

MODELO MATEMÁTICO DO AQUÍFERO BEBERIBE*

Ceferino Alvarez**
Waldemir Barbosa da Cruz**
Carlos Alberto de Mello Peixoto**

* Trabalho realizado pela SUDENE/CONESP através da OESA
** Organização e Engenharia SA — OESA

ABSTRACT

The Lower Beberibe aquifer, which is in the coastal areas of Olinda - Goiana, in the State of Pernambuco, is an important water reserve, for supplying many towns, especially Olinda. To rationalize the use for these resources, and improve the knowledge of this ground water reservoir, a mathematical model for simulation was prepared. The model used is for the modified Prickett type, and takes into account the various existing hydraulic rations, such as river-aquifer, higher aquifer, lower aquifer, etc. The model was calibrated with scarce control data. Even so, it was possible to characterize the importance of the parameters involved, and to prepare the first tool which considers all variables involved in defining the aquifer.

INTRODUÇÃO

Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares de uma simulação digital do aquífero Beberibe, na área costeira de Olinda - Goiana, Estado de Pernambuco. A modelagem do aquífero foi elaborada como parte dos "Estudos Hidrogeológicos para Aproveitamento Integrado da Região Centro-Leste da Bacia Potiguar e Bacias Costeiras de Pernambuco e Paraíba" realizados pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste, em convênio com a Companhia Nordeste de Sondagens e Perfurações - CONESP, através da Empresa Organização e Engenharia S/A.

Os dados disponíveis para a calibragem e ajuste do modelo eram ainda escassos e de curto período podendo-se, por isso, considerar o atual estágio alcançado como pré-modelo. Mesmo assim, a simulação permitiu caracterizar a importância dos parâmetros envolvidos e constituiu a primeira ferramenta que considera todas as variáveis que intervêm na definição do aquífero.

DESCRIÇÃO DO MODELO SIDA

O modelo SIDA (Simulação Digital de Aquífero) utilizado para simular o aquífero Beberibe tem as seguintes características, as quais são função dos problemas próprios do aquífero inferior da formação Beberibe.

- O modelo SIDA é um modelo de malhas variáveis isto é $\Delta x \neq \Delta y$, compreendidas num reticulado de 30 x 30 malhas. Para o aquífero Beberibe, discretizou-se o espaço em 434 malhas. Tem-se:

NC: número de colunas = 19
NR: número de linhas = 30
LO: número de malhas = 434

- O modelo SIDA simula, em regime transitório, a evolução piezométrica do aquífero no curso do tempo. Para isso calcula, a partir de um incremento de tempo inicial igual a um dia (este incremento aumenta conforme o transcurso do tempo simulado), a piezometria em todos os nós, de maneira cíclica mensal, e isso para qualquer período total desejado.
- Os limites do modelo podem ser impermeáveis ou abertos, isto é, pode haver transferência de certa quantidade de água. Isso acontece em particular nos aquíferos costeiros (como é o caso do aquífero Beberibe). O modelo permite o cálculo das vazões de entrada ou saídas laterais. Os valores são calculados malha por malha, a nível mensal e anual.
- A simulação de bombeamento, assim como a de recarga direta do aquífero através de infiltração de chuvas pode processar-se em todas as malhas do modelo. Esses dados são fornecidos mês a mês, para a duração total da simulação. Supõe-se uma repartição uniforme ao longo do mês, ou seja, consideram-se valores médios mensais.
- Existe possibilidade de simular a descarga do aquífero para os rios. Este fenômeno pode ser importante para conhecer o comportamento do aquífero Beberibe. A relação rio-aquífero é simulada da seguinte maneira:

Rh = cota da água no rio

Rd = cota do leito do rio

K' = permeabilidade do fundo do rio

m = espessura da camada de colmatção no fundo do rio

A' = área dentro da malha (i,j) através da qual pode ocorrer infiltração.

Se h, nível piezométrico na malha (i,j) é superior a Rd, tem-se uma vazão de infiltração (positiva se $h < Rh$, ou negativa se $h > Rh$)

$$QR = \frac{K'A'}{m} (Rh - h) = R \cdot (Rh - h)$$

onde R é fator de recarga.

