



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

EMPREGO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO  
FLUXO SUBTERRÂNEO PARA DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS  
DE EXPLOTAÇÃO DE UM AQUÍFERO ALUVIAL

LUCÍLIO JOSÉ DOS SANTOS VIEIRA

CAMPINA GRANDE

ABRIL - 2002

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**EMPREGO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO FLUXO  
SUBTERRÂNEO PARA DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE EXPLOTAÇÃO  
DE UM AQUÍFERO ALUVIAL**

**LUCÍLIO JOSÉ DOS SANTOS VIEIRA**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2002**

---

**LUCÍLIO JOSÉ DOS SANTOS VIEIRA**

**EMPREGO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO FLUXO  
SUBTERRÂNEO PARA DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE EXPLOTAÇÃO  
DE UM AQUÍFERO ALUVIAL**

**Dissertação apresentada ao curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, na  
área de Engenharia de Recursos  
Hídricos, em cumprimento às exigências  
para obtenção ao Grau de Mestre**

---

**Área de Concentração: RECURSOS HÍDRICOS**

**Orientador: VAJEPEYAM S. SRINIVASAN**

**Co-Orientador: JANIRO COSTA RÊGO**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**ABRIL – 2002**





V658e Vieira, Lucílio José dos Santos.  
Emprego de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial / Lucílio José dos Santos Vieira. - Campina Grande, 2002.  
108 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2002.  
"Orientação : Prof. Dr. Vajapeyan Srirangachar Srinivasan, Prof. M.Sc. Janiro Costa Rêgo".  
Referências.

1. Aquífero Aluvial. 2. Fluxo Subterrâneo - Simulação. 3. Aquífero Aluvial - Exploração. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Rêgo, Janiro Costa. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

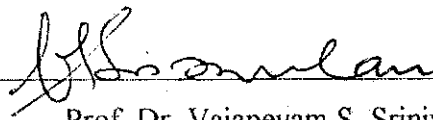
CDU 624:556.33(043)

LUCÍLIO JOSÉ DOS SANTOS VIEIRA

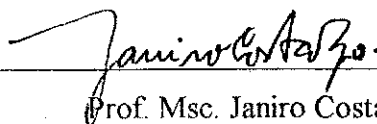
EMPREGO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO FLUXO  
SUBTERRÂNEO PARA DEFINIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE EXPLOTAÇÃO  
DE UM AQUÍFERO ALUVIAL

Aprovado em 10 de abril de 2002.

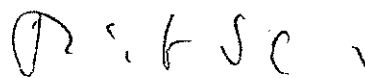
COMISSÃO EXAMINADORA



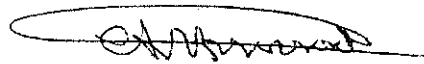
Prof. Dr. Vajapeyam S. Srinivasan  
Orientador



Prof. Msc. Janiro Costa Rêgo  
Co-Orientador



Prof. Dr. Max Hans Dieter Schuster  
Examinador



Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira Azevedo  
Examinador

A **DEUS**, por me ter permitido a **VIDA**;  
a meu **PAI**, José Marcelino Vieira e  
minha **MÃE** Rita dos Santos Vieira  
por me tê-la dado;  
e a minha **NOIVA**, Coeli Regina Mariz Alves,  
por torná-la mais feliz,  
dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Na vida, é constante o processo de aprendizado pelo qual o ser humano passa, e ele nada consegue se não tiver a ajuda de amigos nesta caminhada.

Desejo prestar agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para este trabalho; quer seja de forma direta ou indireta.

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e saúde.

Ao meu orientador, Vajapeyam S. Srinivasan, pela confiança mostrada na aceitação desta orientação.

Aos professores da Área de Engenharia de Recursos Hídricos pelos conhecimentos adquiridos e pelo esforço de fornecer uma boa formação, em especial ao professor Janiro Costa Rêgo, pessoa na qual pude encontrar, mais que um Orientador, um Amigo pronto a ajudar a qualquer instante; ao professor Carlos Oliveira Galvão pelas constantes lições de vida, que sem sombra de dúvidas foram bastante úteis no desenvolvimento da pesquisa e ao professor Hans Dieter Max Schuster, pelo interesse demonstrado pelo trabalho e as sugestões feitas.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica pelos auxílios prestados, atenção e respeito.

Aos colegas, em especial, a Hildeberto Lacerda Junior, Leonardo Neves, Marcus Carlos, Roberta Nóbrega e Walszon Terlizzie, pelo companheirismo e união em todo o período do curso.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro, através de bolsa de estudos, para a realização deste trabalho.

À minha família que foi apoio constante e incondicional: José Marcelino, meu pai, minha mãe Rita e meus irmãos Luciano, Luciene e Lucivânia e ainda à minha noiva Coeli Regina, pelo apoio e compreensão quando fui ausente.

## RESUMO

A adoção de modelos matemáticos, como ferramenta de suporte a decisão, vem aumentando a cada dia, em virtude de ter sido comprovada, sua eficiência e relativa facilidade de aplicação. Um aquífero Aluvial situado na área onde tinha sido implantado o Perímetro Irrigado de Sumé – PB, foi selecionado com o objetivo de utilizando um modelo matemático de fluxo subterrâneo bidimensional, definir alternativas para sua exploração. O modelo foi calibrado comparando os valores obtidos na modelagem com os valores obtidos em campo nos piezômetros instalado na área. Foram simuladas 08 (oito) situações distintas: o aquífero aluvial sem barragem subterrânea após um ano hidrológico regular, o aquífero aluvial com barragem subterrânea após um ano hidrológico regular, o aquífero aluvial com barragem subterrânea após um ano hidrológico regular seguido de um ano de estio, o aquífero aluvial sem barragem subterrânea em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, o aquífero aluvial sem barragem subterrânea em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio seguido de um ano de estio, o aquífero aluvial com barragem subterrânea em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, o aquífero aluvial com barragem subterrânea em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio, o aquífero aluvial após um ano hidrológico regular, seguido de um ano de estio, sem barragem submersa. Com exceção da primeira situação, as demais são hipotéticas em relação àquela encontrada na área estudada, quando da observação. Como resultado, foi possível definir a disponibilidade hídrica do aquífero e indicar formas alternativas de exploração que viessem a atender às demandas e possibilitassem uma reativação parcial do Perímetro de Irrigação.



## ABSTRACT

Mathematical models have been increasingly used for decision-making. In this study a two-dimensional groundwater model was used in order to establish alternatives for exploiting the groundwater from the alluvial aquifer of Sumé, located in the semiarid region of the state of Paraíba in Brazil. The model was first calibrated by comparing the simulated results with field observations of water levels. Following, thus various scenarios were simulated involving different ways of exploitation of the aquifer, taking into account, a submerged dam, the position of the water levels, and normal and dry years of precipitation. The results of the simulations, in each scenario, allowed determining the groundwater availability of the aquifer and establish alternatives for exploring the groundwater rationally, including the possibility of reactivating irrigation of the lend perimeter of Sumé.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>SUMÁRIO</b> .....	v
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>1.0 INTRODUÇÃO</b> .....	1 <i>ok</i>
<b>2.0 O FLUXO SUBTERRÂNEO E O SEU MODELAMENTO</b> .....	4
<b>2.1 Águas Subterrâneas – Ocorrência e Importância</b> .....	4 <i>ok</i>
<b>2.2 Aquíferos</b> .....	6 <i>ok</i>
2.2.1 Propriedades Associadas aos Tipos de Aquíferos.....	8 <i>ok</i>
2.2.2 Aquífero Aluvial.....	10 <i>ok</i>
2.2.2.1 Aquífero Aluvial no Nordeste do Brasil.....	11 <i>ok</i>
<b>2.3 Barragem Submersa</b> .....	14
<b>2.4 Modelação Matemática</b> .....	16
<b>2.5 Equação do Fluxo de Água Subterrânea</b> .....	16
2.5.1 Equação do Fluxo de Água Subterrânea – Aquíferos Livres.....	18
<b>2.6 Método das Diferenças Finitas</b> .....	20
2.6.1 Método Explícito.....	21
2.6.2 Método Implícito.....	23
2.6.3 Métodos de Solução de Equações.....	24

2.6.3.1 Métodos Diretos.....	24
2.6.3.2 Métodos Iterativos.....	24
2.6.3.3 Métodos Mistos.....	25
<b>3.0 O AQÜÍFERO ALUVIAL.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Clima.....	27
3.1.2 Temperatura.....	27
3.1.3 Umidade Relativa do Ar.....	28
3.1.4 Insolação.....	28
3.1.5 Vegetação.....	28
3.1.6 Geologia.....	28
<b>3.2 Caracterização Litológica e Dimensional.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 Hidrogeologia do Sistema Aquífero.....</b>	<b>39</b>
3.3.1 Medições e Observações de Campo.....	39
3.3.1.1 Levantamento dos Pontos d'água.....	39
3.3.1.2 Poço de Pesquisa Construído.....	40
3.3.1.3 Campanha de Medição de Nível d'água.....	41
<b>4.0 O MODELAMENTO.....</b>	<b>42</b>
4.1. Definição do Modelo.....	42
4.2 Características Gerais.....	42
4.3 Área Escolhida Para o Modelamento.....	44
4.4 Descrição do Modelo.....	46
4.5 Condições de Contorno.....	47

