

Características hidráulicas das camadas aquíferas da Formação Guabirota e o potencial explorável na região da Bacia do Iraí, Curitiba - Paraná

Hydraulic characteristics of the aquifer beds of the Guabirota Formation and its exploitable potential in the Iraí Basin region, Curitiba – Paraná

ERNANI FRANCISCO DA ROSA FILHO *, EDUARDO CHEMAS HINDI *, LUIZ EDUARDO MANTOVANI * GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE**

* UFPR/DEGEOL/LPH – Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas

** Doutorando em Geologia na UFPR

Resumo

O objetivo do trabalho é determinar as características hidráulicas das camadas aquíferas da Formação Guabirota e o potencial explorável na região da Bacia Hidrográfica do Iraí, mais especificamente de uma área da sub bacia do Canguiri. Para alcançar estes objetivos é estabelecido a potenciométrica das águas armazenadas na Formação Guabirota e através delas estabelecidas as direções principais de fluxos, caracterizando as áreas de descarga do aquífero. A área de estudo está situada 15 km de quilômetros de Curitiba, na sua porção nordeste, ao entorno da barragem do Iraí. Esta formação é predominantemente constituída por pelitos, sendo que na sua base, especificamente na área de estudo, ocorrem camadas de areias e de cascalhos com espessuras que variam entre 10 e 15 m. Num único poço perfurado nesses sedimentos foi extraída uma vazão de 80 m³ x h⁻¹, tendo ocorrido a precipitação de ferro e manganês nas aberturas das secções filtrantes; o aproveitamento dessas águas exige tratamentos contínuos para a eliminação dos elementos mencionados. O resultado da simulação matemática mostra que as águas do lago do Iraí recarregam o aquífero, sendo seu escoamento em direção contrária ao escoamento das águas freáticas e das águas da rede de drenagem da região. A porosidade efetiva dos sedimentos que constituem os arenitos arcoseanos é em média 28% e o coeficiente de armazenamento é cerca 5 x 10⁻⁴, a permeabilidade gira entre 1,22 x 10⁻⁴ e 1,96 x 10⁻⁴ m x s⁻¹, a transmissividade varia de 3,6 a 7,6 m² x h⁻¹, a velocidade média de fluxo varia de 6 x 10⁻³ a 3 x 10⁻⁶ m x s⁻¹ e a vazão explorável através de uma bateria de 15 poços tubulares corresponde a 150 L x s⁻¹.

Palavras-chave: aquífero Guabirota; Iraí; água subterrânea

Abstract

The main objective of this work is to determine the hydraulic characteristics of the aquifers layers of Lower Pliocene sedimentary sequences in Guabirota Formation and by this way evaluate the exploitable groundwater potential in the Upper Iguazu Iraí river basin. To achieve these goals the potentiometry of water stored in Guabirota formation was established to set the main directions of groundwater flows, characterizing the discharge areas of the aquifer. The study area is located 15km NNE from Curitiba urban area, at the vicinity of the Iraí river dam. The Guabirota Formation consists predominantly of clays (aluminous smectites and interstratified), and at its lower level, specifically in the study area, there are unconsolidated sands and gravels layers with a thickness ranging between 10 to 15m. In a single tube well drilled in these sediments the discharge range was of 80 m³ x h⁻¹, its waters show precipitation of iron and manganese in the filter sections. So that the use of such water requires continuous treatment to eliminate these elements. The mathematics simulations show the contributions of Lake Iraí waters to the recharge of Guabirota aquifers. Their flow is in the opposite direction of the groundwater flow, and also opposite to the general discharge direction of the water drainage network in this region. The granules effective porosity in arcosean sandstone is 28% in average, and the storage coefficient is about 5 x 10⁻⁴, permeability varies between 1.22 x 10⁻⁴ and 1.96 x 10⁻⁴ m x s⁻¹, the transmissivity varies from 3.6 to 7.6 m² x h⁻¹, the mean flow velocity ranges from 6 x 10⁻³ to 3 x 10⁻⁶ m x s⁻¹ and the total exploitable discharge for a battery of 15 tube wells corresponds to 150 L x s⁻¹.

Keywords: Guabirota aquifer; Iraí, Groundwater

1. Introdução

Em épocas que cada gota de água se torna imprescindível, todas as possibilidades de captação de mananciais superficiais e subterrâneos são importantes. Já houve períodos de estiagens na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) que tornou necessária até a captação das águas armazenadas em algumas cavas existentes na calha do rio Iguaçu, sem a qual não haveria a possibilidade de fornecimento de água para uma parcela da população de Curitiba. Em tendo sido possível captar este tipo de manancial, tratando-o adequadamente para o consumo humano, as águas armazenadas nas camadas aquíferas da Formação Guabirubata também não devem ser descartadas, mesmo com a comumente ocorrência de seus elevados teores de ferro e de manganês. Em se tratando de águas que se encontram armazenadas nos interstícios de seus grânulos, é importante o conhecimento de suas fontes de recarga, que neste caso específico, também indicam ser provenientes do lago da barragem do Irai.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização dos parâmetros hidráulicos das camadas aquíferas da Formação Guabirubata e por meio deles determinar o potencial explotável através de simulação matemática, na sub bacia do Canguiri, afluente da margem direita do rio Irai.

3. Região de estudo

3.1. Localização

A região sobre a qual foram desenvolvidos os estudos, está localizada aproximadamente 15 km a nordeste da cidade de Curitiba, nas proximidades do Parque de Exposição Castelo Branco, no município de Pinhais-PR, Brasil. O Mapa de localização da área, incluindo a delimitação da barragem do Irai e a área investigada, é mostrado na figura 1.