Se $h < Rd$, tem-se:

$$QR = \frac{K'A'}{m} (Rh - Rd)$$

É necessário conhecer os dados de Rh, Rd e R para as malhas onde existe relação rio-aquífero. Esses dados (em particular K' e m) são difíceis de avaliar, mas podem-se conhecer limites prováveis destes parâmetros.

Os valores de descarga do aquífero ao rio, ou do rio para o aquífero, são fornecidos pelo modelo, malha por malha, para cada mês assim como anualmente.

- No caso de possível alimentação do aquífero por outros aquíferos, através de "aquítard" e devido as diferenças de piezometrias, é possível simular esses aportes. Tem-se:

$$QIS = \frac{K'A'}{m} (h - Rh)$$

onde agora: Rh = piezometria do aquífero conexo

K' = permeabilidade do "aquítard"

m = espessura do "aquítard"

A' = área através da qual existe fluxo vertical

a) Condições Espaciais e Temporais

A área do aquífero Beberibe inferior a simular limita-se, a oeste, pelo contato sedimento-cristalino; ao norte, pelo rio Goiana; ao sul, pelo município de Recife e a leste, pelo mar. Neste último limite, considerou-se a extensão do aquífero além da linha da costa, de maneira a eliminar os efeitos de imagem de um limite perto demais de áreas de exploração.

As malhas são quadradas, com 2 km de lado, tendo, portanto 4 km² de superfície. A discretização espacial do aquífero está representada na Figura 2.

O início da simulação para o ajuste foi considerado em junho de 1974. O tempo de simulação é de um ano e os resultados são apresentados no fim de cada mês.

b) Condições Hidrodinâmicas

Existem poucos dados de transmissibilidade, tendo-se utilizado valores de testes de 7 poços. A partir desses dados, foram extrapolados os valores de T para toda a área.

Foi adotado um valor inicial do coeficiente de armazenamento S igual a $3 \cdot 10^{-4}$ para toda a área. Os valores de S, assim como sua distribuição espacial, constituem uma variável, na qual se atuou, para ajuste do modelo.

c) Bombeamento

As descargas por bombeamento foram obtidas diretamente da pesquisa de campo, que permitiu ter o valor anual de exploração. Os poços que exploram o aquífero Beberibe inferior são principalmente para indústrias e abastecimento de cidades, o que permite considerar um regime de exploração aproximadamente constante.

O volume total bombeado no período considerado no modelo (julho de 1974 a julho de 1975) é de $B = 6,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Figura 2).

d) Infiltração Direta da Chuva

A possível infiltração proveniente da chuva e recarregando diretamente o aquífero ocorre na parte alta, isto é, a oeste. Podem se distinguir duas zonas com valores de infiltração diferentes:

- a área onde aflora a formação Beberibe
- a área aluvial do rio Goiana

Os valores dessa recarga direta são fornecidos pela equação:

$$I (\text{m}^3) = P (\text{mm}) \cdot a^2 (\text{m}^2) \cdot i (\%) \times 10^3$$

Foram utilizados os seguintes valores de precipitação:

P (mm)	abril	maio	junho	julho	agosto
	220	290	280	240	150

Os valores da taxa de infiltração (i) considerados foram de 5% para a área de afloramento da formação Beberibe e de 6% para a área aluvial do rio Goiana.

Nestas condições a recarga total anual é de:

$$I = 40,7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Este valor de infiltração foi considerado com base nos valores de fluxo natural determinados pela equação de Darcy, a partir da rede de fluxo. Ele é aproximadamente 10 vezes menor do que os calculados a partir das descargas dos rios, ou seja, dos valores de "groundwater runoff".

