

# EFEITO DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS NO FLUXO DE UM AQUÍFERO ALUVIAL

H. D. M. Schuster<sup>1</sup>; J. L. Rabelo<sup>2</sup>; F. F. da Silva<sup>3</sup>; N. B. Monteiro<sup>4</sup> & V. S. Srinivasan<sup>5</sup>

**Resumo** - Um aquífero aluvial localizado perto da cidade de Santa Luzia - PB foi selecionado para um modelamento e simulação bidimensional. O depósito aluvial varia de 50 m a 400 m de largura e de 1 m a 10 m de profundidade, com uma extensão de aproximadamente 5 km. Os níveis freáticos foram observados durante vários anos desde 1988. Foi utilizado o Método das Diferenças Finitas para a calibração das permeabilidades e a simulação dos níveis freáticos do aquífero com suas barragens submersas. As influências de diferentes condições de contorno e das propriedades morfológicas bem como o efeito das barragens submersas sobre o fluxo subterrâneo foram avaliadas durante o processo de simulação e os resultados são muito promissores.

**Palavras-chave** - aquífero aluvial, barragem submersa, modelamento matemático.

## INTRODUÇÃO

A região semi-árida do Nordeste do Brasil é freqüentemente afetada por secas. Geralmente as cidades no interior da região são abastecidas por reservatórios da superfície. As propriedades rurais nem sempre têm uma fonte de água segura e freqüentemente são perfurados poços amazonas em aquíferos aluviais rasos como a principal fonte de água de boa qualidade. São poucos os estudos sobre a avaliação destes depósitos de aquíferos aluviais que podem ser explorados como uma das fontes

<sup>1</sup> Ph.D, Professor Adjunto, Departamento de Mineração e Geologia, CCT/UFPB -Campus II, 58109-970 Campina Grande-PB , tel(fax): (083)310-1169, e-mail: didischuster@yahoo.com

<sup>2</sup> Físico, Mestrando em Engenharia em Recursos Hídricos, CCT/UFPB – Campus II, Campina Grande – PB, e-mail: jlraabelo@gd.com.br

<sup>3</sup> Eng. Civil, Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos, Secretaria de Recursos Hídricos. Salvador – BA, tel: (071)370-6171, e-mail: fernandofernandes@base.com.br

<sup>4</sup> Engenheira de Minas, Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos, CCT/UFPB – Campus II, Campina Grande – PB.

<sup>5</sup> Ph.D, Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, CCT/UFPB – Campus II, Campina Grande –

de abastecimento da zona rural e pequenas propriedades. Neste contexto, o presente estudo procura estabelecer uma metodologia consistente para avaliar as características hidrológicas de diversos depósitos aluviais de pequeno a grande portes que possam servir como uma fonte potencial para o fornecimento de água para a zona rural.

## **OS ESTUDOS NO CAMPO**

### **ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo escolhida é uma planície aluvial de aproximadamente 300 km<sup>2</sup>, situada na cidade de Santa Luzia - PB. Ao sul, é cercada por montanhas de 400 m a 750 m de elevação. A planície aluvial é cortada por três rios principais, porém sazonais. Nesta planície já foram realizados medições geofísicas (Bischoff et al., 1988) e alguns estudos hidrológicos (Schuster et al., 1990) durante os anos 1988-1990.

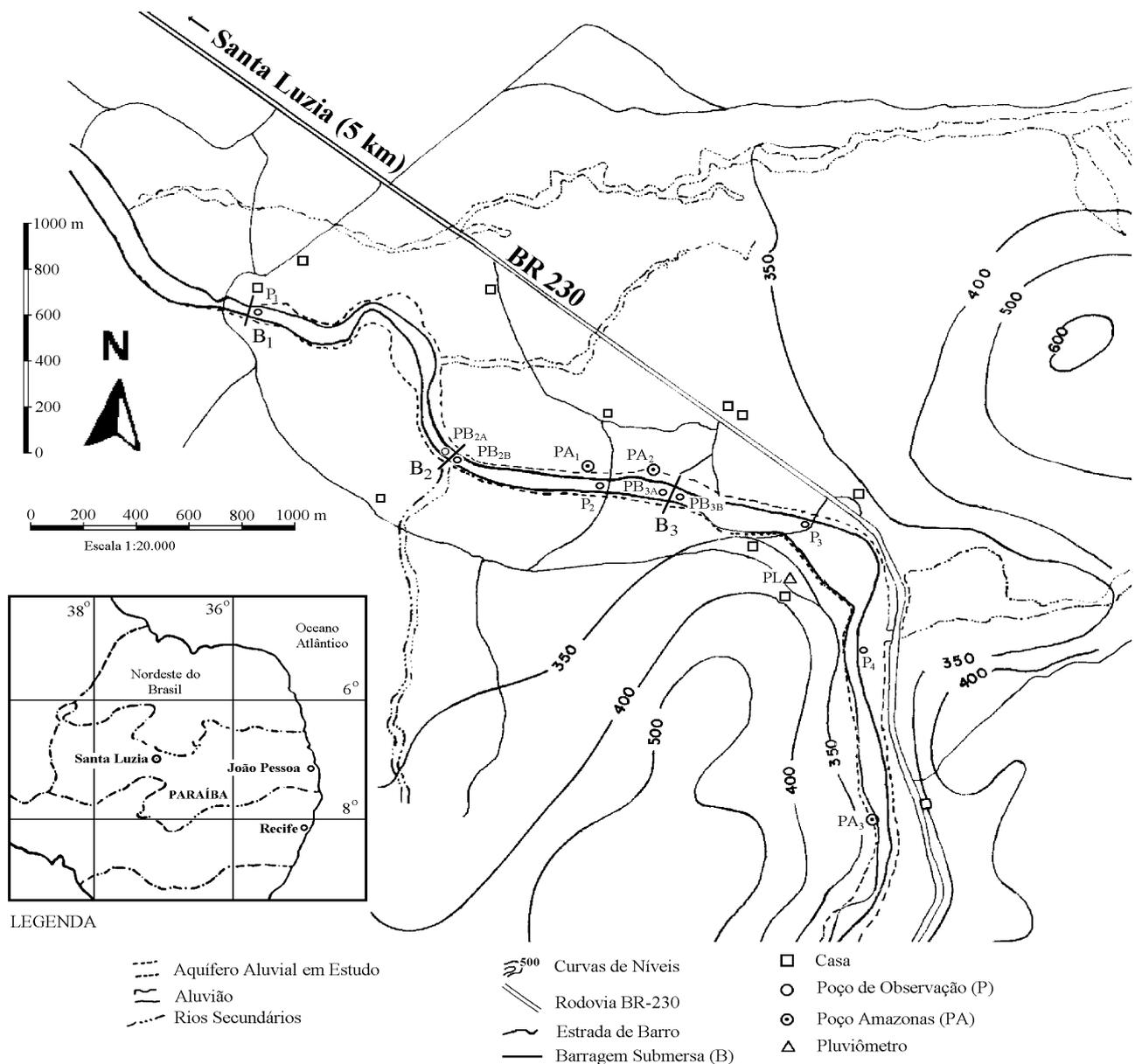
A fonte principal de recarga do aquífero é a chuva. A precipitação média anual na região durante o período de 1950 a 1996 é de 520 mm, com o máximo e mínimo observados sendo 1372 mm, (1985) e 89 mm,(1993) respectivamente. Não há contribuição dos rios secundários para recarga neste aquífero.

