nos poços 10 e 12 já são evidenciadas para curtos períodos de tempo, é conveniente uma avaliação mais detalhada da operação destes poços;

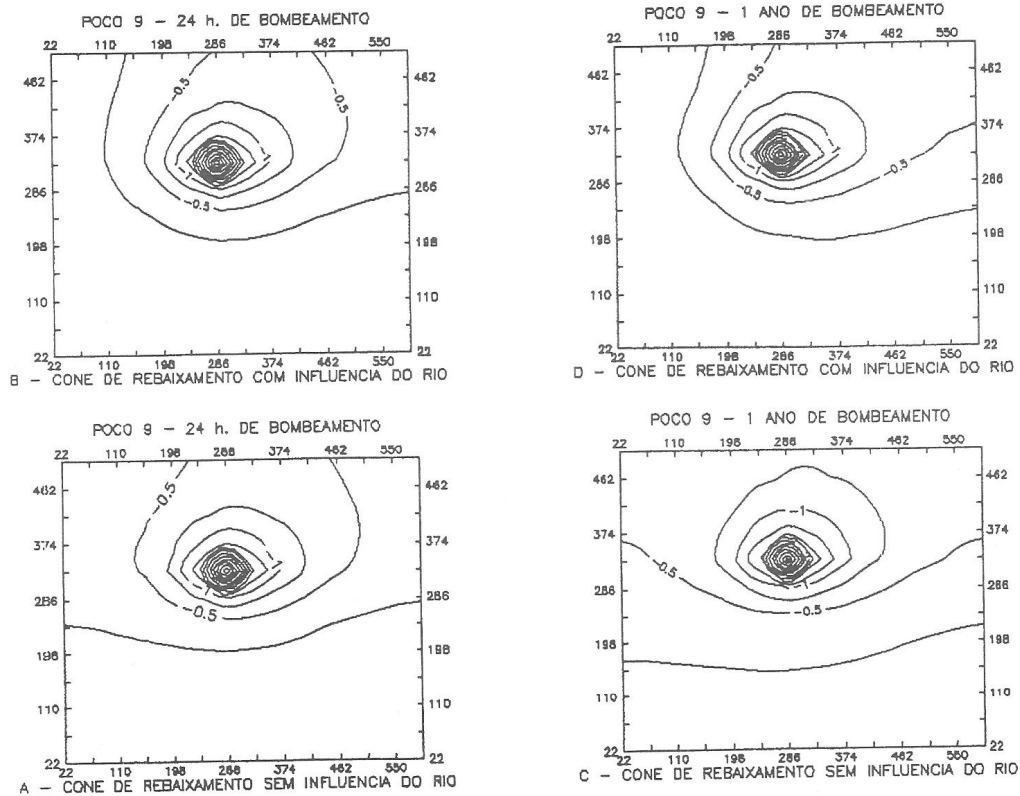


FIGURA 4 - Simulação da operação do poço 9.

- e) Visto que durante a operação de apenas um poço foi verificada a possível influência de recarga induzida pelo Rio Tamanduateí, é de se supor que ela seja franca na operação contínua de bombeamento de todos os poços.

## 5 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a RHODIA S/A - INDÚSTRIAS QUÍMICAS E TÊXTEIS a autorização concedida para a divulgação destes resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KINZELBACH, W. - 1986. Groundwater modelling - An introduction with sample programs in BASIC. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. (ISBN 0-444-42582-9).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - 1991. Estudos hidrogeológicos na área da Usina Têxtil da Rhodia em Santo André, SP - Primeira Etapa. São Paulo: 1991. (IPT - Relatório, 29 216).

TABELA 1 - Resultados da calibração sem influência do rio

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 1 Dia

0.38	0.39	0.40	0.43	0.47	0.52	0.55	0.56	0.55	0.52	0.49	0.46	0.44	0.43
0.38	0.39	0.42	0.44	0.50	0.58	0.62	0.63	0.60	0.56	0.51	0.47	0.45	0.43
0.39	0.40	0.43	0.48	0.58	0.72	0.81	0.79	0.71	0.62	0.54	0.48	0.45	0.43
0.39	0.41	0.45	0.52	0.70	1.00	1.23	1.08	0.87	0.69	0.57	0.48	0.43	0.41
0.36	0.38	0.43	0.52	0.80	1.40	3.48	1.49	0.97	0.69	0.53	0.43	0.38	0.35
0.31	0.33	0.36	0.41	0.53	0.74	0.91	0.78	0.61	0.47	0.38	0.32	0.28	0.26
0.24	0.25	0.27	0.29	0.32	0.36	0.38	0.36	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20	0.19
0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.16
0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13
0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11
0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10

TABELA 2 - Resultados da calibração com influência do rio.

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 1 Dia

0.00	0.11	0.20	0.27	0.35	0.45	0.51	0.54	0.53	0.51	0.49	0.46	0.44	0.43
0.00	0.12	0.21	0.29	0.39	0.51	0.58	0.60	0.59	0.55	0.51	0.47	0.44	0.43
0.00	0.13	0.24	0.33	0.47	0.66	0.77	0.76	0.70	0.61	0.54	0.48	0.44	0.43
0.00	0.13	0.26	0.37	0.60	0.93	1.19	1.05	0.85	0.69	0.56	0.48	0.43	0.40
0.00	0.13	0.25	0.39	0.70	1.34	3.44	1.47	0.96	0.69	0.53	0.43	0.38	0.35
0.00	0.11	0.21	0.30	0.46	0.70	0.89	0.77	0.60	0.47	0.38	0.31	0.28	0.26
0.00	0.08	0.15	0.22	0.27	0.33	0.36	0.35	0.31	0.27	0.24	0.21	0.20	0.19
0.00	0.06	0.11	0.15	0.19	0.21	0.23	0.23	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16	0.15
0.00	0.05	0.09	0.12	0.14	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
0.00	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11
0.00	0.03	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
0.00	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10

TABELA 3 - Resultados da simulação sem influência do rio.