4.6 Calibração do Modelo.....	48
<b>5.0 ALTERNATIVA PARA EXPLOTAÇÃO DO AQÜÍFERO.....</b>	<b>52</b>
5.1 Demandas para Irrigação.....	52
5.2 Inserção de Barragem Subterrânea.....	55
5.3 Inserção de Poços.....	58
5.4 Critérios e Cenários adotados para Simulação da Exploração do Aquífero.....	60
<b>6.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>61</b>
6.1 Cenário 01: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, sem barragem submersa.....	61
6.2 Cenário 02: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, com barragem submersa.....	65
6.3 Cenário 03 Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, seguido de um ano de estio com barragem submersa.....	68
6.4 Cenário 04 Aquífero aluvial sem barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio.....	71
6.5 Cenário 05: Aquífero aluvial sem barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio.....	74
6.6 Cenário 06: Aquífero aluvial com barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio.....	77
6.7 Cenário 07: Aquífero aluvial com barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio.....	80
6.8 Cenário 08: Aquífero aluvial após período hidrológico regular, seguido de um ano de estio, sem barragem submersa.....	83
6.9 Síntese dos Resultados Obtidos com a Simulação da Exploração do Aquífero.....	86
<b>7.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>87</b>

<b>8.0 BIBLIOGRAFIA</b> .....	89
<b>ANEXOS</b> .....	94
Anexo 1: Fichas de Registro de Sondagens.....	95
Anexo 2: Teste de Bombeamento.....	104
Anexo 3: Evolução Temporal do Nível d'água nos Piezômetros.....	108

## LISTA DE TABELAS NOS CAPÍTULOS

### Capítulo 2

2.1	Valores de Porosidade e Permeabilidade de algumas rochas	10
-----	--	----

### Capítulo 3

3.1	Síntese das características litológicas e dimensionais das sondagens realizadas no Perímetro Irrigado de Sumé – PB.	33
3.2	Pontos d'água levantados na área do Perímetro Irrigado de Sumé	39
3.3	Parâmetros Hidráulicos obtidos no teste de aquífero	41

### Capítulo 4

4.1	Parâmetro Hidráulicos, com os quais o modelo foi calibrado.	50
-----	---	----

### Capítulo 6

6.1	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 01	62
6.2	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 02.	65
6.3	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 03	69



6.4	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 04.	71
6.5	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 05	74
6.6	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 06	77
6.7	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 07	80
6.8	Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 08	83
6.9	Resumo dos resultados obtidos nos cenários simulados	86

## LISTA DE FIGURAS NOS CAPÍTULOS

### Capítulo 2

2.1	Ciclo Hidrológico completo (Fonte: ABASMG)	4
2.2	Tipos de aquíferos produtivos (Fonte: adaptado de Morese, 1998)	7
2.3	Porosidade e Permeabilidade	9
2.4	Malha centrada nos vértices das células	21

### Capítulo 3

3.1	Localização Geográfica da Área Estudada	29
3.2	Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.	30
3.3	Perímetro Irrigado de Sumé.	31
3.4	Distribuição Estatística das Profundidades atingidas nas Sondagens	38
3.5	Perfil Longitudinal do Perímetro Irrigado Sumé – PB	38

### Capítulo 4

4.1	Área Escolhida para o modelamento	45
4.2	Malha Definida para o Modelamento e Localização dos Piezômetros de Observação	47
4.3	Entrada de Dados no Modelo	47
4.4	Relação entre os valores observado e calculado	49
4.5	Relação entre os valores observado e calculado no piezômetro 84	50

4.6	Correlação entre os valores observado e calculado no piezômetro 84	50
4.7	Relação entre os valores observado e calculado no piezômetro 57	51
4.8	Correlação entre os valores observado e calculado no piezômetro 57	51
Capítulo 5		
5.1	Precipitações médias mensais e Evapotranspiração Potencial no posto de Sumé – PB	54
5.2	Perfil Longitudinal da Área da Modelada.	56
5.3	Localização da Barragem submersa na Área Modelada	57
5.4	Localização dos poços na área de modelamento	59
5.5	Refinamento da malha nas proximidades dos poços	59
Capítulo 6		
6.1	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 01	63
6.2	Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal e sem barragem subterrânea) cenário 01	64
6.3	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 02	66
6.4	Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal e com barragem subterrânea), Cenário 02.	67
6.5	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 03.	69

6.6	Vazões Máximas explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal seguido de estio e com barragem subterrânea), cenário 03	70
6.7	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 04.	72
6.8	Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível d'água inicial na cota do talvegue do rio, sem barragem subterrânea), cenário 04.	73
6.9	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 05.	75
6.10	Vazões Máximas explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível; d'água inicial na cota do talvegue, sem barragem subterrânea), cenário 05	76
6.11	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 06	78
6.12	Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (nível d'água inicial na cota do talvegue do rio e com barragem subterrânea), cenário 06	79
6.13	Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 07	81
6.14	Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível d'água inicial na cota do talvegue do rio e com barragem, seguido de um ano de estio), cenário 07	82
ANEXOS		93
1	Ficha de Registro de Sondagens	94
2	Teste de Bombeamento	104
3	Evolução Temporal do Nível d'água nos Piezômetros	108

## 1.0 – INTRODUÇÃO

A utilização das águas subterrâneas remonta aos primórdios das civilizações, quando eram exploradas através de poços rasos, escavados, cujos vestígios mais antigos datam de 12.000 antes de Cristo. A Bíblia relata muitos incidentes ilustrando a importância das águas subterrâneas para abastecimento das tribos de Israel.

No Brasil a utilização das águas subterrâneas vem aumentando. Nas últimas décadas, tem se observado uma tendência crescente de se buscar água subterrânea para o abastecimento público. Segundo os dados mais recentes do IBGE (censo 1998), 61% da população se abastece do manancial subterrâneo: por meio de poços rasos (6%), nascentes (12%) e poços profundos (43%). O Estado de São Paulo é, certamente, o maior usuário das águas subterrâneas no Brasil, tendo cerca de 65% dos seus núcleos urbanos e cerca de 90% das indústrias abastecidas parcial ou totalmente por poços. Neste particular, deve-se salientar que, face às potencialidades hidrogeológicas do território brasileiro, para 80% das nossas cidades as águas subterrâneas constituem a alternativa mais barata, sobretudo por dispensarem as onerosas obras de engenharia para captação, adução e, sobretudo, pelos crescentes custos de tratamento.

Nas regiões semi-áridas, em particular no Nordeste do Brasil, as águas subterrâneas utilizadas são em grande parte provenientes dos aquíferos aluviais rasos, uma vez que os mesmos representam uma importante forma de abastecimento, acessível às comunidades desta região.

De acordo com Costa (1997) no Nordeste, os aluviões cobrem uma área de 35.000km<sup>2</sup>, possuindo reserva exploráveis de  $1 \times 10^9$  a  $2 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/ano

Na Paraíba, dentre os sistemas aquíferos existentes o mais importante é o aluvial, tanto para o uso doméstico, como para a irrigação; Albuquerque (1986), identifica esta importância como sendo devido ao sistema aluvial possuir ocorrência em quase todo o domínio do semi-árido, com características litológicas, dimensionais e hidroquímicas favoráveis.

A diminuição da oferta hídrica na região semi-árida do Nordeste vem se tornando cada vez mais acentuada, provocada em sua grande parte pela falta de um adequado e racional gerenciamento dos recursos hídricos; o que faz com que o maior problema não seja a escassez, mas a forma como está sendo utilizado este recurso.

Como forma de tentar suprir as comunidades com água e meios para uma sobrevivência a partir dela, os governos municipais, estaduais e federal, promoveram nas últimas décadas a construção de pequenos e médios açudes, na maioria das vezes sem um estudo adequado; como também a criação de perímetros irrigado à jusante de alguns. Contudo a falta de gerenciamento, como já foi citado, implicou na falência de grande número de perímetros.

No caso específico do Perímetro Irrigado de Sumé – PB, a falta de gerenciamento dos recursos hídricos regularizáveis caracterizada pela construção indiscriminada de açudes a montante do reservatório de Sumé, provocou um esvaziamento progressivo do mesmo, sendo ainda agravado pelos anos de baixa pluviometria. Todos estes fatores somados implicaram no colapso total do abastecimento d'água da cidade de Sumé e na desativação do sistema de irrigação do Perímetro.

Diante do quadro acima, aumentou muito a necessidade de implantação de formas alternativas de incrementar a oferta hídrica, com o objetivo de atender às demandas para irrigação. Isso tornou a exploração de mananciais de águas subterrâneas cada vez mais necessária, como uma alternativa possível à reativação, se não total, pelo menos parcial do Perímetro Irrigado.

O primeiro passo para a resolução do problema consiste em quantificar o volume d'água existente no manancial subterrâneo e o quanto dele poderia ser retirado, para o atendimento das demandas.

Os modelos de simulação matemática, que nada mais são do que uma representação artificial de uma realidade física apresenta-se como ferramenta útil para o desempenho dessa tarefa de quantificação dos Recursos Hídricos.