### **HIDROGEOLOGIA**

O aluvião em estudo é conhecido como Riacho Chafariz e apresenta características adequadas para o abastecimento de água para pequenas comunidades. O depósito aluvial é quase plano ou suavemente ondulado e ao sul, alcança elevações de até 700 m. A Figura 1 mostra a localização do aluvião.

As principais características deste aquífero são a variação da espessura dos depósitos clásticos, a composição dos seus tamanhos de sedimentos e a ocorrência de terraços sucessivos no leito aluvial do rio.

O aquífero varia de 50 m a 400 m de largura e de 1 m a 10 m de profundidade, com uma extensão de cerca de 20 km. Uma seção de 5 km de comprimento foi selecionada para as investigações de campo e modelamento matemático posterior. Três barragens assoreadas existem na seção. A barragem B<sub>1</sub> é visível a jusante e forma o limite a jusante do trecho selecionado enquanto as outras barragens submersas (B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub>) estão cobertas pelos sedimentos nos dois lados e portanto, totalmente submersas dentro do aluvião. O poço amazonas PA<sub>3</sub> constitui o limite superior a montante.



**Figura 1.**Localização da área de estudo ( Riacho Chafariz em Santa Luzia – PB).

Em 1988, instalou-se quatro piezômetros P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> e P<sub>4</sub> com profundidades variáveis de 1,5 m a 8,5 m , e junto com os três poços amazonas já existentes (PA<sub>1</sub>, PA<sub>2</sub> e PA<sub>3</sub>) forneceram o sistema das medições semanais de níveis freáticos durante um ano (Figura 2).

Em 1996, a instalação dos poços foi refeita nos mesmos locais de 1988 e ainda quatro novos piezômetros foram instalados, sendo dois a montante e a jusante da barragem B<sub>2</sub> (PB<sub>2b</sub>, PB<sub>2a</sub>) e dois a montante e a jusante da barragem B<sub>3</sub> (PB<sub>3b</sub>, PB<sub>3a</sub>). Fez-se um número de medições do nível freático das águas subterrâneas com poços-ponteira, instalados em intervalos de 100 m. Observou-se mais de trinta valores de níveis

freáticos durante o ano. Simultaneamente, realizou-se um estudo detalhado de topografia. Um perfil longitudinal do aluvião, o topo da superfície, a base do embasamento cristalino e a superfície freática foram estabelecidos a partir do levantamento topográfico, das perfurações dos poços de observação, da perfilagem e sondagem geoeletricas, e das medições de níveis freáticos (nos poços de observação, nos poços amazonas e das numerosas medições através de poço-ponteira).