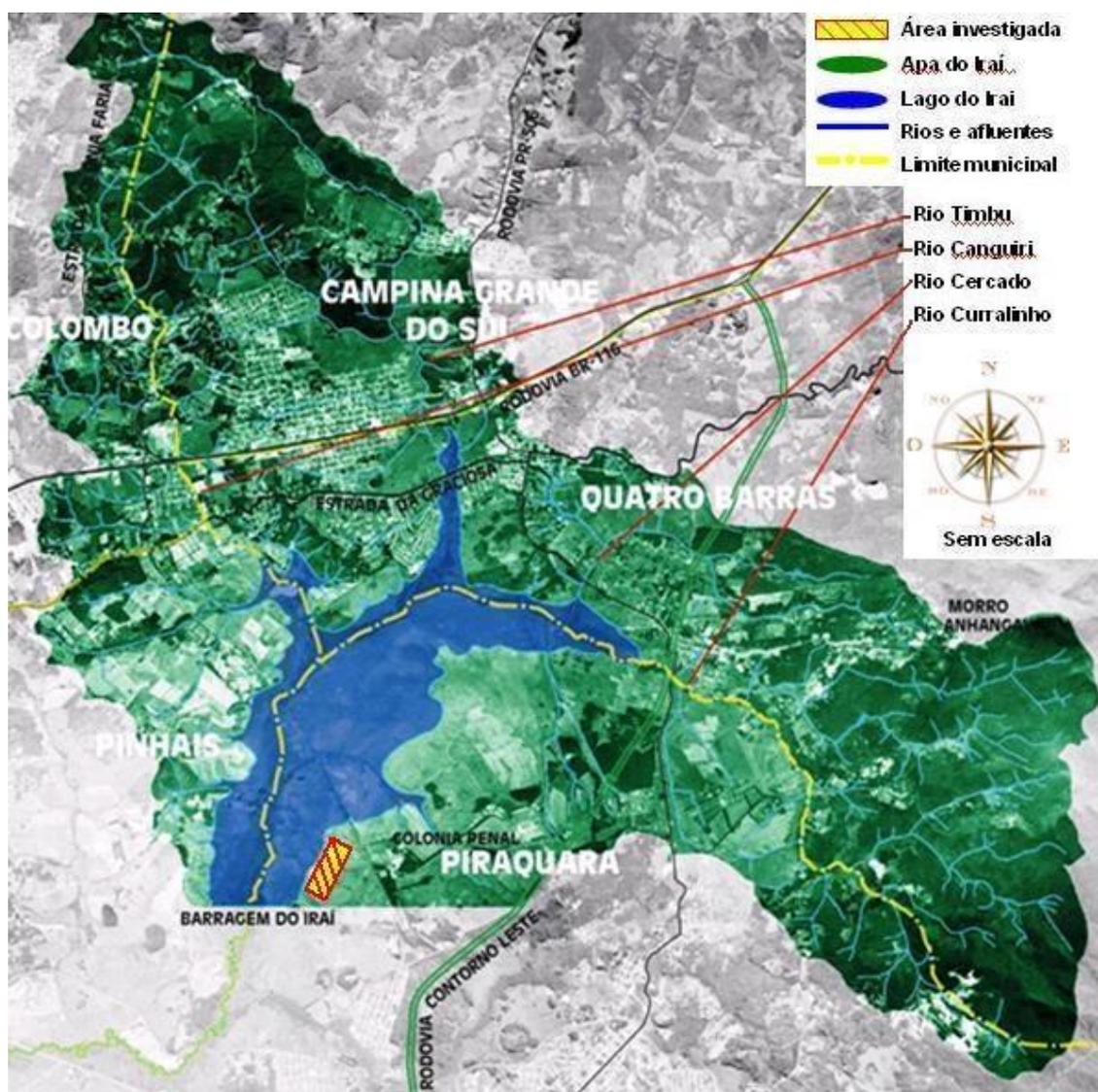


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

3.2. Geologia

A área de abrangência de estudo é representada pelos sedimentos da Formação Guabirotuba. Esta formação encontra-se assentada sobre migmatitos e rochas similares que constituem o Complexo Atuba, também comumente denominadas de Embasamento Cristalino.

As primeiras considerações sobre a litologia, espessura, idade, rocha-fonte e origem dos sedimentos da Bacia de Curitiba foram referenciadas por OLIVEIRA e LEONARDOS (1943). De acordo com CARVALHO (1936), nas bordas da bacia predominam cascalhos grosseiros e na sua parte central, sedimentos argilosos com intercalações de areia grossa; os autores op. cit., interpretam essas ocorrências como consequência de uma deposição em ambiente fluvial meandrante com sucessivos ciclos recorrentes de regime de baixa e elevada energia. Dentre outros trabalhos, igualmente relevantes sobre o assunto, destacam-se OLIVEIRA e LEONARDOS (1943), MAACK (1947), ALMEIDA (1952), COUTINHO (1955), BIGARELLA & SALAMUNI (1952a; 1959; 1962), BIGARELLA J.J.; AB SABER & BIGARELLA (1961), BIGARELLA (1971), LOPES (1966), MURATORI (1966), MARINI (1967), FUCK (1966; 1967a), TREIN (1969), BERG e LOURENÇO (1973), BECKER (1982), PETRI & FULFARO (1983), SALAMUNI (1988) e SALAMUNI e STELLFELD (2001).

Os sedimentos da Bacia de Curitiba, excetuando-se os depósitos aluvionares recentes, constituem a Formação Guabirotuba. BECKER (1982), com base em critérios geomorfológicos, propôs a subdivisão desta formação em três unidades distintas, a saber: a) Formação Guabirotuba (sedimentos basais); b) Formação Tinguis (sequência superior); e c) Formação Boqueirão (sedimentos arenáceos, discordantes dos migmatitos). Segundo esta autora, a Formação Boqueirão, especificamente, teria sido depositada durante o Pleistoceno Superior, num ambiente de amplos vales com canais anastomosados prevaescentes sob condições climáticas mais severas, as quais precederam o clima atual, responsável pela deposição dos aluviões modernos.

MURATORI et al (1982), com base em estudos gravimétricos, acrescentam que a paleogeografia da região esteve sob a ação de uma tectônica recente, o que teria influenciado de forma significativa no represamento dos sedimentos. A maior parte dos depósitos aluvionares da região, os quais encontram-se inclusive orientados segundo drenagens condicionadas às direções de fraturamentos do embasamento cristalino, aliados à existência de pequenas falhas geológicas na Formação Guabirotuba, permitem sugerir a ação de neotectonismo na Bacia de Curitiba.

SALAMUNI (1988) aponta, dentre outras considerações, a existência de um controle morfotectônico evidenciado pela posição discordante das porções do embasamento em relação aos sedimentos da Formação Guabirotuba.

Resultados de análises granulométricas de amostras de superfície realizadas por ARCHELA (1986), demonstram predominância da fração argilosa sobre a fração com granulometria superior a 0,062 mm. Com referência ao material arenoso, predomina a fração grossa, na faixa de 57

%, enquanto cerca de 37% apresenta diâmetro médio correspondente a areia média e apenas 6 % de areia fina. De acordo com a classificação de Shepard é destacado dois grupos granulométricos distintos na Formação Guabirotuba; um de granulação mais grossa, constituído por areias, areias sílticas e areias sílticas-argilosas, e outro de granulação mais fina, constituído por argilas sílticas e silte argiloso. É destacado, neste mesmo estudo, que as porcentagens de feldspatos em relação aos minerais de quartzo, chegam a atingir valores superiores a 50 %.

Os sedimentos da Bacia de Curitiba, excetuando-se os depósitos aluvionares recentes, constituem a Formação Guabirotuba, a qual teria sido depositada durante o Plio-pleistoceno Superior, num ambiente de amplos vales com canais anastomosados (Bigarella e Salamuni 1958a). Trata-se predominantemente de sedimentos pelíticos, situados em sua maior parte na sequência de topo, ocorrendo localmente lentes de areias arcoseanas, geralmente na sua porção basal. Os sedimentos da Formação Guabirotuba atingem espessuras máximas da ordem de 80 m na porção central da Bacia de Curitiba. Os sedimentos pelíticos são predominantes, sendo que as camadas arcoseanas, com estratificações incipientes, ocorrem sob a forma tabular e não raramente lenticular.

3.3. Hidrogeologia da Formação Guabirotuba

A área com melhores características hidrogeológicas da Formação Guabirotuba está inserida na Bacia Hidrográfica do Irai, mais especificamente na sub bacia do rio Canguiri. Nesta área está mapeada uma estrutura do tipo graben, sobre a qual estão depositados os sedimentos mais grossos da Formação Guabirotuba. Estes sedimentos ocorrem sob a forma de lentes descontínuas e de camadas contínuas constituídas por areias arcoseanas e cascalhos cujas espessuras variam entre 4 e 15 m. Existe, nesta área, uma bateria de poços perfurados pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), cuja produção de cada poço gira em torno de 20 L x s⁻¹. É importante destacar que estes poços encontram-se lacrados por consequência da precipitação de ferro e manganês junto as aberturas dos filtros.

3.3.1. POROSIDADE

A porosidade foi determinada através de um Perfil Sônico, realizado pela HIDROLOG - Serviços de Perfilagens Ltda, corrido no poço nº 2 da Estação Experimental de Pesquisas Hidrogeológicas da UFPR, na Fazenda Canguiri (Girão Nery e Rosa Filho, 1994). O referido perfil sônico corresponde apenas ao intervalo composto por areias arcoseanas, entre 34 e 41 m de profundidade.