Este trabalho apresenta alternativas de exploração do aquífero aluvial, na área do



perímetro irrigado de Sumé - PB, obtidas com o emprego de um modelo computacional que simula bidimensionalmente o aquífero.

Foi definida uma área para o modelamento, onde é estudado o comportamento do aquífero freático, quando este é submetido à exploração por poços devidamente locados de forma a apresentar maior eficiência quanto à captação, como também a influência da inserção de barragem submersa.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos principais conceitos empregados neste trabalho.

No capítulo 3 é descrita a área do perímetro Irrigado de Sumé.

No capítulo 4 é apresentado o modelo empregado neste trabalho, como ainda a área escolhida para o modelamento.

No capítulo 5 são feitas as simulações do manejo racional do aquífero.

Observou-se, com a conclusão deste trabalho, que o modelo empregado mostrou ser uma ferramenta muito importante na simulação de situações possíveis de ocorrer no aquífero e poderá ser utilizado como ferramenta de suporte a decisão na busca da melhor forma de reativar o aquífero.

O trabalho ainda mostrou que o aquífero é bastante sensível a intervenções, e que a possibilidade de reativação total da área do Perímetro Irrigado está descartada, em virtude do aquífero aluvial não apresentar água suficiente. Contudo são mostradas formas de reativação parcial das áreas irrigáveis, inclusive em anos de estio.

## 2.0 – O FLUXO SUBTERRÂNEO E O SEU MODELAMENTO

### 2.1 – Águas Subterrâneas – Ocorrência e Importância

A água subterrânea corresponde à parcela mais lenta do ciclo hidrológico (Figura 2.1), e constitui nossa principal reserva de água, ocorrendo em volumes muito superiores às que são disponíveis na superfície.

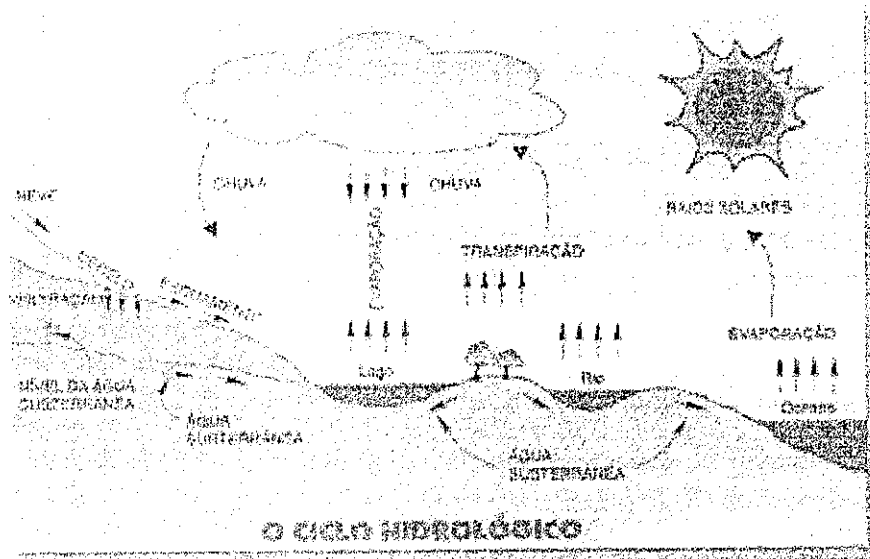


Figura 2.1 – Ciclo Hidrológico completo (Fonte: ABASMG, 1985)

As águas subterrâneas ocorrem preenchendo espaços formados entre os grânulos minerais e nas fissuras das rochas, que se denominam aquíferos; elas representam a parcela da chuva que se infiltra no subsolo e migra continuamente em direção às nascentes, leitos de rios, lagos e oceanos.

A parcela infiltrada se distribui no subsolo de modo a que se possa identificar três diferentes zonas de ocorrências.

*Zona de aeração* é à parte do solo que está apenas parcialmente preenchida por água, contendo também ar nos vazios. Nesta zona a água ocorre na forma de películas aderidas aos grãos do solo. Solos muito finos tendem a ter mais umidade do que os mais grosseiros, pois ha mais superfícies de grãos onde a água pode ficar retida por adesão.

Na zona de aeração podemos distinguir três regiões:

*Zona de umidade do solo*, mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Em alguns casos é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação desta água, dando origem a solos salinizados ou a crostas ferruginosas (lateríticas).

*Franja de capilaridade*, mais próxima do nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada logo abaixo.

*Zona intermediária*, compreendida entre as duas anteriores e com umidade menor do que na franja capilar e maior do que na zona superficial do solo.

Como já foi dito a capilaridade é maior em terrenos com granulometria muito fina.

Em áreas onde o nível freático está muito próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde ha uma intensa evaporação da água subterrânea.

*Zona de Saturação* é a região abaixo do lençol freático (nível freático) onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. Observe que em um poço escavado num aquífero deste tipo, a água o estará preenchendo até o nível freático.

Em aquíferos freáticos o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. Em épocas com mais chuva o nível freático sobe e em épocas que chove pouco o nível freático desce. Um poço perfurado no verão poderá ficar seco se sua penetração na zona saturada for menor do que esta variação do nível d'água.

Os aquíferos têm importância estratégica e suas funções são ainda pouco exploradas, tais como: produção, armazenamento, transporte, regularização, filtragem e autodepuração, além da função energética, quando as águas saem naturalmente quentes do subsolo;

Os usos múltiplos das águas subterrâneas são crescentes: abastecimento, irrigação, calefação, balneoterapia, engarrafamento de águas minerais e potáveis de mesa e outros;

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1998) estima-se que 61% do suprimento de água potável seja originado do recurso hídrico subterrâneo;

As águas subterrâneas têm grande alcance social, pois os poços, quando bem construídos e protegidos, garantem a saúde da população.

A necessidade da gestão integrada da água surge do exercício dos instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos; O controle dos usos e da qualidade das águas subterrâneas é ainda insatisfatório, dada à dispersão e a falta de articulação legal e institucional; São vários os organismos que têm atribuições intervenientes na gestão das águas subterrâneas. É necessário que esses órgãos estejam devidamente articulados para viabilizar a gestão integrada.

As legislações existentes apresentam lacunas, e até mesmo conflito, necessitando ser ajustadas para promover a gestão integrada dos recursos hídricos; Existe reconhecida carência de conhecimentos básicos em águas subterrâneas, que necessitam ser rapidamente desenvolvidos.

As principais vantagens da utilização das águas subterrâneas são que além do custo de construção de poços ser geralmente menor que o custo das obras de captação de água superficial, tais como represas, diques, e, estações de tratamento, muitas vezes sua qualidade é adequada para o consumo humano, sem necessidade de tratamento.

## 2.2 – Aquíferos

O aquífero é uma formação de rocha permeável, capaz de armazenar e fornecer quantidades significativas de água. Na zona saturada podem existir três tipos de aquíferos produtivos (Figura 2.2):

- Aquífero confinado – é uma formação geológica permeável confinada entre duas camadas impermeáveis. No seu interior e em qualquer ponto a pressão é maior que a pressão atmosférica. São geralmente aquíferos de grandes extensões e produção;
- Aquífero freático (livre) ou não-confinado – no aquífero livre a superfície freática serve como fronteira superior e está sujeita à pressão atmosférica. Tais

aquíferos são geralmente de pequena extensão e mais explorados devido ao fácil acesso;

- Aquífero semi-confinado – o aquífero semi-confinado está situado entre duas camadas semipermeáveis e relativamente delgadas, através das quais pode se processar o esgotamento da água para o aquífero ou a partir dele, devido a diferença de potencial hidráulico nas respectivas camadas.

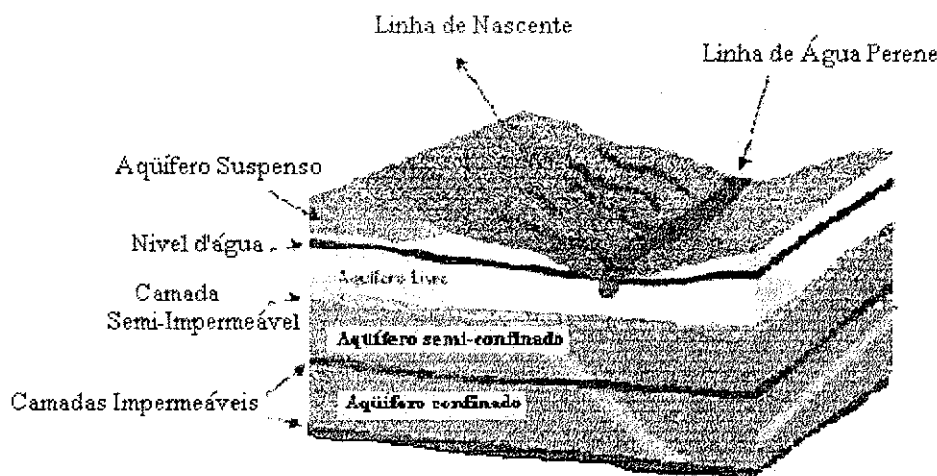


Figura 2.2 – Tipos de aquíferos produtivos (Fonte: adaptado de Morese, 1998)

A literatura também cita outras formas de armazenamento de água subterrânea denominadas por aquítarde, aquíclude e aquífugo.