## **ANÁLISE DOS DADOS DE CAMPO**

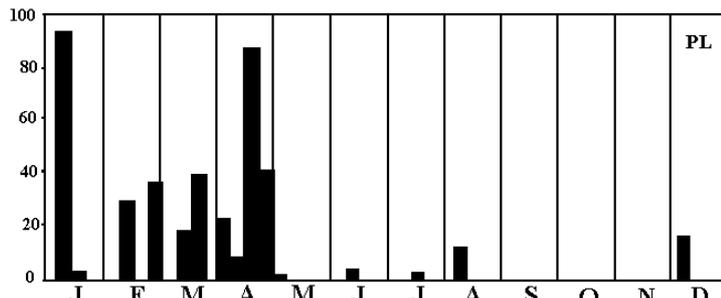
Obteve-se as primeiras propriedades hidrológicas do aquífero a partir dos perfis litológicos dos piezômetros P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> e P<sub>4</sub>. Geralmente, os perfis litológicos mostram uma seqüência alternando entre areias médias a grossas, intercaladas por camadas finas de argila e silte. Não foi observada a presença de cascalho. Para obter uma estimativa da permeabilidade do aluvião foram usados dois métodos. No primeiro, a estimativa foi feita pela associação dos valores sugeridos na literatura (Beyer, 1964) à curva granulométrica dos sedimentos do depósito. No segundo método, a permeabilidade foi determinada através de um permeâmetro de carga constante utilizando as amostras obtidas durante a perfuração do poço P<sub>3</sub>. Os dois valores aproximaram-se e, um valor médio de  $K = 10^{-3}$  m/s foi adotado para o valor da permeabilidade. Um teste de bombeamento feito em 1989 resultou num valor de  $K = 0,95 \cdot 10^{-3}$  m/s para este poço.

A Figura 3 mostra a variação semanal dos níveis freáticos nos sete piezômetros durante 1988. A seqüência vai do poço mais a jusante P<sub>1</sub> ao poço mais a montante PA<sub>3</sub>. Verifica-se que os níveis freáticos aumentam após o início da estação chuvosa (janeiro) e alcançam seus picos no final da PA<sub>2</sub> são atribuídas ao bombeamento para irrigação das culturas localizadas na sua proximidade.

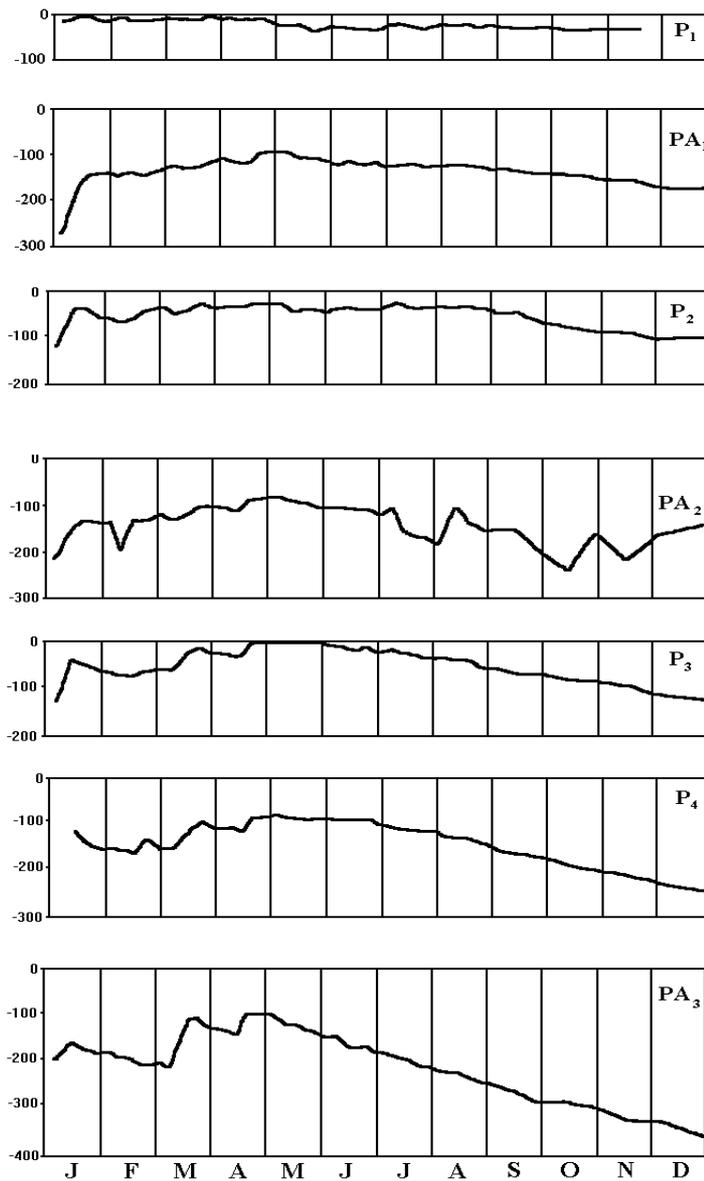
## **MODELAMENTO**

### **ESTIMAÇÃO DA PERMEABILIDADE DO AQUÍFERO**

O primeiro passo no modelamento de águas subterrâneas é a estimativa das permeabilidades na área de estudo. A identificação destes parâmetros pode ser feita combinando a técnica de tentativa e erro (método direto) com uma posterior técnica automatizada dos mínimos quadrados (método inverso), determinando os conjuntos de parâmetros que minimizam os resíduos entre os níveis observados e calculados da superfície freática.