De acordo com GIRÃO NERY (1994), a equação que permite a determinação da porosidade através de perfis sínicos pode ser representada da seguinte forma:

$$P = \frac{(t - tma)}{(tf - tma)} \cdot \frac{(100)}{(tsh)} \quad (1)A$$

onde, P = porosidade percentual calculada com sônico; t = tempo do som lido defronte ao aquífero (em us/pé); t_{ma} = tempo do som nos grãos ou matriz do aquífero (arenito = 55,5 us/pé); t_f = tempo do som no fluido intersticial do aquífero (água doce = 200 us/pé); tsh = tempo do som nos siltitos (valor razoável para a área = 180 us/pé).

O tempo de trânsito registrado no intervalo entre 34 e 41 m, corresponde a 155-156 microsegundos/pé. A aplicação destes valores na equação 1, aponta uma porosidade total da ordem de 38-39 %, que de acordo com a hipótese de LEVORSEN (1954), a porosidade efetiva corresponderia a um valor em torno de 35 %. Com tal porosidade e uma espessura média de 10 m de areias arcoseanas, numa área de apenas 10x 106 m² (por exemplo, 1000 m x 1000 m), encontra-se armazenado e disponível nas camadas aquíferas da Formação Guabirotuba um volume da ordem de 3.500.000 m³ de água.

3.3.2. COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

O valor do coeficiente de permeabilidade foi obtido através de ensaios de bombeamento e calculado com a fórmula de THEIS (1935; eq. 2).

A espessura das camadas aquíferas (b) foi considerada como sendo igual a extensão dos filtros (h_s) que foram instalados em cada poço. De acordo com os poços analisados, as espessuras do aquífero na região e seus correspondentes coeficientes de permeabilidade, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de permeabilidade das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba.

Poço	$b = h_s$ (m)	K (m x s ⁻¹)
Nº 7	12	$1,22 \cdot 10^{-4}$
Nº 8	12	$1,96 \cdot 10^{-4}$
Nº 3	16	$1,32 \cdot 10^{-4}$

3.3.3. COEFICIENTE DE TRANSMISSIVIDADE

O valor do coeficiente de transmissividade do aquífero foi obtido através de ensaios de bombeamento e calculado com a fórmula de THEIS (1935; eq. 2), para uma condição de regime de bombeamento não-estabilizado. A referida fórmula é apresentada da seguinte forma:

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u) = \frac{0,0795 \cdot Q}{T} \cdot W(u) \quad (2)$$

onde, s = rebaixamento em metros, em qualquer ponto nas proximidade do poço bombeado com vazão constante; Q = vazão do poço, em m³ x h⁻¹; T = coeficiente de transmissividade; m² x h⁻¹; $W(u)$ = "função u do poço", provém da seguinte integral:

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{(e^{-u})}{u} \cdot du = -0,5772 - \log_e u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \quad C$$

Nesta expressão,

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t}$$

onde, r = distância do centro do poço bombeado ao ponto onde é medido o rebaixamento em metros (m); S = coeficiente de armazenamento (adimensional); T = coeficiente de transmissividade, m³ x h⁻¹ por metro de rebaixamento (ou m² x h⁻¹); t = tempo a partir do início do bombeamento, em horas.

Os poços e os respectivos piezômetros com os quais foram desenvolvidos os ensaios de aquífero, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Poços e piezômetros utilizados no teste de aquífero.

Poço	Piezômetro	Vazão (m ³ x h ⁻¹)	Duração (h)	Distância (m)
I-07	I-05	31,70	26	15
I-07	I-05	18,40	4	15
I-03	I-05	28,80	24	164
I-08	I-04	19,80	20	350
I-08	I-09	19,80	20	320

Os valores de sobreposição dos rebaixamentos com a Curva de Theis, a partir dos quais foram calculados os coeficientes de transmissividade das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba, são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Valores obtidos para o coeficiente de transmissividade, utilizando o método de Theis.

$W(u)$	$1/u$	s (m)	t (min)	T (m ² x h ⁻¹)
4,25	200	2	100	5,30
2,00	12	0,62	47	4,72
0,80	29	0,24	26	7,63
0,70	2,5	0,13	500	8,47
1,00	3,7	0,43	280	3,66

3.3.4. COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO

Os valores dos coeficientes de armazenamento do aquífero foram obtidos através de ensaios de bombeamento e calculados com a fórmula de THEIS (eq. 2). Os resultados são apresentados na tabela 4.

O sentido geral de escoamento das águas das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba, é de sudeste para nordeste. Entre os poços I-9 e I-7 e entre I-9 e I-3, os valores dos gradientes hidráulicos são da ordem de 6 x 10⁻³ e 1x 10⁻², respectivamente. Este condicionamento pode ser visualizado na figura 2, onde está bem detalhada a diferença de potencial do ponto "LEIT", cuja altura potenciométrica é igual a 879 m, em relação ao ponto "AR-3", onde a cota potenciométrica é igual a 875 m. A direção de escoamento é ortogonal às linhas equipotenciais.

Tabela 4 – Valores obtidos para o coeficiente de armazenamento, utilizando o método de Theis.

Poço	Piezômetro	Coefic. de arnaz.
Nº 7	nº 5	$7,8 \cdot 10^{-4}$
Nº 7	nº 5	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Nº 3	nº 5	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Nº 3	nº 8	$9,2 \cdot 10^{-4}$
Nº 8	nº 9	$2,0 \cdot 10^{-4}$

3.3.5. VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

A velocidade real V_R varia de um ponto a outro no aquífero. Em média, a velocidade real que a água escoa através dos interstícios de um aquífero poroso é dada pela seguinte expressão:

$$V_R = \frac{V_a}{n}$$

onde n é a porosidade do aquífero expressa em fração decimal, V_R representa, em média, a velocidade com que um indicador se deslocaria através de um meio poroso. No caso de aquíferos constituídos de partículas muito finas, o n é substituído pela porosidade efetiva m_e .

As velocidades do fluxo subterrâneo nas camadas aquíferas da Formação Guabirota, na região delimitada pelos poços existentes, variam entre 6×10^{-3} e 3×10^{-6} m x s-1. É interessante destacar que o fluxo ocorre da carga hidráulica mais elevada em direção a carga menos elevada, no sentido ortogonal as linhas equipotenciais.

3.3.6. RECARGA DO AQUIFERO

A variação da precipitação e da evaporação no decorrer do ano afeta diretamente a capacidade de infiltração e de recarga das camadas aquíferas da Formação Guabirota, a partir do aquífero livre. A recarga ocorre quando existe um excedente da precipitação em relação à evapotranspiração e ainda assim somente quando o solo encontra-se totalmente saturado segundo a sua capacidade máxima de retenção.

Considerando que a precipitação média anual é em torno de 1.400 mm, que a evapotranspiração no mesmo período é igual a 679 mm e que o volume respectivo à capacidade de campo é igual a 150 mm, a diferença entre o índice anual de chuvas em relação aos demais fatores é da ordem de 154 mm por ano. Este valor, o qual constitui um volume de 22.075.200 m3 por ano ou o equivalente a 5 L x s-1 x km2, representa o volume que o aquífero livre cede sob a forma de recarga para as camadas aquíferas da Formação Guabirota. A disponibilidade das águas subterrâneas, em termos de vazão, das camadas aquíferas da Formação Guabirota, na área de abrangência da bacia hidrográfica do Iraí, gira em torno de 700 L x s-1.