- O aquítarde é uma formação geológica de natureza relativamente impermeável e semiconfinante que transmite água com velocidade muito reduzida, em comparação a um aquífero produtivo;
- O aquíclude é uma formação que embora seja capaz de absorver água, não transmite em velocidades suficientes para proporcionar um abastecimento a um poço ou a uma fonte;
- O aquífugo é uma formação sem interstícios interconectados, incapazes, portanto de absorver ou transmitir água.
- Aquíferos fissurados – Ocorrem em rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas em acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e suas intercomunicação. No Brasil a importância destes aquíferos está muito mais em sua localização geográfica, do que na quantidade

de água que armazenam. A possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá tão somente do mesmo interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Há caso em que de dois poços situados a pouca distância um do outro, somente um venha a fornecer água, sendo o outro seco. Para minimizar o fracasso da perfuração nestes terrenos, faz-se necessário que a locação do poço seja bem estudada por profissional competente. Nestes aquíferos a água só pode fluir onde houver fraturas, que quase sempre tendem a ter orientações preferenciais, e por isto dizemos que são meios aquíferos anisotrópicos, ou que possuem anisotropia.

### 2.2.1 – Propriedades Associadas aos Tipos de Aquíferos

Para existir água subterrânea ela terá de conseguir atravessar e circular através das formações geológicas que têm de ser porosas e permeáveis.

Diz-se que uma formação é porosa quando é formada por um agregado de grãos entre os quais existem espaços vazios que podem ser ocupados pela água. Aos espaços vazios chamamos poros. Existem outras formações formadas por material rochoso onde os espaços vazios correspondem a diaclases e fraturas e não propriamente a poros (Figura 2.3).

A porosidade das formações será então a razão entre o volume de vazios e o volume da formação.

Os espaços vazios podem estar conectados ou podem estar semi-fechados condicionando a passagem de água através da formação (Figura 2.3), esta característica designa-se por permeabilidade.



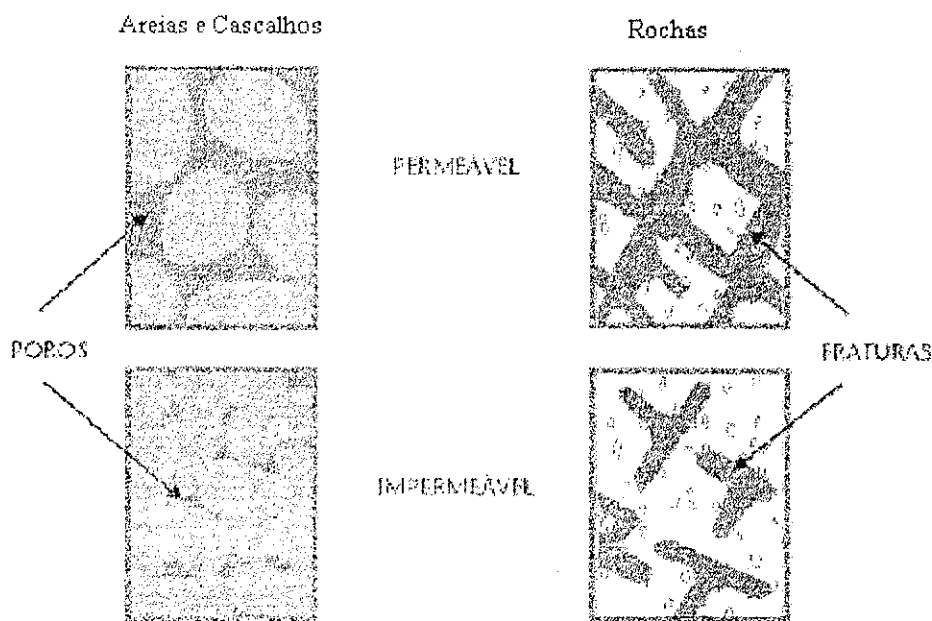


Figura 2.3 – Porosidade e Permeabilidade.

Um terreno muito poroso pode ser muito permeável se os seus poros são grandes e bem interconectados, tal como acontece nas areias limpas, ou pode ser quase impermeável se apesar de ter muitos poros, eles forem pequenos e se encontrarem semi-fechados, como acontece nas argilas ou em certos materiais vulcânicos.

Em geral os terrenos de baixa porosidade tendem a ser pouco permeáveis uma vez que as conexões entre os poros são difíceis de estabelecer, como nas rochas metamórficas e nas ígneas.

Se por um lado o armazenamento e circulação de água subterrânea dependem da porosidade e da permeabilidade das formações, por outro esta, ao circular, vai interferir nestas propriedades porque ao longo do seu percurso vai interagindo com as rochas que atravessa, dissolvendo determinadas substâncias e precipitando outras. Por exemplo, as grutas são antigos condutos onde a água ao circular foi dissolvendo minerais como a calcita e a dolomita, alargando cada vez mais a conduta. A canalização das habitações muitas vezes fica entupida porque a água foi, ao longo do tempo, precipitando calcita nos canos.

Na Tabela 2.1, mostrada a seguir, encontra-se os valores de porosidade e permeabilidade de algumas rochas.

Tabela 2.1 – Valores de Porosidade e Permeabilidade de algumas Rochas

Tipo de rocha	Porosidade (%)	Permeabilidade (m/dia)
Cascalho	30	> 1000
Areia	35	10 a 5
Argila	45	< 0.001

### 2.2.2 – Aquífero Aluvial

As formações geológicas aluviais são depósitos de origem recente (quaternária), que estão relacionadas com o desenvolvimento dos rios ou riachos, e têm como origem uma seqüência de processos que atuam na superfície da bacia hidrográfica. Os aquíferos aluviais podem ser definidos como “pacotes” de sedimentos detríticos, formados de cascalho, areia silte e argilas. Também conhecidos como aluviões ou depósitos aluviais, iniciam-se com a erosão das rochas provocada por processos como variação de temperatura e ação de agentes químicos e biológicos, seguida do transporte pela água e, finalmente, da sedimentação ou deposição desse material no próprio leito, mais abaixo das fontes de erosão (SCHEIDEGGER, 1961).

Um depósito aluvial pode ser constituído das mais variadas frações granulométricas, com predomínio, na maioria das vezes, da fração arenosa. O tipo de fração dominante irá depender fundamentalmente da capacidade de transporte de sedimento do rio ou riacho e do material rochoso sobre o qual o rio percorre.

Uma outra característica presente no aquífero aluvial é a grande variação ao longo do seu eixo (comprimento), das outras duas dimensões (largura e espessura). É comum encontrarem-se zonas de extrema largura e outras de estrangulamento, alternando, essa intensa variação de dimensões, dificulta a avaliação das reservas hídricas acumuladas e disponíveis para exploração, em estudos de planejamento de uso de recursos hídricos subterrâneos (COSTA, 1986).

A recarga de um aquífero aluvial se processa através das chuvas que caem diretamente sobre o leito aluvial, como também do escoamento superficial proveniente de sua bacia de captação (MONTEIRO 1984).

Davis e De Wieste (1966, in CUSTODIO E LLAMAS, 1976), definem cinco razões que explicam os interesses em explorar água subterrânea destas formações aquíferas:

- i. São fáceis de escavar ou perfurar, tornando a exploração rápida e barata;
- ii. Frequentemente estas formações se encontram depositadas nos fundos dos vales, onde o nível freático se encontra próximo a superfície do terreno.
- iii. Quase sempre estão em localização que favorecem as recargas provenientes dos rios, riachos ou lagos;
- iv. Os sedimentos apresentam uma porosidade efetiva maior que das outras formações hidrogeológicas aquíferas;
- v. Os valores das condutividades hidráulicas apresentam-se maiores que as outras formações hidrogeológicas.

#### 2.2.2.1 – Aquífero Aluvial no Nordeste do Brasil

Os depósitos aluviais representam um importante sistema aquífero para captação e acumulação de água muito comuns na região semi-árida do Nordeste do Brasil face às características climáticas presentes nesta região (ALBUQUERQUE, 1986).

A primeira análise sobre as possibilidades hidrogeológicas dos aluviões é de Cederstrom e Assad (1964:42, in ALBUQUERQUE, 1984), onde foram feitas considerações teóricas sobre o processo de armazenamento d'água nos depósitos aluviais, em função da litologia dos mesmos, aventando a hipótese de que vários rios do nordeste brasileiro estarem assoreados pelos aluviões.

Schoff (1964:30, in ALBUQUERQUE, 1984), não percebeu a importância dos aluviões, referindo-se apenas aos aluviões da bacia do rio do Peixe, como possível aquífero daquela área, desconhecendo no entanto suas espessuras e litologias, e citando os aluviões do vale do São Francisco como de capacidade armazenadora.

Segundo ALBUQUERQUE, 1984, o PLIRHINE (Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil – fase I), assegura, ainda que os potenciais e reservas dos aquíferos são consideráveis nos rios e afluentes principais que demandam das vertentes sententrional do planalto da Borborema, entre eles o Piranhas, onde ocorrem espessuras e litologias favoráveis.