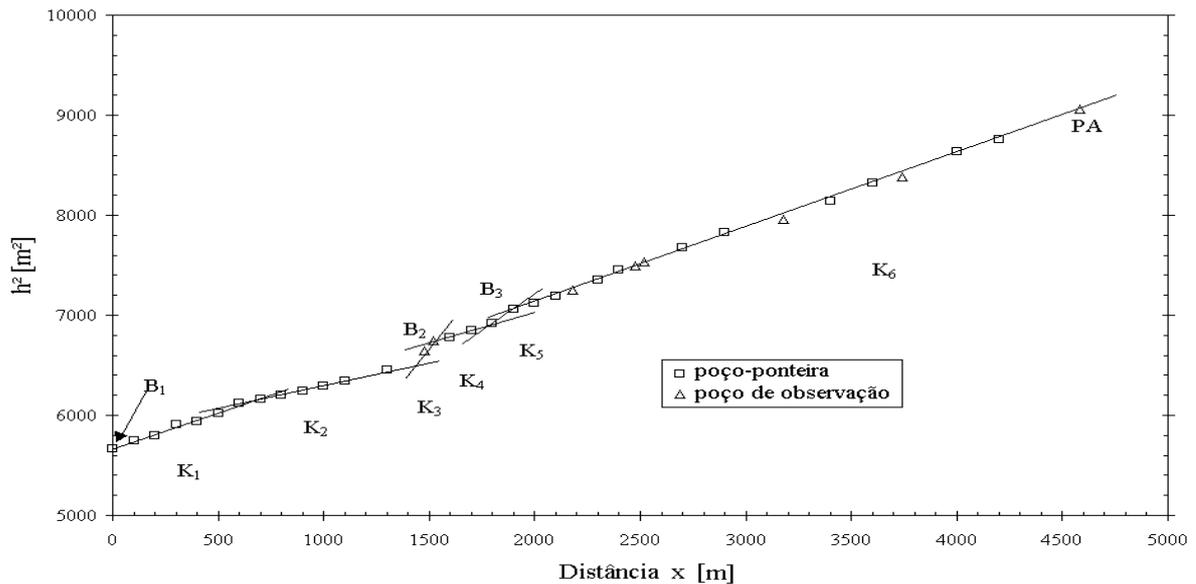


**Figura 2.** Precipitação medida (mm) em 1988



**Figura 3.** Níveis freáticos observados (cm) em 1988

Rochas não-consolidadas não apresentam limites bem definidos em suas propriedades petrofísicas, e este fato complica a estimação das permeabilidades do aquífero não-homogêneo. Foi dificultada também a identificação das zonas relativamente homogêneas ao longo do trecho em estudo. Admitindo-se um fluxo unidimensional, gerou-se o gráfico do quadrado das cargas freáticas versus a distância ao longo do aquífero (Figura 4).



**Figura 4.** Gráfico ( $h^2 - x$ ) mostrando os seis segmentos distintos em 16/08/1996.

A forma parabólica da superfície freática é descrita pela equação de Dupuit-Forchheimer:

$$h^2(x) = h_0^2 + \frac{h_L^2 - h_0^2}{L} x = h_0^2 + \frac{2Q}{K} x \quad (1)$$

em que  $h(x)$  é o nível freático a distância  $x$  para o fluxo não-confinado sendo  $h_0$  a condição de contorno a jusante ou o nível freático para  $x = 0$ . A condição de contorno a montante é  $h_L$  para  $x = L$ . Considerando a base do aquífero como sendo horizontal, um gráfico de  $h^2(x)$  versus  $x$  se torna linear. Assim, a Figura 4 mostra seis segmentos com diferentes valores de inclinação ( $2Q/K_i$ ), sendo  $Q$  a descarga do aquífero (Bear, 1979). Então, o trecho total do aluvião foi dividido em seis segmentos com diferentes valores de permeabilidade  $K_1$  a  $K_6$  (Figura 4).

As duas inclinações elevadas entre  $K_2$  e  $K_4$  e  $K_4$  e  $K_6$  representam as seções onde

os efeitos das barragens submersas  $B_2$  e  $B_3$  são predominantes. As inclinações foram determinadas por regressão linear simples. Utilizando o valor da permeabilidade  $K = 10^{-3}$  m/s para zona 6 marcada pela presença do poço  $P_3$ , a descarga do aquífero  $Q$  foi determinada como  $6,9 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s por unidade de largura (admitindo a condição do embasamento cristalino sendo horizontal). Conhecida a descarga, as permeabilidades das zonas restantes 1 a 5 foram determinadas a partir das inclinações dos segmentos lineares da Figura 4. Assim, os valores das permeabilidades foram obtidos como:  $K_1 = 5,04 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $K_2 = 4,38 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $K_3 = 6,07 \cdot 10^{-4}$  m/s,  $K_4 = 2,56 \cdot 10^{-3}$  m/s e  $K_5 = 6,86 \cdot 10^{-4}$  m/s (Schuster et al., 1998).

## DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO

Discretizou-se a área de estudo numa malha retangular de 50 m x 50 m (Figura 1). As condições de contorno para a simulação de estado estacionário foram definidas como fluxo vertical zero através do embasamento cristalino impermeável e fluxos iguais a zero através dos contornos impermeáveis laterais cristalinos, em ambos os lados do aquífero aluvial. Na barragem  $B_1$ , o valor de nível freático observado foi considerado como a condição de contorno a jusante de tipo “carga especificada”. No poço amazonas  $PA_3$ , o nível de água observado foi considerado como o valor de contorno a montante do tipo “carga especificada”.

A simulação bidimensional do aquífero foi realizada utilizando o Método de Diferenças Finitas com o programa “Processing Modflow” (McDonald & Harbaugh, 1988) para Windows (PMWIN 4.0) (Chiang & Kinzelbach, 1996). A geometria do aquífero no plano, as condições de contorno apropriadas e a variação da permeabilidade nas zonas longitudinais foram consideradas, mas a recarga na superfície devido à infiltração foi desprezada. A simulação foi realizada para os casos estacionário e não-estacionário. Para o caso estacionário uma simulação bidimensional do aquífero foi executada com os níveis freáticos do agosto de 1996, começando com os seis valores de permeabilidade calculados a partir da equação unidimensional de Dupuit – Forchheimer. Para o caso não-estacionário, foram utilizados os dados semanais do período de maio a setembro de 1988 (Oliveira, 1992).