A recarga das camadas aquíferas foi calculada com o modelo matemático de UDLUFT (1988), a partir dos dados hidro-climatológicos respectivos ao período 1984 - 1993. Para a aplicação deste modelo, foi considerado 150 mm como valor para a capacidade de campo útil do solo e um grau de saturação do mesmo, respectivo ao mês de janeiro de 1984, de 100%. Os resultados são apresentados na tabela 5.

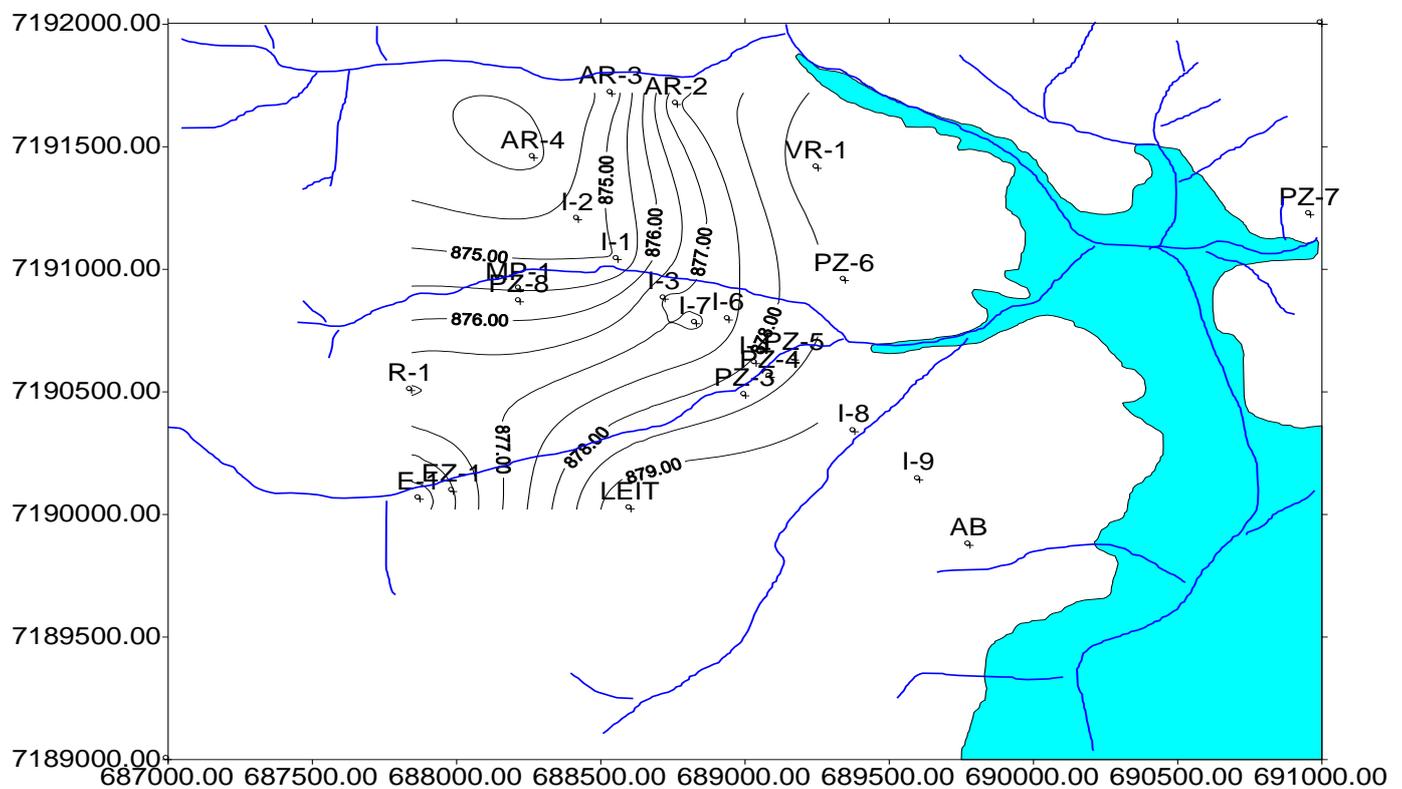


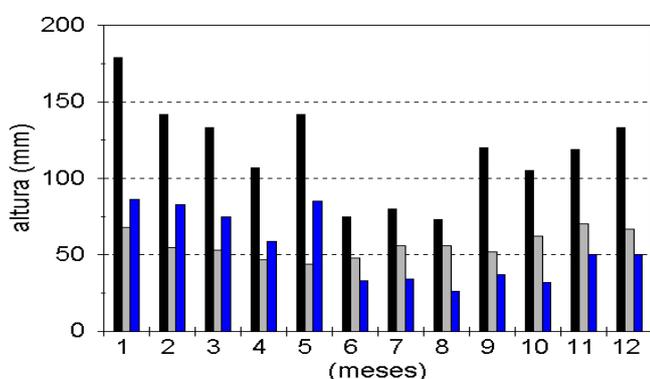
Figura 2 – Linhas equipotenciais das camadas aquíferas da Formação Guabirota (a cor azul clara representa a área alagada da barragem do Iraí).

Tabela 5 – Distribuição da recarga (mm), período 1984-1993, calculada com o modelo MODBIL (UDLUFT, 1988).

Ano	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	Med
Jan	59	21	11	32	61	13	205	50	14	17	86
Fev	0	16	61	82	13	92	33	52	78	13	83
Mar	93	44	54	0	82	53	117	13	10	69	75
Abr	12	25	83	71	76	88	71	0	0	58	59
Mai	39	0	36	20	21	66	30	0	13	12	85
Jun	48	0	0	60	29	23	70	74	0	25	33
Jul	0	0	0	0	0	74	175	0	63	30	34
Ago	98	0	5	0	0	0	77	0	79	0	26
Set	30	0	16	0	0	80	61	0	3	17	37
Out	0	8	26	38	0	0	77	46	0	11	32
Nov	11	0	14	0	0	0	140	0	10	0	50
Dez	57	0	16	24	0	12	0	67	11	51	50
Soma	65	26	70	51	59	73	1055	42	59	95	649

Nos meses de junho a outubro, a infiltração é menos efetiva. Neste período, o somatório das alturas d'água que recarregam as camadas aquíferas da Formação Guabirotuba corresponde a 162 mm, enquanto a precipitação é de 453 mm e a evaporação real ou atual é igual a 274 mm. O somatório médio dos índices mais elevados da recarga subterrânea, correspondente aos meses de janeiro a maio, atinge 388 mm. A precipitação e a evaporação real, neste período, correspondem a 740 mm e 267 mm, respectivamente.

A relação entre a recarga, a precipitação e a evaporação real pode ser visualizada na figura 3.

**Figura 3** – Alturas médias anuais da precipitação, da evaporação real e da infiltração, respectivamente.

Com a finalidade de exemplificar a distribuição da recarga no decorrer do tempo, a partir dos cálculos obtidos com o modelo matemático MODBIL (UDLUFT, 1988), é apresentada a tabela 6.

3.4. Simulação matemática

A maior dificuldade para simular a variação da potencimétrica das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba, a partir do bombeamento de uma bateria de poços, deve-se a qualidade dos dados existentes. Esses

dados referem-se as alturas do terreno para o estabelecimento das cotas potencimétricas, a correlação estratigráfica baseada nos perfis litológicos dos poços, a carência de dados sobre a qualidade das águas subterrâneas e a definição da extensão da estrutura geológica do tipo graben existente na área. Por estas razões, considera-se ainda necessária a perfuração de mais piezômetros na região, bem como a execução de caminhamentos elétricos para delimitar a extensão da estrutura geotectônica e a conformação da potencimétrica hidráulica do aquífero na região.