O sistema aquífero aluvial da bacia do rio Piranhas, em função do condicionamento geomorfológico, caracterizado pela existência de terraços de sedimentação, apresentam características dimensionais mais favoráveis que as demais bacias hidrográficas paraibanas, onde os aluviões constituem, apenas, depósitos atapetando o leito de trechos de rios e riachos formadores destas bacias, (ALBUQUERQUE, 1984).

As características dimensionais do sistema são, pois, maiores na bacia do Piranha, onde as espessuras totais atingem 13m ou mais, as saturadas, 6 a 8 ou mais e as dimensões superficiais variam de 100 até 2.000m de largura com o comprimento se estendendo por toda a extensão dos cursos da rede de drenagem, raramente sendo interrompidos por afloramento do substrato cristalino impermeável, (ALBUQUERQUE, 1984).

Até o fim da década de 70, a abordagem quantitativa que se fazia dos recursos de água subterrânea baseava-se na quantificação das chamadas reservas, dadas pelo volume de rocha aquífera saturada de água subterrânea. Compunham estas reservas duas parcelas: as reservas permanentes e as reservas exploráveis, estas, freqüentemente tomadas como um percentual daquelas (5, 10, 20, 25%, valor adotado pelo sentimento de cada autor), à qual se acrescia todo o escoamento subterrâneo regido pela Lei de Darcy. Alguns autores e trabalhos consideram como reservas exploráveis o contingente de águas subterrânea correspondente à variação anual entre os níveis hidrostáticos máximo e mínimos de um aquífero, chamadas de reservas reguladoras, sem, no entanto relaciona-las com os demais componentes do ciclo hidrológico em seu segmento subterrâneo: os escoamentos de base de cursos d'água superficiais e o escoamento descarregado diretamente ao mar. (ALBUQUERQUE & RÊGO, 1992).

Segundo ALBUQUERQUE & RÊGO, é preciso que se façam avaliações de disponibilidades em função dos potenciais (recursos anualmente renováveis, em média de longo período) e não de reservas de sistemas aquíferos (recursos acumulados em épocas geológicas pretéritas).

Os aluviões são rapidamente reabastecidos pelo processo de infiltração, provenientes das precipitações que ocorrem sobre as bacias hidrográficas que as contém e das enchentes que ocorrem sobre os leitos dos rios ou riachos, que formam os aluviões típicos do Nordeste do Brasil.

A partir de 1979, a CDRM (Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Estado da Paraíba), realizou uma série de estudos expeditos sobre os aluviões, compreendendo execução de sondagens e abertura de poços tubulares rasos (de pequeno

diâmetro ou Amazonas), para o conhecimento das características dimensionais e para determinação das taxas de produção, respectivamente. Estes estudos foram realizados para a cidade de Catolé do Rocha – PB e para escola estadual Agrotécnica, com o objeto de suprimento hídrico da população e para irrigação, respectivamente.

A Universidade Federal da Paraíba, através da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, vem desde a década de 90, desenvolvendo vários trabalhos de pesquisa, cujas áreas de estudos são os Aluviões Nordestinos.

SANTOS (1992) analisou o comportamento de aquífero aluvial, durante o período de estio, utilizando um modelo matemático, e forneceu importantes parâmetros que poderiam ser utilizados em pequenos projetos de aproveitamento e planejamento dos Recursos Hídricos, a área estudada faz parte da micro-região homogênea de Catolé do Rocha.

Outra região bem estudada pela Universidade Federal da Paraíba foi a área do aluvião Riacho do Chafariz próximo a cidade de Santa Luzia – PB, o primeiro trabalho realizado nesta área 1986 – 1988 teve um abordagem geofísica onde foram realizadas sondagens geoeletricas verticais (VITORINO, 1991) foram ainda determinadas profundidades até o embasamento cristalino o qual eram muito variáveis, entre 1 e 10 m (SCHUSTER, VITORINO & BISCHOFF, 1988).

OLIVEIRA (1992), continuando o estudo já realizado definiu melhor a área do aluvião, com o auxílio de fotos aéreas; durante o trabalho foram perfurados vários poços de observações, e feito um acompanhamento do nível d'água. Nesta ocasião, foi primeiramente realizada uma simulação numérica unidimensional utilizando um modelo simples de simulação com um programa computacional utilizando o método de Diferenças Finitas (MDF).

MONTEIRO (1997) estudou ainda na área de Santa Luzia – PB a influência da geomorfologia em relação aos níveis freáticos ao longo do curso do aluvião, utilizou um modelo bidimensional e como resultado principal verificou que a superfície freática e a vazão de depleção na saída da barragem B1 (barragem submersa existente) do aluvião não depende tanto de sua largura e sua geometria horizontal, mas sim da inclinação de seu respectivo embasamento cristalino.

RABELO (2000) simulou-se um sistema de barragens submersas sucessivas, com a finalidade de aproveitar melhor a potencialidade do aquífero aluvial, os resultados obtidos de reserva hídrica, quando considerada a presença de barramentos sucessivos em

comparação a situação sem estes barramentos, justificam a construção destas, isso ainda foi reforçado quando as vantagens naturais dos reservatórios subterrâneos, produzido por tais barragens, são levados em conta.

A Universidade Federal da Paraíba (ATECEL, 1999) tem desenvolvido diversos trabalhos em aluviões Nordesteiros, entre eles destacam-se os Estudos realizados com o objetivo de definir a Potencialidade e Disponibilidade Hídricas dos aluviões: do Rio Sucuru, em Sumé - PB, do Açude Público Eng<sup>o</sup> Arco Verde em Condado - PB, do Açude Público de Custodia, em Custodia - PE, do Açude Público de Boa Vista, em Salgueiro - PB. Em todos, a finalidade seria a reativação dos Perímetros de Irrigação utilizando água subterrânea, existentes na área e desativados, por escassez d'água no manancial de superfície.

Em todos os trabalhos realizados pela UFPB, ficou evidente que o aquífero aluvial, apresenta-se como sendo uma excelente forma de propiciar ao colono uma reativação da irrigação em seus lotes. Contudo nos trabalhos realizados, não foram feitas modelagens matemáticas, que permitiriam a possibilidade de se obter uma exploração otimizada das disponibilidades de água subterrânea o que necessitaria por sua vez de estudos adicionais mais detalhados, envolvendo, inclusive, o próprio gerenciamento do Perímetro. Nestes estudos foram tratadas questões como: número e localização de poços; distância adequada entre eles; aspectos construtivos; vazões e regimes de bombeamento; etc.; não foi possível ter uma definição mais acurada quanto à área real do Perímetro passível de ser reativada com a água advinda do aquífero aluvial.

Outro avanço que se poderá ter, com diferentes situações utilizando a modelagem matemática, em relação aos trabalhos realizados pela UFPB, será a previsão do comportamento do aquífero em anos hidrológicos, ou seja, anos em que o aquífero apresente recarga máxima, ou anos de estios, por exemplo.

### **2.3 - Barragem Submersa**

As barragens submersas, introduzidas no Nordeste a partir da década de 50, consistem de um septo construído no depósito aluvial de rios e riachos com a finalidade de impedir que a água infiltrada no depósito aluvial continue a escoar durante o período de estiagem até que se exaura. A barragem retarda ou mesmo retém o fluxo facilitando as captações e beneficiando pequenas comunidades ao longo da área. Esta forma de



armazenamento, também concorre para diminuir os efeitos da evaporação, que, em reservatórios de superfície, como os açudes, alcançam taxas de evaporação quase superiores a 2.000mm/ano.

Costa, 1985 afirma que, apesar da simplicidade representada pela construção desse tipo de barragem, existem alguns condicionantes que, uma vez ignorados, podem inviabilizar ou representar um insucesso na quantidade ou na qualidade da água acumulada.

São as seguintes as condições para a construção de uma barragem subterrânea:

- Deve existir um depósito aluvial arenoso, com espessura de pelo menos 2m; a predominância de material siltico-argiloso implica em elevada retenção de água e baixa condutividade hidráulica, com reduzida vazão nos poços que irão captar a água e riscos de salinização com o tempo;
- A água existente no depósito aluvial não deve possuir um elevado teor salino, pois, mesmo com o bombeamento intensivo ela não irá melhorar sua qualidade, e tenderá a salinizar os solos que eventualmente venham a ser irrigados;
- Precisa existir uma considerável extensão de depósito aluvial a montante da seção a ser barrada, pois um barramento efetuado nas cabeceiras de um riacho, por exemplo, não terá como ser alimentado por deficiência de drenagem superficial;
- A calha menor ou leito ativo do curso d'água deve guardar relações de largura e desnível para com a calha maior ou terraço aluvial que viabilize a construção. Uma calha ativa profunda e estreita é desaconselhável, pois os volumes a serem armazenados serão muito reduzidos.

Rêgo e Albuquerque (1997), utilizaram um modelo matemático de fluxo bidimensional, para representar um aquífero aluvial em Catolé do Rocha – PB e concluíram que a inserção de barragem submersa com objetivo de atrasar o esvaziamento do aquífero para que se pudesse garantir a exploração, foi bastante significativa, criando condições favoráveis para reativação da irrigação na área estudada.

## 2.4 – Modelação Matemática

O planeamento e o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneo dependem da quantificação dos fenômenos de fluxo e de transportes em sistema aquíferos.