## MODELAMENTO DO AQUÍFERO NO ESTADO ESTACIONÁRIO

Geralmente, os aquíferos aluviais nordestinos são extensos em comprimento e estreitos em largura. Neste estudo, a máxima razão da largura do aquífero com relação

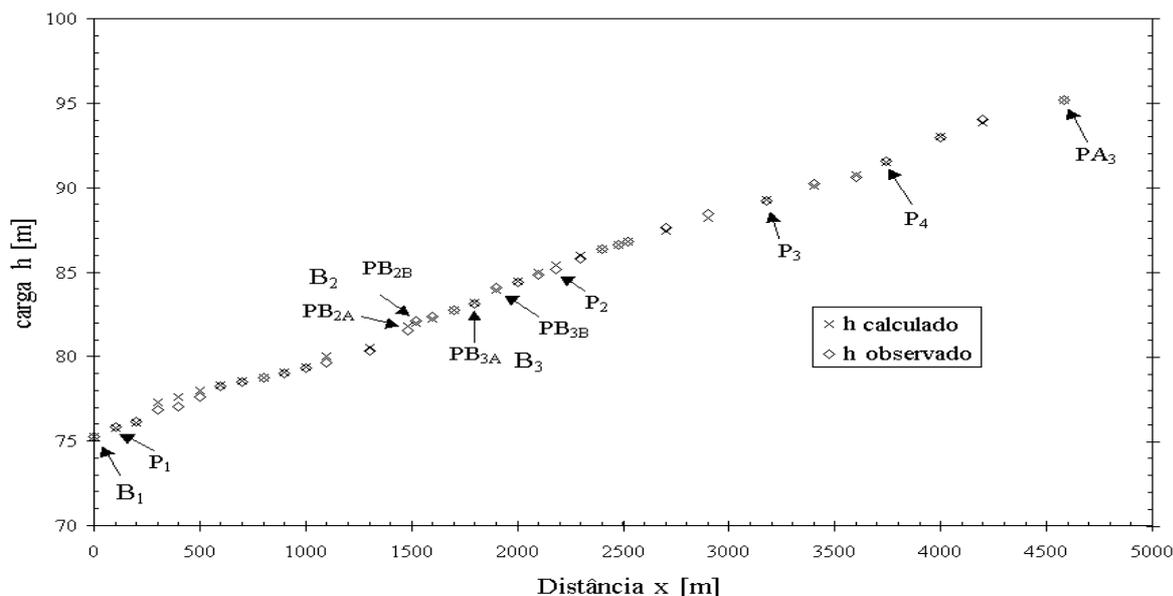
ao comprimento é de 0,08 e por isso, um tratamento unidimensional do aquífero seria uma boa aproximação. Portanto, os valores iniciais da permeabilidade para os seis segmentos obtidos a partir da análise unidimensional foram usados num procedimento de calibração inverso automatizado para o fluxo bidimensional. Para este caso considerou-se a inclinação do embasamento cristalino como sendo aproximadamente igual a 0,25%, com base nas sondagens. Para avaliar as influências relativas da natureza bidimensional do aquífero com largura variável ao longo do curso e inclinação do embasamento cristalino, duas simulações comparativas foram realizadas. Inicialmente, a comparação entre o caso do aquífero com largura uniforme e o aquífero com largura variável para uma condição de embasamento horizontal de meio poroso homogêneo mostrou que o desvio padrão médio para as cargas freáticas foi 0,53 m, com um desvio relativo na descarga igual a 6,5 %. No segundo caso, quando as cargas e a vazão do aquífero foram comparadas para os casos de embasamento horizontal e embasamento com inclinação de 0,25% e mantendo-se a largura constante, o desvio padrão médio para as cargas subiu para 1,27 m com um desvio relativo para a vazão igual a 47 %. Portanto, desprezar as variações nas elevações da base do aquífero levaria a erros muito maiores, comparando-se com o desprezo das variações na largura do aquífero.

O principal objetivo da simulação estacionária foi obter os melhores valores das permeabilidades das seis zonas. Para este caso, com um aquífero de fluxo bidimensional e com a inclinação do embasamento cristalino de 0,25 %, os valores finais de permeabilidade obtidos pelo método de calibração automática e, que foram atribuídos ao modelamento, são:  $K_1 = 3,43 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $K_2 = 4,63 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $K_3 = 6,76 \cdot 10^{-4}$  m/s,  $K_4 = 2,72 \cdot 10^{-3}$  m/s,  $K_5 = 6,81 \cdot 10^{-4}$  m/s e  $K_6 = 1,09 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Na calibração automática, apenas  $K_6$  foi mantido numa faixa estreita devido ao fato que o valor deste foi determinado por dois métodos distintos como já mencionados e, o valor obtido foi praticamente o mesmo. Os outros valores de permeabilidades estavam livres sem restrições de limites no Processo de Calibragem. Os valores finais ajustados das permeabilidades se aproximaram dos valores iniciais unidimensionais, com a maior variação sendo no caso de  $K_1$  igual a 32 %. Estes valores calibrados de permeabilidade foram usados na simulação bidimensional em ambas as condições do Estado Estacionário e Não-Estacionário. A Figura 5 apresenta uma comparação entre as cargas observadas e as cargas calculadas para 35 locais para o agosto de 1996. No estado estacionário, o desvio padrão médio RMSE foi de 0,21 m segundo a expressão:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{\text{obs}} - h_{\text{calc}})^2} \quad (2)$$

em que  $n$  é o número de observações utilizadas,  $h_{\text{obs}}$  é a carga piezométrica observada e  $h_{\text{calc}}$  é a carga calculada