Os dados que permitiram a elaboração do mapa potencimétrico da região, foram extraídos da tabela 7.

Tabela 6 – Distribuição da recarga mensal em milímetros (exemplo do período 1984-1985) com início no mês de janeiro de 1984. CC = capacidade útil de campo (150 mm); CSS = condição de saturação inicial do solo (inicial = 100%); P = precipitação; Ek = evaporação real; Rc = recarga.

Mês	P (mm)	Ek (mm)	P - Ek (mm)	CSS (mm)	Rc (mm)
1	149	85.0	58.8	150.0	58.8
2	55	72.7	-17.9	132.1	0.0
3	174	54.7	110.6	150.0	92.7
4	174	45.0	120.3	150.0	120.3
5	91	51.0	39.0	150.0	39.0
6	109	59.0	48.1	150.0	48.1
7	47	64.0	-17.1	132.0	0.0
8	172	48.8	114.9	150.0	97.9
9	110	78.0	30.1	150.0	30.1
10	39	75.9	-37.0	113.0	0.0
11	218	50.0	149.8	150.0	112.8
12	121	61.0	57.4	150.0	57.4
13	86	64.0	21.2	150.0	21.2
14	240	49.0	166.0	150.0	166.0
15	95	50.0	43.8	150.0	43.8
16	68	43.0	24.6	150.0	24.6
17	14	57.2	-43.2	106.8	0.0
18	44	52.3	-8.4	98.4	0.0
19	20	46.0	-26.0	72.4	0.0
20	7	52.3	-45.3	27.1	0.0
21	139	36.0	98.9	126.0	0.0
22	102	68.3	32.2	150.0	8.2
23	49	84.6	-35.7	114.3	0.0
24	72	79.4	-7.9	106.4	0.0

A distribuição das cotas potencimétricas das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba na região de estudo, tal como mostrada na figura 2, foi calculada pelo método de Regressão Polinomial de Terceira Ordem (cubic surface). As linhas equipotências mostram que o escoamento preferencial do fluxo subterrâneo é de sudeste (cota 879 m) para noroeste (cota 875 m). As principais zonas de recarga, neste caso, correspondem às áreas onde ocorrem os sedimentos recentes constituídos por aluviões, cujas espessuras máximas são da ordem de 4 m, e que se

Tabela 7 – Dados de cotas (potenciométrica, topo do migmatito, base dos sedimentos).

Coord.	(ATM)	Código do poço	Cota do terreno (m) *	Nível potenci. (m) *	Topo migmat. (m) *	Base do sediment (m) *	Nível Hidrost. (m)
689779,7	7189874	AB					14,04
688765,3	7191672	AR-2	891,421	877,391	860,0	866,0	14,03
688538,7	7191716	AR-3	895,162	874,702	859,0	864,0	20,46
688268,8	7191454	AR-4	906,241	873,911	860,0	865,0	32,33
687873,1	7190062	E-1	901,833	875,153	866,0	871,0	26,68
687988,8	7190093	EZ-1					
688559,6	7191039	I-1	898,647	874,997	843,0	859,0	23,65
688422,3	7191202	I-2	909,932		859,0	866,0	
688722,9	7190878	I-3	898,401	877,161	849,0	860,5	21,24
689038,8	7190615	I-4	893,445		843,0	863,0	
688044,8	7190793	I-6	897,762		853,0	863,9	
688831,3	7190778	I-7	898,635	876,845	853,0	863,0	21,79
689380,9	7190337	I-8	890,927		840,0	862,8	
689605,3	7190141	I-9	894,330		841,0	864,0	
688604,6	7190022	Leit.	901,811	879,631			22,18
688220,8	7190918	MP-1	903,831		850,0	858,9	

encontra em contato com as camadas aquíferas da Formação Guabirota (areias arcoseanas). O fluxo das águas subterrâneas em direção as áreas de descarga, supõe-se, alimenta as descontinuidades geoestruturais dos migmatitos, subjacentes. As águas do reservatório do Iraí, funcionaria como fonte de recarga artificial para as camadas aquíferas da Formação Guabirota.

A modelação matemática foi realizada com o modelo "Processing MODFLOW", version 2.2. Os resultados mostram, numa primeira análise, as direções dos fluxos obtidos a partir das alturas potenciométricas medidas diretamente nos poços existentes, e as direções de escoamentos obtidas com os dados introduzidos no programa (espessuras e extensão das camadas saturadas, parâmetros hidráulicos, recarga do aquífero, etc). Embora as diferenças nas formas das equipotenciais, o escoamento geral da água subterrânea é, em ambos os casos, de sudeste para noroeste, tal como pode ser visualizado na figura 4.

A direção do fluxo subterrâneo das águas que ocorrem nas camadas aquíferas da Formação Guabirota, tal como mostrado na figura 3 e 4, é contrária à direção de fluxo das águas freáticas, as quais acompanham a morfologia do terreno, e das águas superficiais.

Para compensar a carência de dados e facilitar a simulação, foram introduzidos "dados auxiliares" nas partes que constituem os cantos do quadrado e em alguns pontos nos rios Iraí e Canguiri. Estes dados são apresentados na tabela 8.

Diante das dificuldades em adequar o modelo segundo as condições naturais do terreno, adotou-se as seguintes considerações:

a) A diferenciação da morfologia em termos de alturas do terreno, base e espessura das camadas aquíferas;

b) A inclinação hidráulica acentuada do aquífero superior, fazendo com que as águas do reservatório hipodérmico (ou interflow) escoem rapidamente para os córregos da região;

c) A camada de sedimentos foi admitida como tendo 50 m de espessura e sendo constituída por uma mistura de areia-silte-argila. A modelação do nível potenciométrico foi feita através de uma relação direta entre a recarga do aquífero e as áreas estabelecidas como de potencial fixo;

d) A segunda camada foi modelada como sendo constituída de uma mistura de areias e argilas, cuja espessura considerada foi de 10 m. Na área próxima do rio Iraí, considerou-se uma redução desta camada de areias-argilas e na modelagem, nas mesmas áreas, foram feitas compensações através dos valores da permeabilidade vertical ($8 \times 10^{-8} \text{ m x s}^{-1}$);

e) Como potencial fixo foi considerado para a primeira camada o nível da água dos rios Canguiri e Iraí. A potenciométrica inicial foi extraída da própria carta topográfica (escala 1:10.000) que por sua vez não apresenta dados muito confiáveis. Na primeira e na segunda camada, foi simulado o potencial fixo apenas para o rio Iraí.

f) A recarga nas camadas aquíferas da Formação Guabirota foi admitida como sendo da ordem de $4 \text{ L x s}^{-1} \text{ x km}^2$. As águas, a princípio, escoam para a região norte onde as distribuições das isolinhas (potenciométrica) não se apresentaram de forma nítida. Nestas áreas foram necessárias acréscimos de "pontos de ajuda".

g) A descarga para norte foi simulada por meio da reservação de três camadas, sendo que no modelo foram admitidos vários poços organizados em fileiras com vazões variando de $0,00015$ até $0,00005 \text{ L x s}^{-1}$. Na área em questão, foi simulada a extração de 30 L x s^{-1} , o que corresponde a 70-80% da recarga.