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 1.06 Dias

0.38	0.39	0.40	0.43	0.47	0.52	0.55	0.56	0.55	0.52	0.49	0.46	0.44	0.43
0.38	0.39	0.42	0.44	0.50	0.58	0.62	0.63	0.60	0.56	0.51	0.47	0.45	0.43
0.39	0.40	0.43	0.48	0.58	0.72	0.81	0.79	0.71	0.62	0.54	0.48	0.45	0.43
0.39	0.41	0.45	0.52	0.70	1.00	1.23	1.08	0.87	0.69	0.57	0.48	0.43	0.41
0.36	0.38	0.43	0.52	0.80	1.40	3.48	1.49	0.97	0.69	0.53	0.43	0.38	0.35
0.31	0.33	0.36	0.41	0.53	0.74	0.91	0.78	0.61	0.47	0.38	0.32	0.28	0.26
0.24	0.25	0.27	0.29	0.32	0.36	0.38	0.36	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20	0.19
0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.18	0.17	0.16	0.16
0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13
0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11
0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10

TABELA 4 - Resultados da simulação sem influência do rio.

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 360 Dias

0.53	0.54	0.56	0.58	0.62	0.67	0.71	0.72	0.71	0.68	0.65	0.63	0.60	0.59
0.52	0.53	0.55	0.58	0.63	0.71	0.76	0.77	0.74	0.70	0.65	0.61	0.58	0.57
0.52	0.53	0.56	0.61	0.71	0.85	0.94	0.91	0.84	0.75	0.68	0.61	0.57	0.55
0.51	0.53	0.57	0.64	0.82	1.11	1.35	1.19	0.98	0.81	0.68	0.60	0.55	0.52
0.47	0.49	0.54	0.63	0.90	1.50	3.58	1.59	1.07	0.79	0.63	0.54	0.48	0.45
0.41	0.43	0.46	0.51	0.63	0.83	1.00	0.87	0.70	0.56	0.47	0.41	0.37	0.35
0.34	0.34	0.36	0.38	0.40	0.44	0.46	0.44	0.40	0.36	0.32	0.30	0.28	0.27
0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32	0.31	0.29	0.28	0.26	0.24	0.23	0.23
0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.20
0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18
0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17
0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16

TABELA 5 - Resultados da simulação sem influência do rio.

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 1.06 Dias

0.00	0.11	0.20	0.27	0.35	0.45	0.51	0.54	0.53	0.51	0.49	0.46	0.44	0.43
0.00	0.12	0.21	0.29	0.39	0.51	0.58	0.60	0.59	0.55	0.51	0.47	0.44	0.43
0.00	0.13	0.24	0.33	0.47	0.66	0.77	0.76	0.70	0.61	0.54	0.48	0.44	0.43
0.00	0.13	0.26	0.37	0.60	0.93	1.19	1.05	0.85	0.69	0.56	0.48	0.43	0.40
0.00	0.13	0.25	0.39	0.70	1.34	3.44	1.47	0.96	0.69	0.53	0.43	0.38	0.35
0.00	0.11	0.21	0.30	0.46	0.70	0.89	0.77	0.60	0.47	0.38	0.31	0.28	0.26
0.00	0.08	0.15	0.22	0.27	0.33	0.36	0.35	0.31	0.27	0.24	0.21	0.20	0.19
0.00	0.06	0.11	0.15	0.19	0.21	0.23	0.23	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16	0.15
0.00	0.05	0.09	0.12	0.14	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
0.00	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11
0.00	0.03	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
0.00	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10

TABELA 6 - Resultados da simulação sem influência do rio

Rebaixamentos (m)  
Tempo = 360 Dias

0.00	0.07	0.14	0.21	0.30	0.42	0.52	0.57	0.60	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55
0.00	0.08	0.16	0.23	0.34	0.49	0.59	0.64	0.64	0.63	0.60	0.57	0.55	0.54
0.00	0.09	0.18	0.27	0.42	0.63	0.77	0.79	0.75	0.69	0.63	0.58	0.55	0.53
0.00	0.10	0.20	0.32	0.55	0.91	1.20	1.08	0.90	0.75	0.64	0.57	0.52	0.50
0.00	0.10	0.21	0.34	0.66	1.31	3.45	1.50	1.01	0.74	0.60	0.51	0.46	0.43
0.00	0.09	0.17	0.26	0.43	0.69	0.90	0.79	0.64	0.52	0.44	0.38	0.35	0.33
0.00	0.06	0.13	0.19	0.26	0.33	0.38	0.38	0.36	0.33	0.30	0.28	0.26	0.25
0.00	0.05	0.10	0.14	0.18	0.22	0.25	0.26	0.25	0.25	0.23	0.23	0.22	0.21
0.00	0.04	0.08	0.11	0.14	0.17	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19
0.00	0.03	0.06	0.09	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
0.00	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15