Essa quantificação pode ser feita de várias maneiras, incluindo-se medidas de campo e modelação matemática. A abordagem através de medidas de campo é a mais direta e pode-se usualmente demonstrar que é a mais acurada. Contudo, ela é raramente usada exclusivamente, devido aos altos custos despendidos ou à sua inaplicabilidade quando, por exemplo, um projeto ainda não foi executado e, portanto, não pode fornecer dados de campo (CLEARY, 1989).

Freqüentemente, a abordagem mais usada pelas agências governamentais e companhias de consultorias de todo o mundo é a modelação matemática. Como o próprio nome indica, um modelo é uma representação artificial de uma realidade física. Os primeiros modelos de águas subterrâneas apareceram nos anos cinquenta e sessenta e eram predominantemente compostos ou por pequenas caixas de areia ou por placas paralelas de vidro, denominadas Hele-Shaw (entre as quais fluidos viscosos simulavam fluxo de água subterrânea).

O crescimento e a disponibilidade de computadores, juntamente com uma ênfase geral na análise quantitativa nos programas das universidades, tornaram a modelação matemática uma escolha natural como ferramenta altamente atualizada de avaliação. Será difícil encontrar hoje um grande projeto de água subterrânea que não use modelação matemática de uma maneira ou outra.

## 2.5 – Equação do Fluxo de Água Subterrânea

Darcy 1856, investigando o fluxo de água em meios porosos, sob condições isotrópica e homogênea, para o fluxo unidimensional e incompressível, concluiu que a vazão é.

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{l}, \quad (2.5.1)$$

Onde:  $Q$  é a vazão com dimensões ( $L^3 T^{-1}$ );

$K$  é a condutividade hidráulica com dimensão ( $L T^{-1}$ );

$A$  é a área da seção transversal com dimensão ( $L^2$ );

$dh/l$  é o gradiente hidráulico adimensional ( $L L^{-1}$ ).

A utilização do princípio de conservação de massa aplicado a um volume de controle leva a equação:

$$-\text{div } \mathbf{q} \equiv - \vec{\nabla} \cdot \mathbf{q} = S_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5.2)$$

Conhecida como a equação da continuidade para o meio poroso, estabelece que o saldo do fluxo de massa por unidade de volume de controle é igual a variação da massa armazenada em seu interior no respectivo de tempo.

Bear, 1979, demonstrou que considerando-se que as direções principais de anisotropia da permeabilidade hidráulica coincidem com as direções cartesianas, podemos escrever a equação geral para representar o fluxo em meio não homogêneo e anisotrópico:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = S_e \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.5.3)$$

onde,  $K_x = K_{xx}$ ,  $K_y = K_{yy}$  e  $K_z = K_{zz}$  são as componentes do tensor permeabilidade hidráulica,  $\phi = K.h$  (Potencial hidráulico) e  $S_e = S/b$  (armazenamento específico)

Para o caso não homogêneo e isotrópico a expressão anterior converte-se na Equação (2.5.4).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = S_e \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2.5.4)$$

## 2.5.1 – Equação do Fluxo de Água Subterrânea – Aquíferos Livres

Os aquíferos freáticos apresentam problemas especiais devido ao seu contorno físico móvel. A matemática que descreve esse contorno móvel é altamente não linear em termos de carga de água subterrânea, o que torna o problema impossível de ser resolvido analiticamente.

Para casos como esses, recorre-se às suposições de Dupuit e à equação de Boussinesq. Dupuit [1848, como citado em DeMarsily (1986)] assumiu que o fluxo poderia ser tratado como horizontal nos aquíferos freáticos cujo lençol freático é levemente curvado. O fluxo horizontal implica em linhas eqüipotenciais verticais e uma velocidade uniforme ( $K$  é constante) ao longo da dimensão vertical. Utilizando-se essas suposições, um volume elementar representativo (curvilíneo, levando-se em conta o contorno curvado do lençol freático) e o princípio da conservação de massa, pode-se mostrar que a seguinte equação não linear governa a distribuição bidimensional da carga hidráulica num aquífero freático:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R \quad (2.5.5)$$

com:

$$\begin{cases} q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{cases} \quad (2.5.6)$$

Usando 2.5.6 em 2.5.5 teremos a equação 2.5.7

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (2.5.7)$$

A equação acima é a solução geral do fluxo subterrâneo, admitindo que a extensão horizontal é muito maior que a vertical podemos substituir a equação 3-D, por 2-D, e a equação geral do fluxo subterrâneo pode ser escrita:

Para aquíferos confinados a equação torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (2.5.8)$$

Para aquíferos freáticos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (2.5.9)$$

A equação acima é chamada de equação de Boussinesq. Observe que a capacidade específica ( $S_y$ ) leva em consideração os efeitos de armazenamento nos aquíferos freáticos. O Produto da carga por suas derivadas torna a equação matematicamente não linear. É impossível solucioná-la analiticamente na forma em que se encontra, e o princípio da superposição não pode ser usado; isso torna imperativo a utilização de métodos numéricos para a solução da referida equação. A equação acima pode ser linearizada (fazer  $h = b = h_0$ , a espessura saturada inicial) quando o rebaixamento máximo é menor que 25% da espessura saturada inicial (HANTUSH, 1964). Se forem feitas as seguintes substituições:

$$S = S_y$$

$$T_{xx} = K_x b$$

$$T_{yy} = K_y b$$

A equação tornar-se-á:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5.10)$$

Isso significa que uma solução matemática ou um modelo para aquífero confinado pode ser usado para descrever um aquífero freático, se o rebaixamento é relativamente pequeno e se são utilizados parâmetros de aquífero freático, ao invés de parâmetros de aquífero confinado. Se o rebaixamento é grande, como aqueles que podem ser encontrados

em formações de baixa condutividade hidráulica, deve-se solucionar numericamente a equação de Boussinesq.

## 2.6 – Método das Diferenças Finitas

Os métodos das diferenças Finitas são bastante usados atualmente, para resolver equação diferencial parcial do fluxo de água subterrânea, por serem os mais antigos, divulgados e provavelmente os mais bem entendidos pelos engenheiros (CIRILO e CABRAL, 1989).

A teoria básica do método consiste em substituir a equação diferencial parcial do fluxo, por um conjunto de equações diferenciais discretizadas no espaço e no tempo (KINZELBACH, 1986).

São fortes ferramentas para ajudar os hidrologistas na evolução dos recursos de águas subterrâneas (PRICKETT, 1975).

As equações de diferenças finitas podem ser derivadas por dois caminhos: o primeiro é o matemático e de maior aceitação, e consiste em aproximar as derivadas parciais da equação do fluxo por derivadas e o segundo, é o do ponto de vista físico, envolvendo a lei de Darcy e a equação básica da continuidade, aplicando o princípio da conservação da massa (PRICKETT, 1975).

Na abordagem matemática as derivadas parciais de  $h(x,y)$  que compõem as equações de fluxo, são aproximadas a partir da expansão de Taylor de  $h(x+\Delta x)$  e  $h(y+\Delta y)$ .

Associando-se  $\Delta x$  e  $\Delta y$  aos espaçamentos entre os nós  $i,j$  da malha na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente, (Figura 2.4), pode-se escrever a forma aproximada das derivadas parciais

$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$  e  $\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$  em função das cargas nos nós  $h_{ij}$  como sendo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cong \frac{h_{i+1,j} - 2h_{i,j} + h_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} \quad (2.6.1)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cong \frac{h_{i,j+1} - 2h_{i,j} + h_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \quad (2.6.2)$$

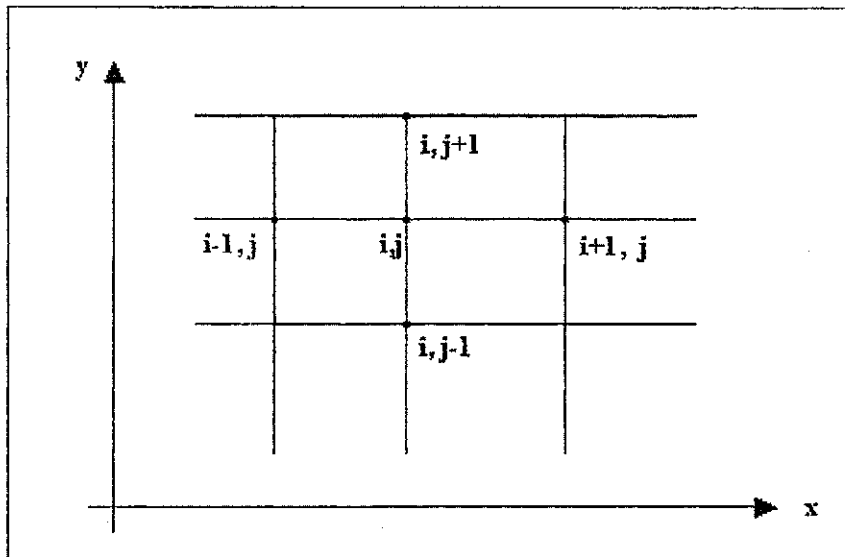


Figura 2.4 -- Malha centrada nos vértices das células

Entre os métodos disponíveis para solução das equações algébricas lineares, podemos citar como mais conhecidos, o método explícito e o método implícito.