Se as infiltrações no aquífero inferior correspondessem a todo o "groundwater runoff" (da ordem de 35% da precipitação média anual), deveriam ocorrer flutuações dos níveis d'água na área de recarga de muito grande amplitude ou uma porosidade eficaz muito elevada, o que não concorda com as observações de campo e os dados existentes. Com efeito, as flutuações dos níveis d'água na área de recarga, em sondagens situadas nos topos dos tabuleiros e afastadas dos vales, não ultrapassam a 1m. Para que ocorresse uma infiltração da magnitude das descargas dos rios e apenas uma pequena flutuação dos níveis d'água, o coeficiente de armazenamento, segundo cálculos realizados, seria da ordem de 0,22 a 0,44 (SUDENE, CONESP, OESA, 1976). Estes valores podem ser considerados muito altos para os arenitos argilosos da seção inferior da formação Beberibe, podendo ocorrer nos níveis arenosos mais superficiais.

Nestas condições, admite-se que grande parcela do "groundwater runoff" seja proveniente de escoamento sub-superficial (escoamento hipodérmico) ou de níveis suspensos, correspondendo, portanto, àquela parte que se infiltra no solo sem contudo atingir o lençol freático ou nível de saturação geral. Além destes dados, verifica-se, na área de recarga, a ocorrência de fontes ou ressurgências que se situam muito acima do nível de saturação geral, indicando a existência de níveis suspensos.

Esta situação ocorre normalmente na maioria dos aquíferos profundos onde a recarga se processa através de espessos depósitos que incluem materiais argilosos, sendo a infiltração, nestes aquíferos, menor do que o "groundwater runoff" sob condições normais.

Do exposto anteriormente, parece mais coerente admitir uma infiltração efetiva do aquífero inferior da ordem de 5%, embora a parte do "groundwater runoff" que corresponderia a níveis suspensos e escoamento hipodérmico seja muito grande, havendo desta maneira, muita incerteza quanto aos valores de infiltração efetiva e às próprias medidas de descargas dos rios.

e) Relação Rio-aquífero

Foi considerada a relação do aquífero com os rios: Goiana, Itapirema, Jardim, Botafogo, Bonança, Utinga, Barro Branco, Paratibe e Beberibe (Figura 3). O valor do coeficiente $R = \frac{K'A'}{m}$ foi definido considerando uma espessura m da camada m semi-permeável no leito do rio da ordem de 5 metros. A superfície A' , através da qual se realizam as conexões rio-aquífero, é variável, tendo sido obtida diretamente dos mapas topográficos na escala 1:25.000, enquanto K' constitui uma das variáveis de ajuste do modelo.

Os valores de R_d , foram obtidos também, a partir dos mapas já indicados, enquanto o valor de R_h definiu-se como sendo 1m acima de R_d .

f) Relação aquífero superior-aquífero inferior

A área onde ocorre possível "leakage", isto é, onde há transferência de água do aquífero inferior para o aquífero superior, foi definida como aquela situada a leste do meridiano no UTM 90 (Figura 3).

A piezometria do aquífero superior é suposta constante ao longo do tempo.

Para a determinação dos valores do fator de descarga R foram considerados 16 perfis de poços. Os valores de espessura do "aquitarde" (m) variam de 2m até 20m. Os valores de K' constituem variáveis para o ajuste do modelo.

g) Condições dos bordos

Os limites do modelo foram considerados com potencial constante no tempo, variando espacialmente. Para comodidade e a fim de evitar valores negativos para h, todos os níveis piezométricos foram incrementados de 100m. Nestas condições, o potencial do mar foi considerado como igual a 100m. Na parte oeste, a condição de potencial constante é bastante provável, já que não existe praticamente exploração próxima a este limite. Ao norte, o limite do rio Goiana também pode ser considerado como de potencial constante, enquanto ao sul, a orientação das equipotenciais, praticamente paralelas à costa, fazem admitir uma linha de fluxo perpendicular ao oceano.

RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados 11 testes para a calibragem do modelo, durante os quais, modificaram-se os diversos parâmetros de ajuste. A calibragem do modelo foi baseada sobre uma série de hipóteses:

- a) A piezometria inicial h_0 correspondente ao mês de junho de 1974 é conhecida;
- b) Os bombeamentos na área, para o período de junho de 1974 a julho de 1975, correspondem à realidade;
- c) a distribuição e os valores de T são conhecidos;
- d) Os valores de precipitação P utilizados são semelhantes aos do período de estudo.