**Figura 5.** Comparação dos níveis freáticos observados e calculados em 16/08/1996.

A descarga calculada no modelamento estacionário no local da barragem  $B_1$  através do balanço hídrico foi  $1,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  para o embasamento horizontal, e  $7,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  para o embasamento com inclinação de 0,25%. Os dois valores não estavam em boa conformidade com o valor da descarga da curva de recessão recentemente medida na barragem  $B_1$ , mostrada na Figura 6 (Silva, 1998). Novas simulações foram realizadas, considerando um zoneamento transversal devido à existência dos terraços laterais de depósitos de material siltoso. Utilizando um valor de permeabilidade em torno de  $K = 10^{-4} \text{ m/s}$  para os terraços siltosos, obteve-se uma descarga muito menor,  $Q = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Este valor de descarga parece bastante razoável em comparação com o valor medido, ficando evidente a necessidade de considerar o zoneamento lateral na modelagem do aquífero.

## SIMULAÇÃO DE FLUXO NÃO-ESTACIONÁRIO

O modelamento do aquífero transiente é de grande interesse nas secas prolongadas

no Nordeste do Brasil, devido ao fato que este permite entender melhor a capacidade do aquífero aluvial para atender a demanda hídrica da região. Neste estudo foi simulado o regime não-estacionário de maio a setembro de 1988, utilizando os dados coletados naquele ano (Figura 2 e Figura 3). O modelo estacionário foi modificado para a simulação do regime não-estacionário atribuindo-se um valor de 0,15 para a porosidade efetiva. Mudou-se a condição de contorno de carga constante a montante para uma condição da carga variável no tempo, representado pelos níveis observados no poço PA<sub>3</sub>. A evaporação semanal e taxas de recarga foram estimadas a partir da evaporação potencial mensal no tanque classe A e dos dados de precipitação no local (Figura 2). Assim, uma simulação transitória razoável pôde ser alcançada, considerando uma altura de evaporação de até 0,6 m.

A simulação realizada para um período de 39 semanas mostrou uma concordância razoável com a evolução das cargas freáticas observadas nos poços P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> e P<sub>4</sub>. Os demais detalhes referentes ao cálculo da evaporação e da recarga podem ser encontrados em Silva (1998).

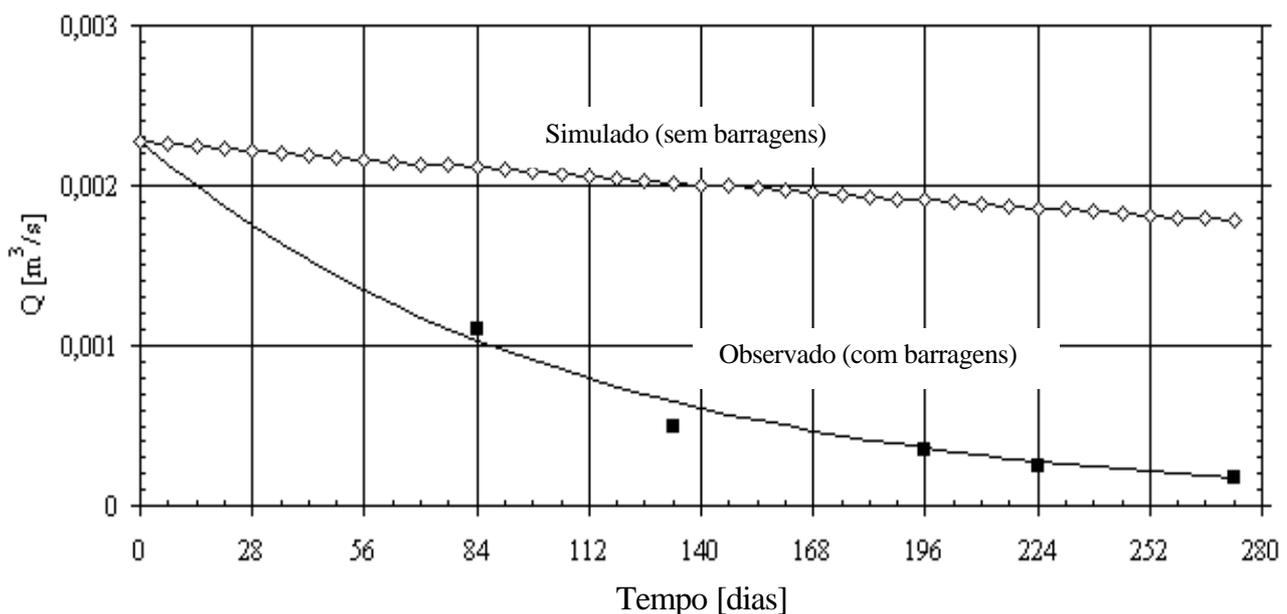
## **EFEITO DAS BARRAGENS**

A avaliação do efeito das barragens submersas que provocam um escoamento superficial por causa do excesso de saturação na parte montante das barragens submersas, foi realizada através de uma outra simulação transitória tendo como interesse principal o rendimento total do aquífero. Ignorando a presença das barragens e considerando quatro zonas homogêneas ao longo do leito de aquífero e os terraços laterais como unidade estratigráfica diferente com uma permeabilidade uniforme de  $K = 10^{-4}$  m/s, a simulação realizada mostraria em comparação com o caso anterior o efeito das barragens no valor do rendimento do aquífero no período de simulação.