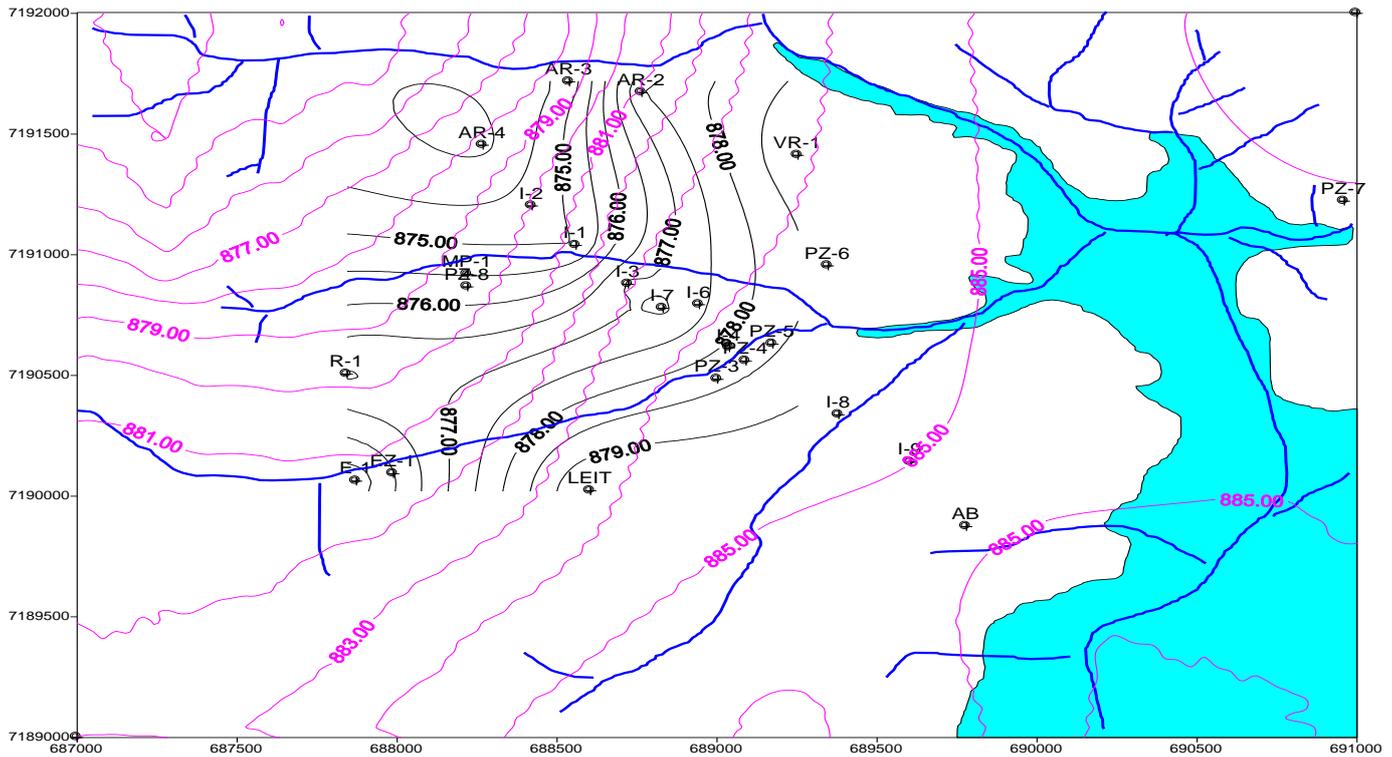


Figura 4 – Linhas equipotenciais das camadas aquíferas da formação guabirotuba. obs: as linhas pretas foram traçadas com dados medidos nos poços; as linhas roxas representam o resultado da aplicação de dados mostrados na tabela 8.

Tabela 8 – “Dados auxiliares” utilizados na simulação.

	Espes (m)	Aquífero	Poros.	Perm. H (mxs ⁻¹)	Perm. V (mxs ⁻¹)	Potenc. fixo	Descar. (Lxs ⁻¹)	Recarg. (Lxs ⁻¹ x km ²)
Camad.1	50	Freático	0,20	1•10 ⁻⁴	1•10 ⁻⁷	Iraí, Can.		13
Camad.2	5-10	Freático	0,20	5•10 ⁻⁹	5•10 ⁻⁸	Iraí		
Camad.3	5-20	Semiconf	0,28	5•10 ⁻⁴	5•10 ⁻⁵	Iraí	40	

O resultado da modelação básica, incluindo o balanço da água, é apresentado na figura 5. O resultado mostra uma situação muito semelhante com a realidade. Percebe-se também um divisor de águas subterrâneas entre o poço AB (Adalto Botelho) e o poço Iapar 9 (I-9), e uma grande perda d'água proveniente da recarga na parte norte da área em que foi feita a simulação.

A modelação demonstrada na figura 6, simula a exploração da água armazenada nas camadas aquíferas da Formação Guabirotuba, próxima dos poços I-8 e I-9, através de vinte poços tubulares, cada qual produzindo entre 5 e 10 L x s⁻¹. O rebaixamento potenciométrico resultante é igual a 20 m. Estes dados, todavia, não permitem afirmar se sob este regime de bombeamento o aquífero permanecerá hidráulicamente confinado ou semiconfinado; os indícios são de que o rio Iraí funcionará como fonte de recarga do reservatório subterrâneo. Embora conste na figura 6 a existência do lago Iraí, a simulação matemática foi inicialmente realizada sem a carga imposta pelas águas do referido reservatório.

A modelação demonstrada na figura 7 simula a extração da água das camadas aquíferas da Formação Guabirotuba com a existência do lago cuja altura da lâmina d'água corresponde a 888 m acima do nível do mar. A extração de

150 L x s⁻¹ resulta numa depressão de alguns metros sob condição de aquífero confinado.

A construção das duas galerias de poços, cada uma com 10-15 poços ao longo do futuro lago do Iraí, está localizada entre 100-200 m de distância do mesmo. Esta é a melhor condição para a recarga artificial proveniente do lago artificial.

4. Conclusão

A direção de escoamento das águas armazenadas nas camadas aquíferas da Formação Guabirotuba é contrária a da rede de drenagem e a do fluxo das águas freáticas. O lago Iraí representa uma fonte de recarga das camadas aquíferas do Guabirotuba, assim como a precipitação que, neste caso, é efetiva apenas onde as camadas mais grosseiras de materiais clásticos afloram na superfície do terreno.

A extração de 150 L x s⁻¹ resultará num rebaixamento potenciométrico de 20 m ao entorno de uma bateria composta de 10 a 15 poços.

Embora a hidroquímica não seja objeto deste trabalho, é interessante destacar que a extração da água por meio de poços tubulares exigirá procedimentos para a retirada dos precipitados de ferro e manganês das secções filtrantes dos poços tubulares.