### 2.6.1 – Método Explícito

Considerando-se a aproximação por diferenças progressivas para o tempo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cong \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (2.6.3)$$

onde os índices sobrescritos referem-se aos passos de tempo e, aplicando-se as Equações (2.6.1), (2.6.2) e (2.6.3) à Equação (2.6.4), para um aquífero confinado em meio homogêneo e isotrópico:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{R}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6.4)$$

Obtém-se a Equação (2.6.5) na forma explícita:

$$\frac{h_{i+1,j}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{h_{i,j+1}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} + \frac{R_{i,j}}{T} = \frac{S}{T} \left( \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \right) \quad (2.6.5)$$

A equação anterior é em geral instável para valores práticos de intervalos de tempo  $\Delta t$ . A razão para a instabilidade decorre do método explícito considerar que as características do escoamento permanecem inalteradas durante todo o intervalo de tempo  $[t, t + \Delta t]$  (CIRILO & CABRAL, 1987). Como um critério de estabilidade, é relacionado os limites  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta t$  segundo a expressão (2.6.6) (ROSENBERG apud BEAR, 1979:136), condição esta que deve ser satisfeita para todo o conjunto de nós da malha.

$$\frac{T}{S} \left[ \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} + \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \right] \leq \frac{1}{2} \quad (2.6.6)$$

Para aquíferos não confinados, sobre a equação não linear,

$$\frac{K}{2} \left[ \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} \right] + R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6.7)$$

é feita uma linearização com mudança de variável  $v = h^2$  onde a equação anterior converte-se na Equação(2.6.8)

$$\frac{K}{2} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + R = \frac{S_y}{2\sqrt{v}} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.6.8)$$



a qual é aproximada segundo procedimento já apresentado (WANG & ANDERSON, 1982)

A estabilidade do método está basicamente relacionada com o esquema de integração no tempo, onde os cálculos numéricos são feitos até um número finito de casas decimais, podendo introduzir erros tendem a crescer e são acumulativos, a medida que o nível de cálculo avança no tempo, tornando qualquer método numérico instável.

A convergência é a condição em relação ao qual a solução da equação por diferenças tende para a solução exata da equação diferencial parcial a medida que os incrementos espaciais e temporais diminuem. O esquema é convergente quando os erros de truncamento tendem a zero (WROBEL, 1989).

A consistência está relacionada com a aproximação do sistema contínuo de equações por um sistema discreto. Um esquema de diferenças finitas é consistente quando, ao refinarem-se as aproximações por diferenças finitas, no limite as mesmas se tornam matematicamente equivalente à equação diferencial parcial, significando que quando os incrementos espaciais e temporais tendem a zero, o erro de truncamento também tende a zero (WROBEL, 1989).

### 2.6.2 – Método Implícito

Os métodos implícitos são incondicionalmente estáveis.

Vimos que as equações do método explícito podem ser resolvidas por substituição simples e direta, enquanto que as equações dos métodos implícitos, requerem a solução simultânea de um conjunto de equações lineares (MEIER, 1987).

No método implícito a derivada é avaliada em algum ponto entre o intervalo de tempo  $[t, t+\Delta t]$  a partir de uma média ponderada (Equação 2.6.9).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cong \alpha \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - 2h_{i,j}^{n+1} + h_{i-1,j}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + (1-\alpha) \frac{h_{i+1,j}^n - 2h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} \quad (2.6.9)$$

que aplicada a equação(2.6.4), para uma malha de espaçamento constante ( $\Delta x = \Delta y$ ), obtém-se a Equação(2.6.10) do método implícito.

$$\alpha \left[ \frac{h_{i,j}^{n+1} - 4h_{i,j}^n}{(\Delta x)^2} \right] + (1-\alpha) \left[ \frac{h_{i,j}^n - 4h_{i,j}^{n-1}}{(\Delta x)^2} \right] + \frac{R_{i,j}}{T} = \frac{S}{T} \left( \frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^n}{\Delta t} \right) \quad (2.6.10)$$

onde,  $h_{i,j}^n = h_{i+1,j}^n + h_{i-1,j}^n + h_{i,j+1}^n + h_{i,j-1}^n$

Para a Equação (2.6.10) obtém-se os seguintes métodos de solução principais:

$\alpha = 0$  (solução explícita)

$\alpha = 1$  (solução completamente implícita)

$\alpha = 1/2$  (solução tipo Crank-Nicholson)

onde, qualquer uma das soluções implícitas são incondicionalmente estáveis.

Em meios heterogêneos a entrada de dados conterà os valores de coeficiente de armazenamento e transmissividade para cada sub-região ou célula. Se, além disso, houver anisotropia, a transmissividade deve ser indicada para cada direção ou nos pontos onde houver variação (CIRILO & CABRAL, 1978).

### 2.6.3 – Métodos de Solução de Equações

Em resumo na solução das equações de diferenças finitas, os métodos mais utilizados são os métodos iterativos, diretos e mistos (diretos e iterativos).

#### 2.6.3.1 – Métodos Diretos

São métodos em que as seqüências de operações são feitas de uma única vez, levando a solução exata, exceto pelos erros de arredondamento que ocorrem no processo de cálculo através dos computadores. Este método envolve o processo de triangulação de matrizes superiores e em seguida o processo de substituição inversa, para obter os novos valores da incógnita, que são os níveis freáticos (MEIER, 1987).

#### 2.6.3.2 – Métodos Iterativos

Entre os métodos iterativos, o mais comum é o método de Gauss-Seidel, que como tal, utiliza uma única expressão generalizada de diferenças finitas, e resolve repetidamente para cada nó no domínio do problema. As iterações são efetuadas nó por nó, o que

significa que a transmissão de informação ao longo da malha é efetuada um nó por iteração, tornando a convergência normalmente lenta neste método.

### 2.6.3.3 – Métodos Mistos

É apresentado como sendo o método mais eficiente, pois utilizam o método direto de solução de forma repetitiva, utilizando para isso processo iterativo, também conhecido como métodos mistos de solução. Entre esses métodos, o IADI (“Iterative Alternating Direction Implicit”), impõe a repetição dos dois passos acima mencionados, até que a convergência seja alcançada. Como outro exemplo, o método PCG (“Preconditioned Conjugate Gradient”) formula o sistema de equações lineares como um problema de otimização na forma de equações matriciais do tipo:

$$Y = \frac{1}{2} \{h'\} [A] \{h\} - \{h'\} \{b\} \quad (2.6.11)$$

O procedimento de otimização é um processo iterativo, procurando o vetor da variável desconhecido  $\{h\}$  minimizando-se a Equação (2.6.11).

$$Y = \frac{1}{2} \{h'\} [A] \{h\} - \{h'\} \{b\} \rightarrow \text{mínimo} \quad (2.6.12)$$

O Procedimento PCG é ideal para problemas com grande número de nós. A única condição é que a matriz de coeficientes seja simétrica, o que ocorre no caso de problema de fluxo.

Em Síntese, a modelação do fluxo subterrâneo, inclusive a que será mostrada mais adiante neste trabalho, consiste em discretizar o Meio aquífero em regiões, onde serão efetuados balanços hídricos com o emprego da equação geral do fluxo subterrâneo, acima apresentada. Os métodos de discretização das equações são vários o de Diferenças Finitas, supracitado é um deles, na resolução destas equações os métodos iterativos são utilizados.

### 3.0 – O AQÜÍFERO ALUVIAL

Para os objetivos propostos neste trabalho, de aplicar um modelo matemático que servisse de base para exploração de um aquífero aluvial, foi escolhida uma área de estudo situada na bacia do Paraíba, na região semi-árida. A área escolhida abrange um trecho do rio Sucuru onde ocorrem aluviões, na qual foi implantado, pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca DNOCS, um Perímetro Irrigado.

O Perímetro Irrigado Sumé, cuja área é de 272 hectares, está distribuído ao longo das margens do rio Sucuru, num trecho a jusante do açude Sumé, na micro-região homogênea dos Cariris Velhos do Estado da Paraíba (Figura 3.1), na bacia hidrográfica do alto Paraíba (Figura 3.2), caracterizada pela acentuada semi-aridez, onde têm sido registrados os menores índices pluviométricos do Brasil. A água necessária para a irrigação dos lotes do perímetro era retirada exclusivamente do açude, com o abastecimento feito através de um canal principal alimentando uma rede de canais secundários e terciários. O açude Sumé também abastecia a sede do município de mesmo nome, situada à margem esquerda do rio Sucuru, à altura dos primeiros lotes do Perímetro (Figura 3.3).

A falta de gerenciamento adequado dos recursos hídricos regularizáveis pelo açude provocou um esvaziamento progressivo do mesmo, agravado pelos anos de baixa pluviometria, e pela construção indiscriminada de açudes a montante do reservatório de Sumé. Todos estes fatores, somados, implicaram no colapso total do abastecimento d'água da cidade de Sumé e na desativação do sistema de irrigação do Perímetro, vindo a sacrificar mais, a já frágil economia local (RÊGO, J. C. et al 1999).