Por suposição, essas hipóteses estão sujeitas a uma margem de erro, que limita as possibilidades de obter um modelo perfeitamente representativo da realidade.

Os parâmetros de ajuste e os critérios examinados foram:

- Distribuição e valor do coeficiente de armazenamento S;
- influência do "leakage";
- influência das perdas aos rios.

O controle do modelo foi realizado com base em:

- O exame do balanço hidrológico;
- o exame das variações piezométricas em 4 piezômetros do aquífero inferior para o período de fevereiro a setembro/outubro de 1975.

Os resultados finais podem ser sintetizados da seguinte maneira:

- Os valores de S variam de 10^{-3} a 3×10^{-4} ;
- os valores da permeabilidade do "aquitarde" entre o aquífero inferior e superior são: $K' = 10^{-9}$ m/s; na área de Olinda este valor atinge 10^{-7} m/s;
- aparece clara a delimitação do aquífero em duas partes: uma livre e outra confinada. A primeira tem um coeficiente de armazenamento de pelo menos 10^{-3} e a segunda de $3 \cdot 10^{-4}$. Esse confinamento na segunda parte, é variável espacialmente e não é totalmente rígido;

- os rios drenam um volume anual da ordem mínima de $30,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Figura 3). Esses rios têm uma relação direta com o aquífero, isto é, não existe praticamente colmatção dos rios;
- a relação hidráulica entre os aquíferos superior e inferior mostra que existe um fluxo vertical. As perdas anuais do aquífero inferior para o superior são de $7,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, isto é, 17% das saídas totais;
- o balanço hídrico apresenta-se da seguinte maneira:

<u>Entradas:</u>	I	=	$40,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	Entradas + saídas laterais	=	$8,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	Total	=	$48,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
<u>Saídas :</u>	B	=	$6,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	Saídas rios	=	$30,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	Saídas "leakage"	=	$7,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
	Total	=	$44,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

As variações piezométricas obtidas pelo modelo mostram resultados aceitáveis na orientação geral, considerando o estágio preliminar do ajuste e os dados ainda escassos, com pequeno período de observação. Na figura 4 são mostradas a superfície piezométrica para $t = 300$ dias e as variações piezométricas comparadas às observadas nos piezômetros.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As hipóteses admitidas e os dados utilizados para o ajuste estão sujeitos a uma margem de erro que limita as possibilidades de se obter um modelo perfeitamente representativo da realidade. As características hidrodinâmicas na zona confinada e os coeficientes de permeabilidade do "aquítard", assim como o modelo físico geral parecem bem definidos. Há dúvidas, todavia, sobre as taxas de infiltração, as saídas aos rios e a porosidade eficaz da zona livre do aquífero, que não mostram boa correspondência com os dados existentes.

É recomendável que este modelo, dadas suas características dinâmicas, seja progressivamente aperfeiçoado e alimentado com os resultados das novas investigações hidrogeológicas, de modo a possibilitar cada vez maior calibração e poder ser utilizado no futuro com a máxima segurança nas previsões de exploração.

Para tanto, faz-se necessário dar continuidade às observações periódicas e testes de campo, por um longo período, da mesma maneira como se deverá proceder com as medições plúvio-fluviométricas.