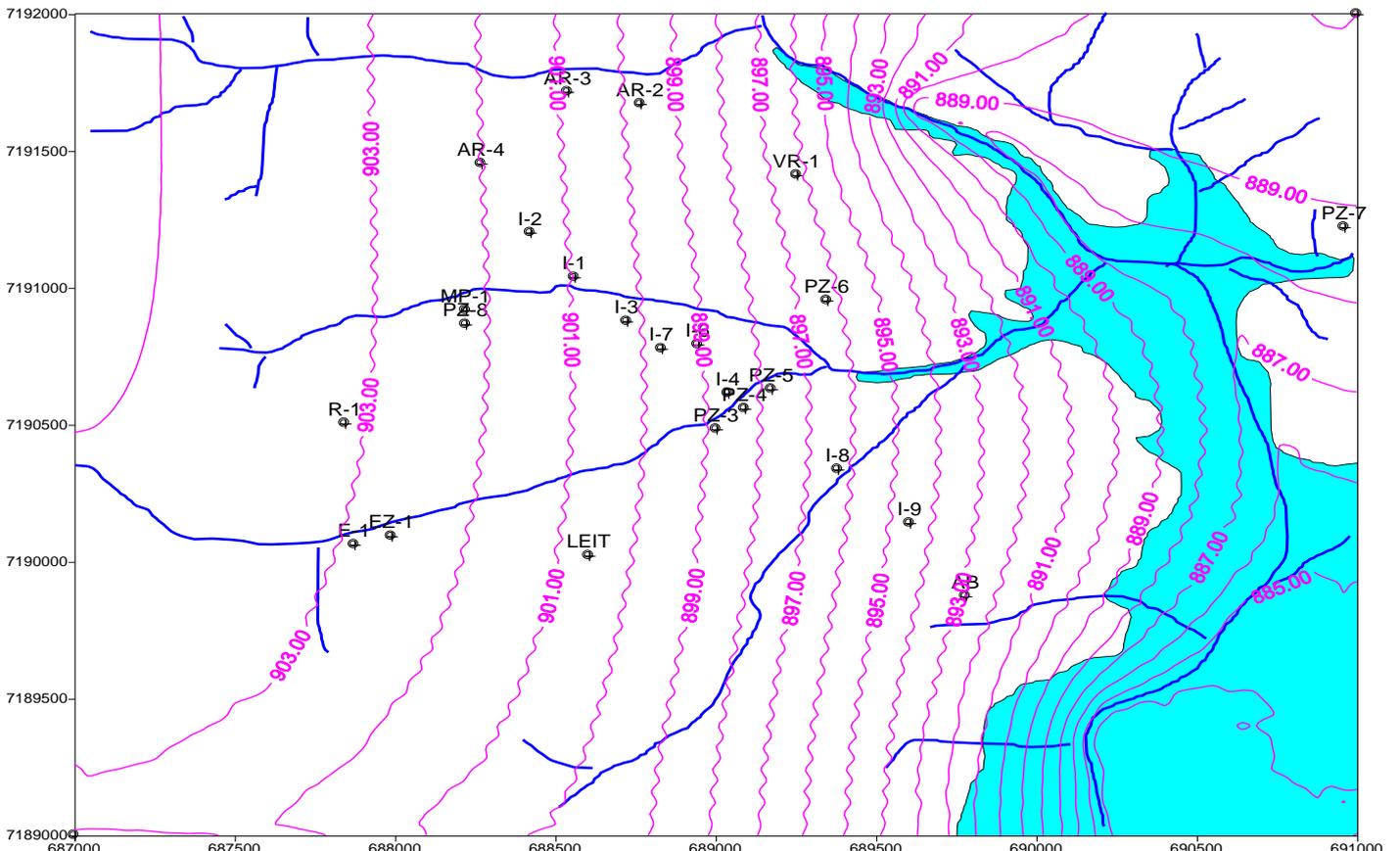


Figura 5 – Potenciometria do aquífero freático obtido com a aplicação do modelo matemático (linhas em roxo = linhas equipotenciais).

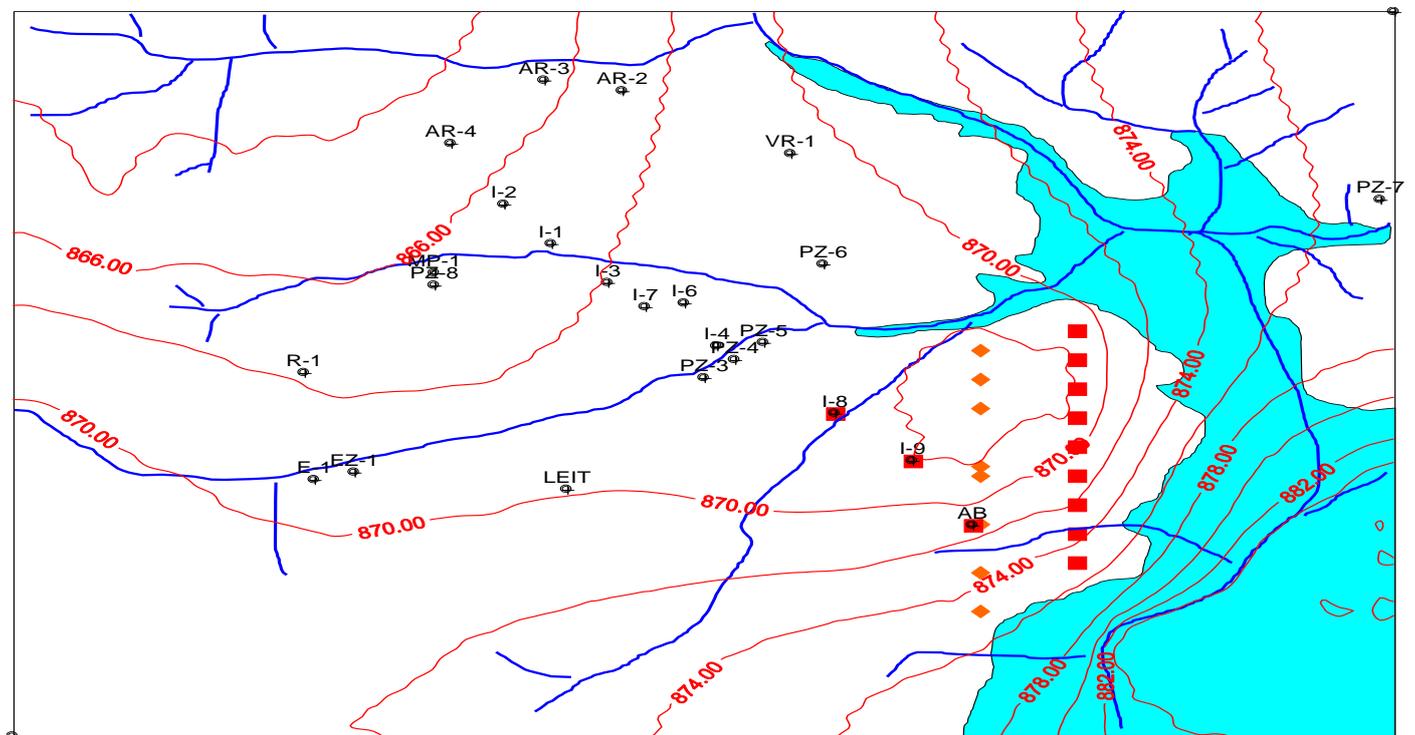


Figura 6 – Resultado da simulação com a implantação de vinte poços produzindo 150 L x s-1.