A Figura 6 mostra duas situações diferentes para o período de maio de 1996 a fevereiro de 1997. A primeira representa a curva de depleção observada na barragem B<sub>1</sub> do aquífero estudado no qual estão instaladas 3 barragens submersas (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub>). O coeficiente de depleção corresponde ao valor de  $\alpha_1 = 9,4 \cdot 10^{-3}$  [1/dia] (Oliveira, 1992; Silva, 1998). A segunda representa a curva de depleção simulada, considerando o aquífero sem barragens submersas. O coeficiente de depleção neste caso foi de  $\alpha_2 = 9,0 \cdot 10^{-4}$  [1/dia]. Usando a expressão seguinte para calcular o volume de água restituído a calha do riacho pelo aquífero:

$$V(t) = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_1(t_1) e^{-\alpha t} dt = \frac{Q_1}{\alpha} \left( 1 - \frac{1}{e^{\alpha(t_2-t_1)}} \right) \quad (3)$$

onde  $Q_1$  é a vazão inicial no tempo  $t_1$  (14/05/96) e  $t = t_2 - t_1 = 280$  dias (até 28/02/1997) é o tempo total de medição em dias. Com base na equação 3, os volumes calculados foram:  $1,95 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  para caso 1 com barragens e  $5,07 \cdot 10^4 \text{ m}^3$  para o caso 2 sem as barragens. Assim, a retenção do volume de água pelas barragens  $B_1$ ,  $B_2$ , e  $B_3$  no período de estiagem maio/1996 a fevereiro/1997 foi de  $3,12 \cdot 10^4 \text{ m}^3$



**Figura 6.** Curva de recessão observada na barragem  $B_1$  e a curva simulada sem barragens durante o período de maio de 1996 a fevereiro de 1997.

Este resultado mostra claramente o efeito positivo das barragens submersas em aumentar o volume d'água disponível no período de estiagem em comparação com o aluvião sem as barragens.

## OS VOLUMES DE ARMAZENAMENTO NAS BARRAGENS

O volume d'água retido no aquífero depende do coeficiente de armazenamento ( $S$ ) e da altura da barragem e o volume do fluxo é bastante sensível à inclinação do embasamento cristalino do aquífero. Para verificar a influência destes fatores sobre o volume armazenado, foram feitas simulações (fluxo unidimensional) na condição estacionária do aquífero admitindo inclinações mínima e máxima de 0,25% e 0,38%. O

coeficiente de armazenamento foi admitido com valor mínimo de 0,15 e máximo de 0,30.

Os volumes calculados em metro cúbico por unidade de largura são mostrados na tabela 2. O volume  $V_0$  é o volume inicial no dia 16/08/1996 no aquífero. O volume  $V_1$  é o volume da água armazenada devido ao efeito da barragem  $B_1$ , o volume  $V_2$  devido ao efeito da barragem  $B_2$  e, o volume  $V_3$  devido da barragem  $B_3$ . O volume  $V_{tot}$  é o volume total devido ao efeito das três barragens  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ . A simulação estacionária foi executada com os seguintes condições iniciais do aquífero (Tabela 1):

Ao final do ano de 1998 (12/12/1998), um dos anos de maior seca ocorrida nesta região, foi registrada uma precipitação total anual de apenas 64 mm no pluviômetro PL localizado próximo à barragem  $B_2$ . Alguns níveis freáticos medidos nos locais de observação nesta data foram os seguintes:  $h(B_1) = 75,02$  m (0,14 m abaixo da cota superior da barragem  $B_1$ );  $h(PB_{2A}) < 80,86$  m (poço de observação a jusante de  $B_2$ , seco);  $h(PB_{2B}) = 81,34$  m (0,38 m abaixo da cota superior da barragem  $B_2$  medido no poço de observação a montante de  $B_2$ );  $h(P_2) = 82,96$  m (rebaixamento de 2,14 m em relação ao nível freático de agosto de 1996) ;  $h(P_4) = 88,63$  m (rebaixamento de 2,87 m em relação ao nível freático de agosto de 1996);  $h(PA_3) < 93,12$  m (poço amazonas referência de condição de contorno superior da área de estudo, seco a partir de junho 1998).

O efeito positivo do armazenamento devido às barragens manifestou-se com a existência de água disponível mesmo num período de estiagem tão prolongada. Observou-se que a população instalada a montante da área de estudo ainda abasteceu-se de uma cacimba recentemente escavada até uma profundidade superior a 5 metros próximo ao local de poço de observação  $P_4$ .