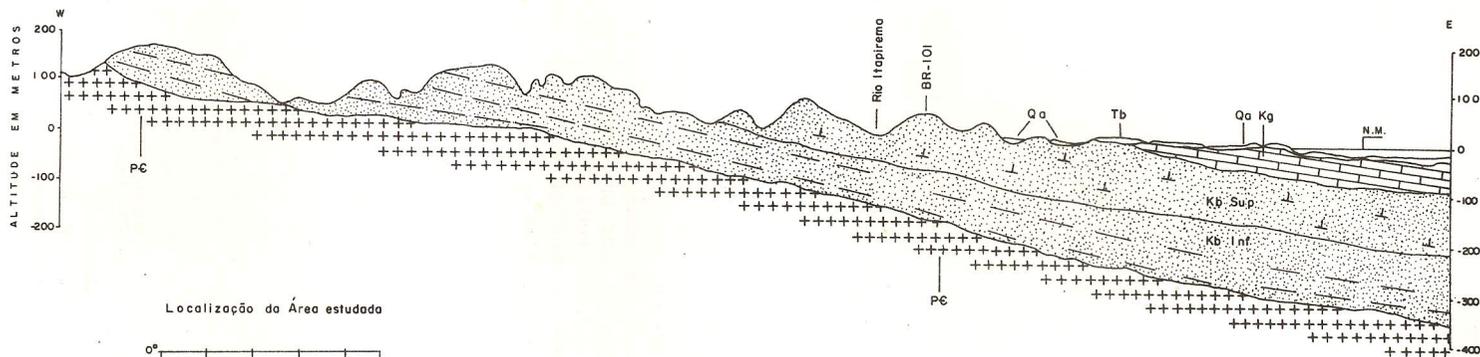
Sugere-se, também, aumentar o número de malhas na área de Olin da para um estudo de maior detalhe.

BIBLIOGRAFIA

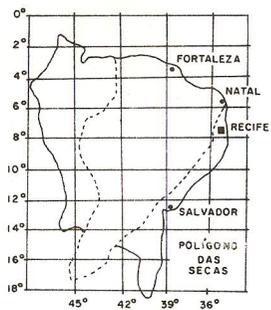
- BEURLEN, K. - 1967 - Estratigrafia da Faixa Sedimentar Costeira Recife João Pessoa. Bol. Soc. Bras. Geol. 16(1), pp. 43-56, São Paulo.
- BEZERRA, M.A., ALMEIDA, J.C. e SOUZA, P.C. - 1970 - O Aquífero Beberibe e as melhores Áreas de Captação de Água Subterrânea. Anais XXIV Cong. Bras. Geol., pp. 335-348, Brasília.
- CUSTÓDIO, E., CRUZ, W.B., SILVA, A.B., JARDIM, F.G., PEIXOTO, C.A.M. - 1977 - Estudo sobre as Possibilidades de Intrusão Marinha no Aquífero Beberibe, Região Costeira de Olinda-Goiana (PE). Bol. Soc. Bras. Geol., 7(3), pp. 239-255, São Paulo.
- MABESOONE, J.M. - 1967 - Sedimentologia da Faixa Costeira Recife-João Pessoa. Bol. Soc. Bras. Geol., 16(1), pp. 57-52, São Paulo.
- PRICKETT, T.A., e LONNQUIST, C.G., 1971 - Selected Digital Computer Techniques for Ground water Resource Evaluation. Illinois State water Survey, Bull. 55, Urbana, 1971.
- SUDENE-CONESP-OESA - 1976 - Estudos de Reconhecimento e Estudos Hidrogeológicos para Aproveitamento Integrado da Região Centro-leste da Bacia Potiguar e Bacia Costeira de Pernambuco-Paraíba. SUDENE, (inédito). Recife.

BACIA COSTEIRA DE PERNAMBUCO - PARAÍBA
 CORTE GEOLÓGICO TRANSVERSAL BARRA DE CATUAMA - ITAPIREMA

FIG. 1



Localização da Área estudada



LEGENDA

- Qa - Areia de praia e aluvião recente
- Tb - Grupo Barreiras
- Kg - Formação Gramame
- Kb Sup - Formação Beberibe Superior
- Kb Inf - Formação Beberibe Inferior
- PC - Embasamento Cristalino