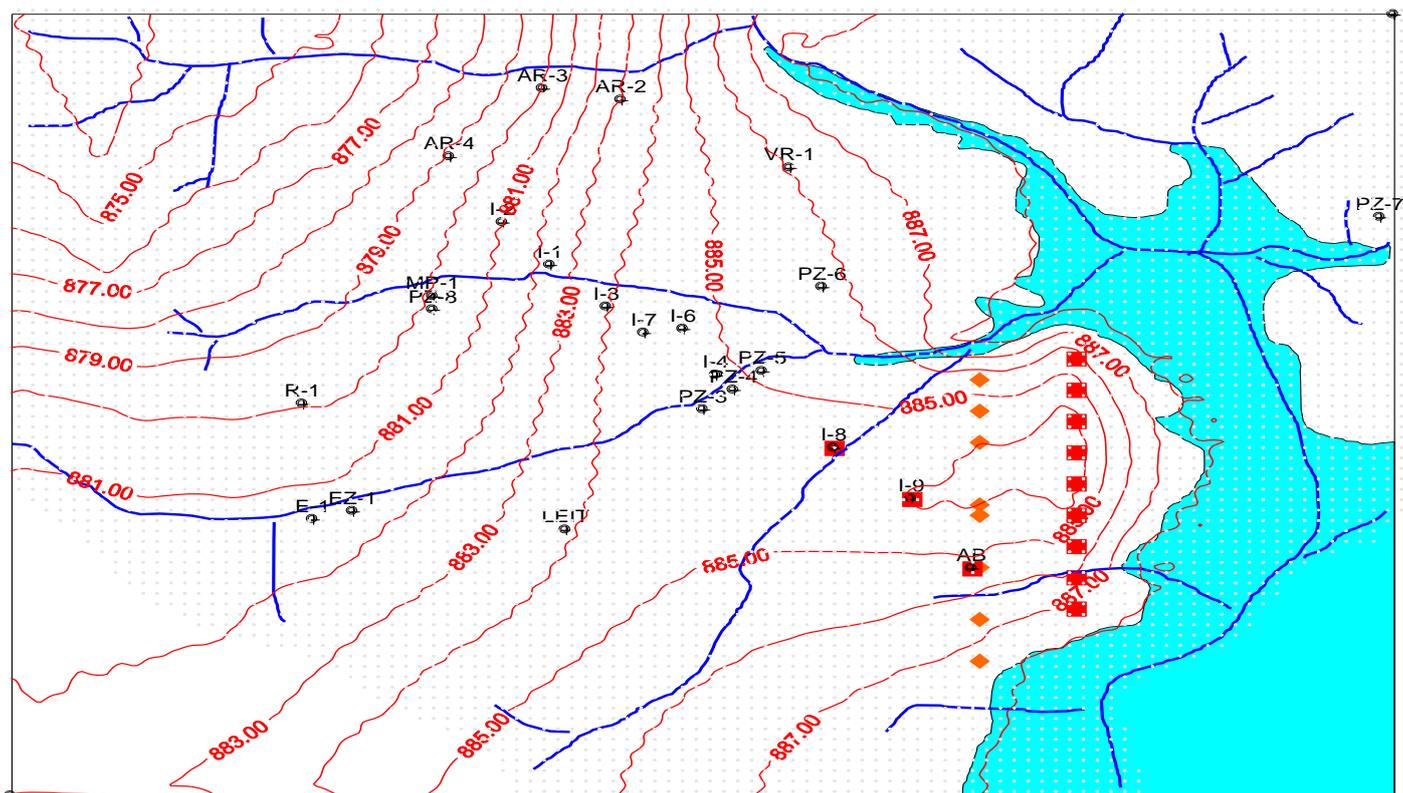


Figura 7 – Localização das duas galerias de poços com produção de 150 L x s-1 e linhas equipotenciais resultantes do bombeamento (nível da água do lago: 888 m).

Referências bibliográficas

- AB'SABER A.N., BIGARELLA J.J. 1961. Superfícies aplainadas no primeiro planalto do Paraná. Boletim Paranaense de Geografia. Curitiba, 13(4): 116-125.
- ALMEIDA F.F.M. 1952. Novas ocorrências de camadas supostas pliocênicas nos Estados de São Paulo e Paraná. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia. São Paulo, 1(1): 53-58.
- ARCHELA E. 1986. Faciologia e ambientes de sedimentação da Bacia de Curitiba, São Paulo, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Projeto de pesquisa
- BECKER R.D. 1982. Distribuição dos sedimentos cenozóicos na região metropolitana de Curitiba e sua relação com a estrutura geológica e morfológica regional, Porto Alegre, 1982. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BERG E.A.T., LOURENÇO O.B. 1973. Sobre a composição mineralógica de argilas dos solos do Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências. Curitiba, 31: 13-30.
- BIGARELLA J.J. 1971. Variações climáticas no Quaternário Superior do Brasil e sua datação radiométrica pelo método do Carbono 14. Paleoclimas. São Paulo. 1: 1-22.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1958a Considerações sobre o paleoclima da Bacia de Curitiba. Boletim do Instituto de História Natural da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1: 1-10,
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1952a. Notas complementares à planta geológica da cidade de Curitiba e arredores. Boletim do Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas. Curitiba, 40: 1-14.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1962. Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. Boletim da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 7: 1-164.
- BIGARELLA J.J., SALAMUNI R. 1962. Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. Boletim da UFPR – Geologia, 7: 1-159.
- CARVALHO P.F. 1936. Geologia do Município de Curitiba. Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia. Rio de Janeiro, 82: 1-37.
- COUTINHO J.M.V. 1955. Lantanita de Curitiba, PR. Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo, 13: 119-126.
- FUCK R.A. 1966. Nota explicativa de folha geológica de Quero-Quero. Boletim da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 19: 1-21.
- FUCK R.A. 1967. Geologia da folha de Piraquara. 64p. (Datilografado).
- GIRAO NERY G., ROSA FILHO E.Fda. 1994. Hidrogeofísica do poço da Fazenda Canguiri-PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., Recife Anais...Recife, ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, .1: 363-371.
- LEVORSEN A.I. 1954 Geology of Petroleum. Ed. San Francisco, W.h. Freeman and Co.
- LOPES J.A.V. 1966. Nota explicativa da folha geológica de Curitiba. Boletim da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 20: 1-20.
- MAACK R. 1947. Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. Arquivos de Biologia e Tecnologia. Curitiba, 2: 142-158.
- MARINI O.J. 1967. Geologia da folha de Araucária. Boletim da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 24: 1-22.
- MURATORI A. 1966. Nota explicativa da folha de Campo Largo. Boletim da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 21: 1-31.
- MURATORI A.M., GIUST D.A, CANALI N.E. 1982 Interpretação gravimétrica preliminar da configuração topográfica do

- Embasamento Cristalino no Município de Curitiba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., Salvador. Anais... Salvador, SBG. Sociedade Brasileira de Geologia, 4: 1576-1580.
- OLIVEIRA A.I., LEONARDOS O.H. 1943. Geologia do Brasil. 2ª ed, Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura.
- PETRI S., FÚLFARO V.J. 1983 Neocenozóico. In: GEOLOGIA DO BRASIL. São Paulo, EDUSP, 432-470
- ROSA FILHO E.F.DA, PARANHOS FILHO A, PRAZERES FILHO H.DOS, VALESKI Z. 1996. Considerações sobre aspectos físicos e hidráulicos do aquífero Guabirota. Boletim Paranaense de Geociências. Curitiba, 44: 1-23.
- SALAMUNI E. 1988. Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR). Tese de Doutorado. Rio Claro (SP).
- SALAMUNI E., STELLFELD M.C. 2001. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). Boletim Paranaense de Geociências. 49:21-32
- THEIS C.V. 1935 The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Trans. Am. Geophysical Union. Washignton, 25: 519-524.
- THORNTHWAITE C.W. 1948 An approach toward a rational classification of climate. Geologic. Rev., 38: 55-94
- TREIN E.(Coord). 1969 Folha Geológica de Tijucas do Sul. Curitiba: Banco de desenvolvimento do Paraná S/A Comissão da Carta Geológica do Paraná Escala 1:70.000.
- TURC L. 1954. Le bilan d'eau des sols; Relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. Ann. Agr. IV: 495-598. Paris.
- UDLUFT P. 1988. MODBIL - Bilanzmenü zur Berechnung der Grundwasserneubildung mit verschiedenen Methoden. Vers. 3.1 - unverö. Computerprogramm. Universität Würzburg, Würzburg Deutschland.