Distância [m]	Nível freático [m]	Base do Embasamento [m]		Cota superior da Barragem [m]
		$\phi = 0,25 \%$	$\phi = 0,38 \%$	
$x(B_1) = 0$	$h(B_1) = 75,27$	$b(B_1) = 74,0$	$b(B_1) = 74,0$	$b^*(B_1) = 75,16$
$x(B_2) = 1500$	$h(B_2) = 82,07$	$b(B_2) = 77,76$	$b(B_2) = 79,67$	$b^*(B_2) = 81,72$
$x(B_3) = 1850$	$h(B_3) = 83,61$	$b(B_3) = 78,63$	$b(B_3) = 80,99$	$b^*(B_3) = 83,05$
$x(PA_3) = 4500$	$h(PA_3) = 94,96$	$b(PA_3) = 85,25$	$b(PA_3) = 91,01$	

**Tabela 1.** Os dados da simulação unidimensional e estacionário para o cálculo de armazenamento

V (m <sup>3</sup> )/m	Volume da Zona Saturada $\phi = 0,25\%$	Volume da Zona saturada $\phi = 0,38\%$	Volume da Água armazenada $\phi = 0,25\%$ <b>S = 0,15</b>	Volume da Água armazenada $\phi = 0,38$ <b>S = 0,15</b>	Volume da Água Armazenada $\phi = 0,25\%$ <b>S = 0,30</b>	Volume da Água Armazenada $\phi = 0,38\%$ <b>S = 0,30</b>
V <sub>0</sub>	2,64·10 <sup>4</sup>	1,26·10 <sup>4</sup>	3,96·10 <sup>3</sup>	1,89·10 <sup>3</sup>	7,92·10 <sup>3</sup>	3,78·10 <sup>3</sup>
V <sub>1</sub>	3,07·10 <sup>2</sup>	2,14·10 <sup>2</sup>	4,61·10 <sup>1</sup>	3,21·10 <sup>1</sup>	9,22·10 <sup>1</sup>	6,42·10 <sup>1</sup>
V <sub>2</sub>	2,79·10 <sup>3</sup>	9,06·10	4,19·10 <sup>2</sup>	1,36·10 <sup>2</sup>	8,37·10 <sup>2</sup>	2,72·10 <sup>2</sup>
V <sub>3</sub>	1,75·10 <sup>3</sup>	5,20·10 <sup>2</sup>	2,63·10 <sup>2</sup>	7,80·10 <sup>1</sup>	5,25·10	1,56·10 <sup>2</sup>
V <sub>tot</sub>	4,85·10 <sup>3</sup>	1,64·10 <sup>3</sup>	7,28·10 <sup>2</sup>	2,46·10 <sup>2</sup>	1,46·10 <sup>3</sup>	4,92·10 <sup>2</sup>

**Tabela 2.** Volumes calculadas [m<sup>3</sup>/largura] da água armazenada devido ao efeito das barragens

## CONCLUSÕES

A medição simples dos níveis freáticos de água subterrânea através de poços-ponteira nos locais desejados no leito de rio facilita a obtenção dos dados para executar uma calibração do modelo num programa automatizado de estimação de parâmetros. Quando as estações de observação estão marcadas no campo, esta técnica relativamente simples pode ser repetida a qualquer tempo para observar a evolução da superfície freática com custos baixos e em pouco tempo.

O gráfico do quadrado das cargas freáticas versus a distância pode dar a melhor maneira de descobrir as mudanças da permeabilidade ao longo do comprimento e também pode ajudar a descobrir as mudanças significativas no aluvião devido as alterações nos processos de deposição resultando em estratificação.

A presença das barragens submersas no leito sedimentar mostra um efeito positivo em relação à retenção de água no aquífero aluvial através de uma grande diferença no rendimento para o caso do aquífero sem barragens obtida pela simulação.

O presente estudo mostra que é possível obter bons resultados de simulação para condições de regime estacionário bem como não-estacionário sem depender de dados extensivos, que são onerosos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao CNPq e ao Deutsche Luft- und Raumfahrtgesellschaft

(DLR) Bonn na Alemanha pelo suporte financeiro e técnico.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Bear, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*, McGraw-Hill Inc. New York, p. 80-81.
- Beyer, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve, *Wasserwirtschaft-Wassertechnik* 14, p. 165-168.
- Bischoff, J. H., Vitorino, S. F., Schuster, H. D. M. & Plaumann, G. (1988): Electromagnetic prospecting for Groundwater in the Semi-arid Region of Paraíba, *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*, Belém - PA, Vol. 4, p. 1539-1550.
- Chiang, W.-H. & Kinzelbach, W. (1996): *Processing Modflow – A simulation system for modeling groundwater flow and pollution. PMWIN for Windows. User's Manual*, Scientific Software Group, Washington – DC.
- McDonald, M. G. & Harbaugh, A. W. (1988): A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open File Report 83-875, Chapter A1.
- Oliveira, P.R.S. (1992): *Estudo hidrogeológico de um aquífero aluvial com barragens submersas na região de Santa Luzia, Paraíba* Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPB, Campus II, Campina Grande – PB, 115p.
- Schuster, H. D. M., Oliveira, P. R. S. & Koch, U. (1990): *Estudo Hidrogeológico de um Aquífero Aluvial com Barragens Submersas na Região de Santa Luzia- Paraíba*, *Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Porto Alegre - RS, p. 30-37.
- Schuster, H. D. M., Srinivasan, V. S., Monteiro, N. B., Silva, F.F. (1998): *Modelling and Simulation in an Alluvial Aquifer in a Semi-Arid Region of Brazil*. *Hydraulic Engineering Software VII*, Ed. W. Blain. WITPress Computational Mechanics Publications, Southampton UK, p. 479-488.
- Silva, F.F. (1998): *Investigação e Modelamento do Fluxo Subterrâneo em Aquífero Aluvial na Região Semi-árida da Paraíba*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPB, Campus II, Campina Grande – PB, 99 p.