ESCALA GRÁFICA



MALHAS COM BOMBEAMENTOS E BALANÇO ENTRE AS ENTRADAS E SAIDAS DE AGUA LATERAIS

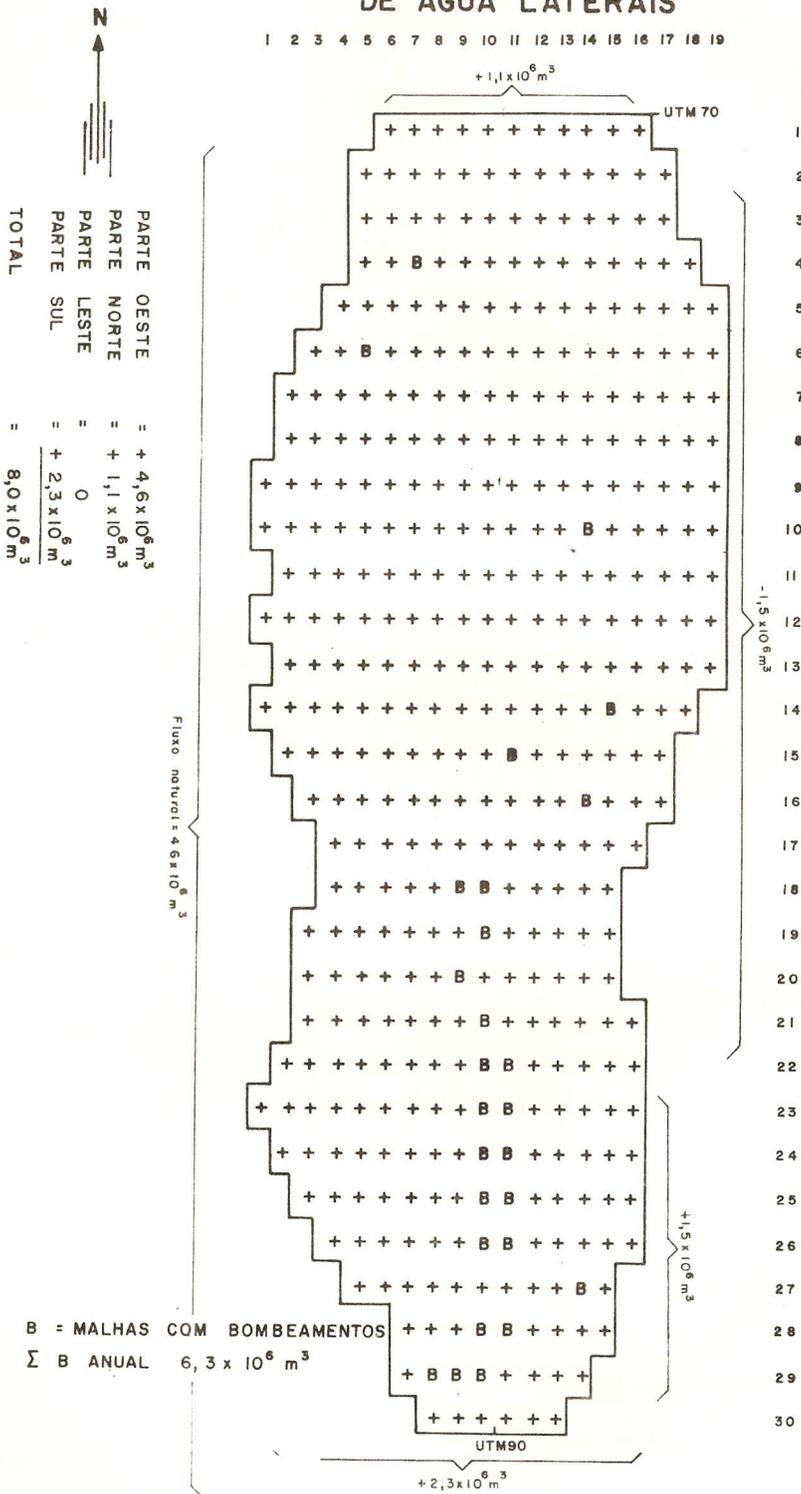


Fig. 2

DESCARGAS DO AQUÍFERO AOS RIOS

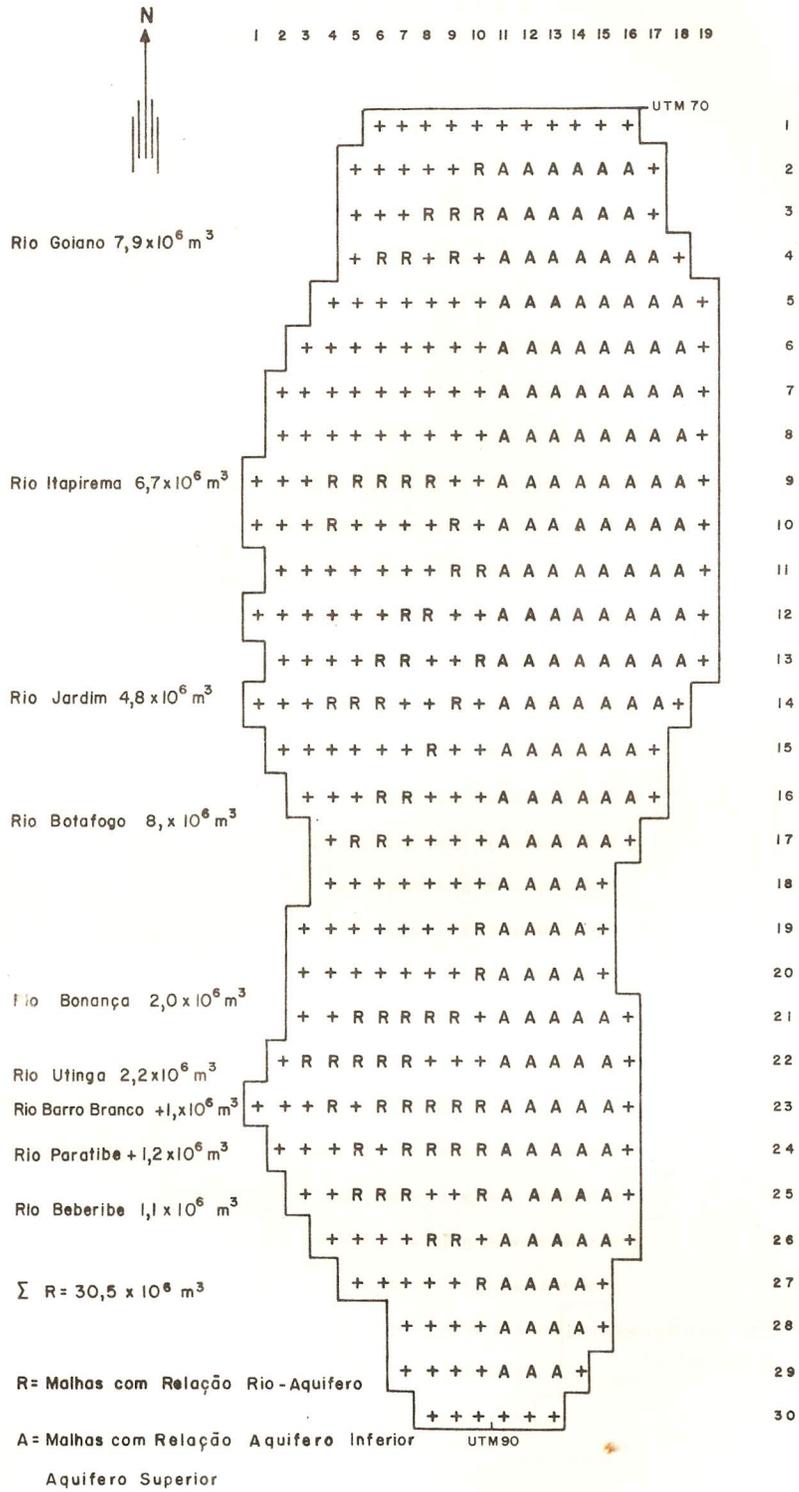
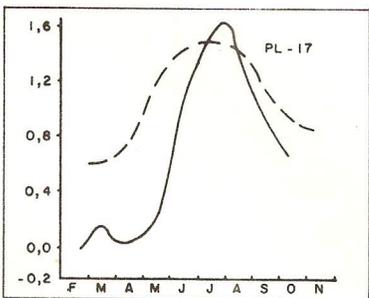
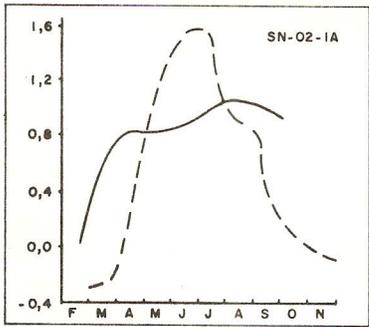
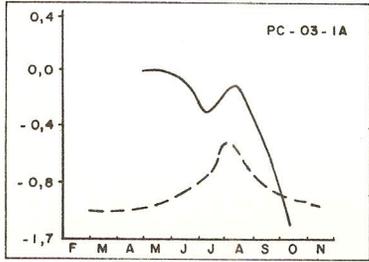
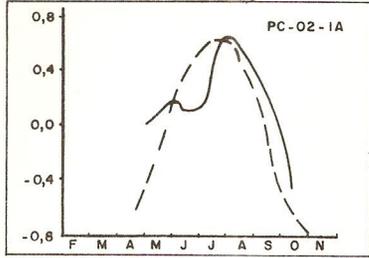
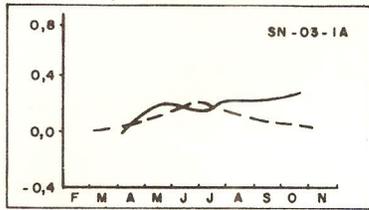
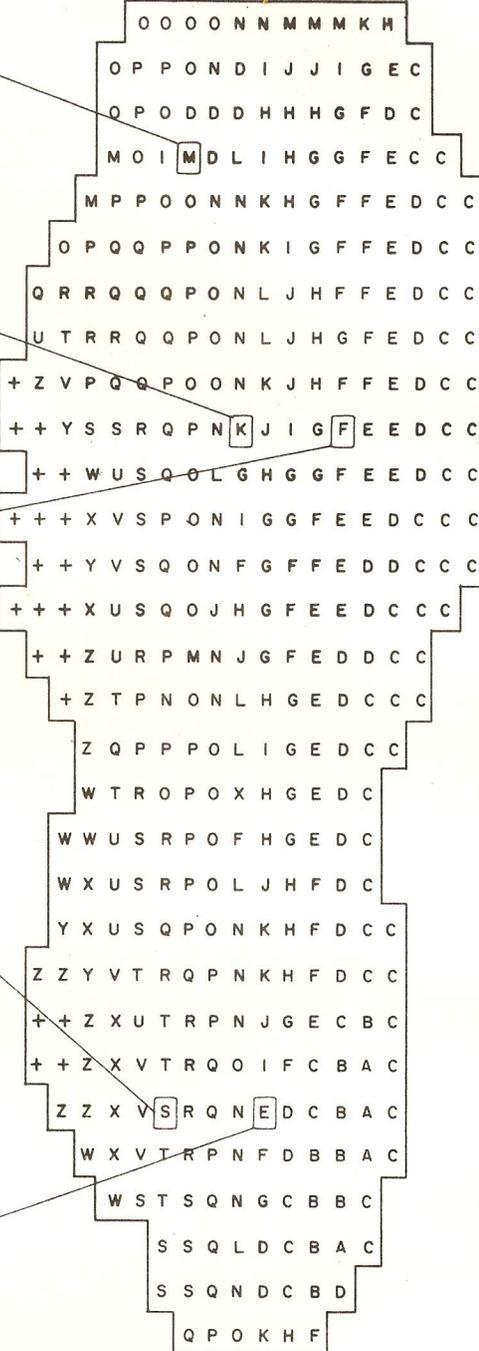


Fig.3

PIEZOMETRIA NO TEMPO t=300 DIAS E VARIACÖES PIEZOMÉTRICAS
TESTE - 11



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19



*=0	A=98	B=99	C=100	D=101	E=102	F=103	G=104	H=105	I=106
J=107	K=108	L=109	M=110	N=115	O=120	P=125	Q=130	R=135	S=140
T=145	U=150	V=155	W=160	X=165	Y=170	Z=180	+>180		

Fig. 4