Sem o manancial de superfície, representado pelo açude, resta aos irrigantes o abastecimento através da captação da água subterrânea circulante no próprio pacote aluvial sobre o qual se situam partes dos seus lotes.

Nos itens que se seguem está descrita as características deste aluvião, obtida de levantamento “in situ”, efetuados com o objetivo de subsidiar o estudo para a quantificação do seu potencial e sua disponibilidade hídrica.

### **3.1 – Caracterização da Área de Estudo**

#### **3.1.1 – Clima**

A causa principal das chuvas ocorridas na área é a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), nos meses de março e abril. O Regime Pluviométrico atuante na bacia, onde está inserido o Perímetro Irrigado de Sumé, apresenta variações nos valores médios de 350 mm a 600 mm.

Segundo a classificação de Koppen, o Perímetro Irrigado está situada numa zona de clima do tipo BSH seco (semi-árido), caracterizado principalmente pela alternância de duas estações nitidamente distintas: a estação seca, que se estende de junho a janeiro, caracterizada por precipitações baixas ou na maioria das vezes nula; a estação chuvosa ou inverno que se reduz praticamente ao quadrimestre fevereiro-maio.

#### **3.1.2 – Temperatura**

De acordo com os dados meteorológicos medidos na estação de Ouro Velho, a temperatura média anual na região onde se encontra a área de estudo situa-se em torno de 24 °C, com um máximo em novembro/dezembro e um mínimo em julho/agosto. A média mensal dos máximos varia entre 27 °C e 32 °C, enquanto a média mensal dos mínimos varia entre 15 °C e 19 °C.

### 3.1.3 -- Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa varia conforme as estações, atingindo um máximo na época das chuvas (abril/maio) e um mínimo na época seca (outubro/novembro).

### 3.1.4 – Insolação

O quadrimestre setembro/dezembro tem, em geral, a maior duração de insolação com 8,5 horas em média por dia, enquanto os meses com menor duração de insolação apresentam em média 6,5 horas por dia. O total médio anual situa-se em torno de 2800 horas de insolação.

### 3.1.5 -- Vegetação

A vegetação predominante na região da bacia é a caatinga hiperxerófila densa, como de toda a região do Sertão dos Cariris Velhos, refletindo o rigor do clima semi-árido. As principais espécies nativas são: Xiquexique, Mandacaru, Braúna, Favela, Quixaba, Aroeira, Umbuzeiro, Pinhão, Macambira, Marmeleiro e Catingueira.

### 3.1.6 – Geologia

O embasamento geológico da região dos Cariris Velhos, Sumé – PB é formado por um conjunto de rochas metamórficas e ígneas de idade pré-cambriana, denominada de Complexo Migmatítico-Granítico. Nos leitos de rios e riachos este Complexo é superposto por depósitos sedimentares aluviais, de idade recente (Quaternária), como é o caso do rio Sucuru.

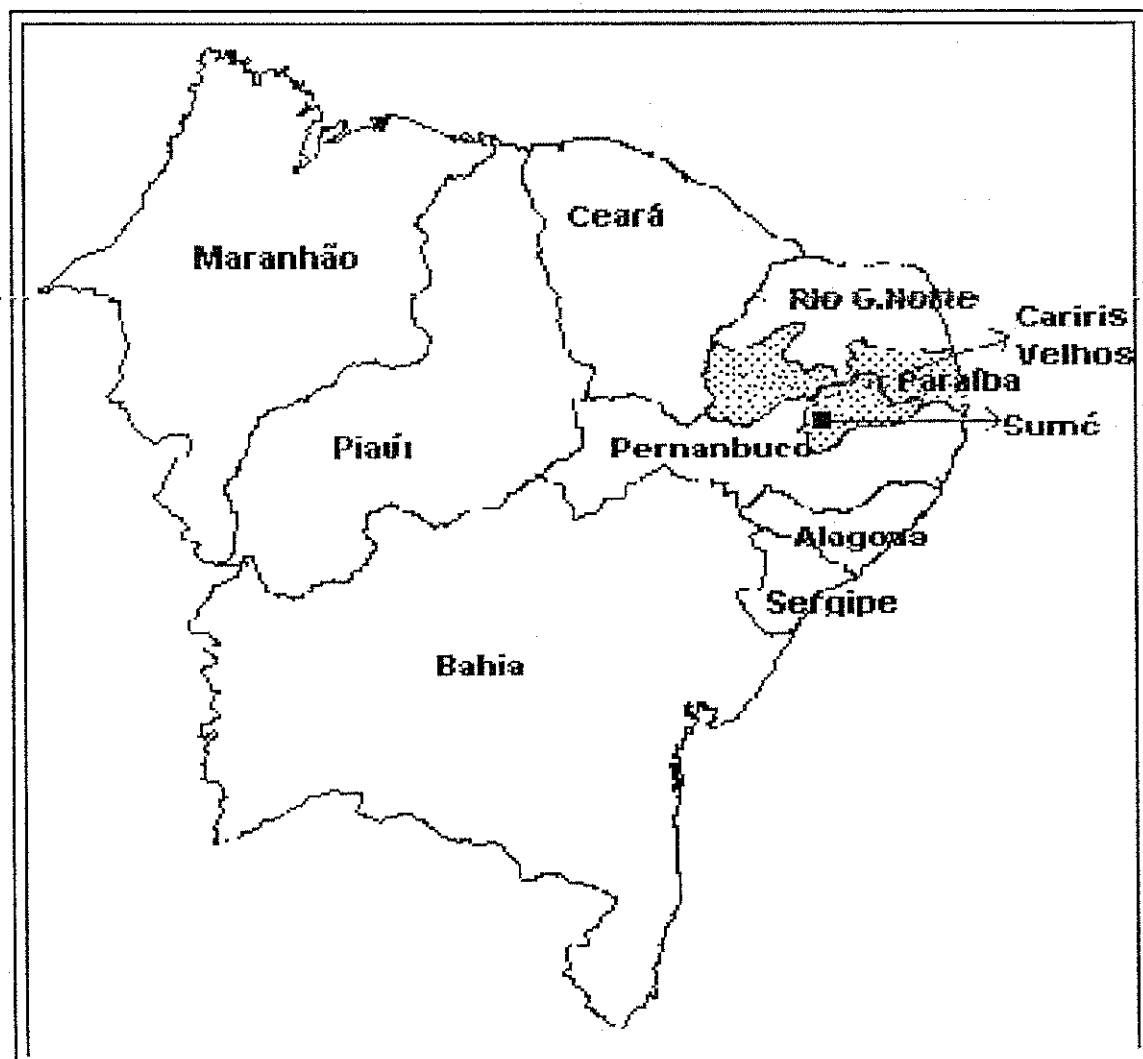


Figura 3.1 – Localização Geográfica da Área Estudada

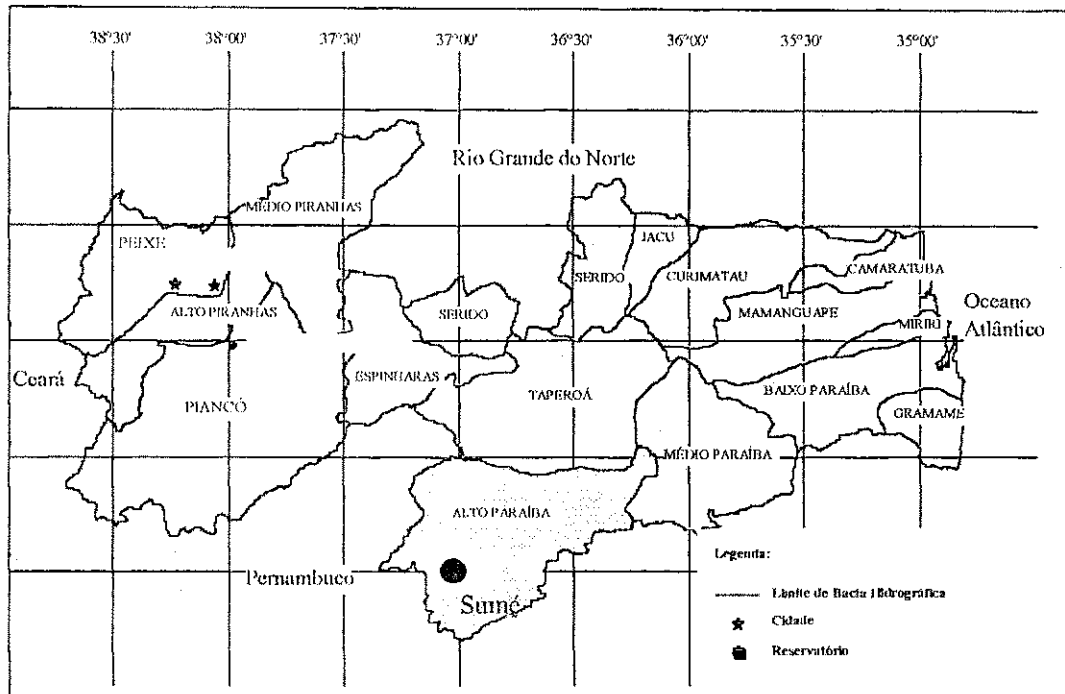


Figura 3.2 – Bacias Hidrográficas do Estado da Paraíba.



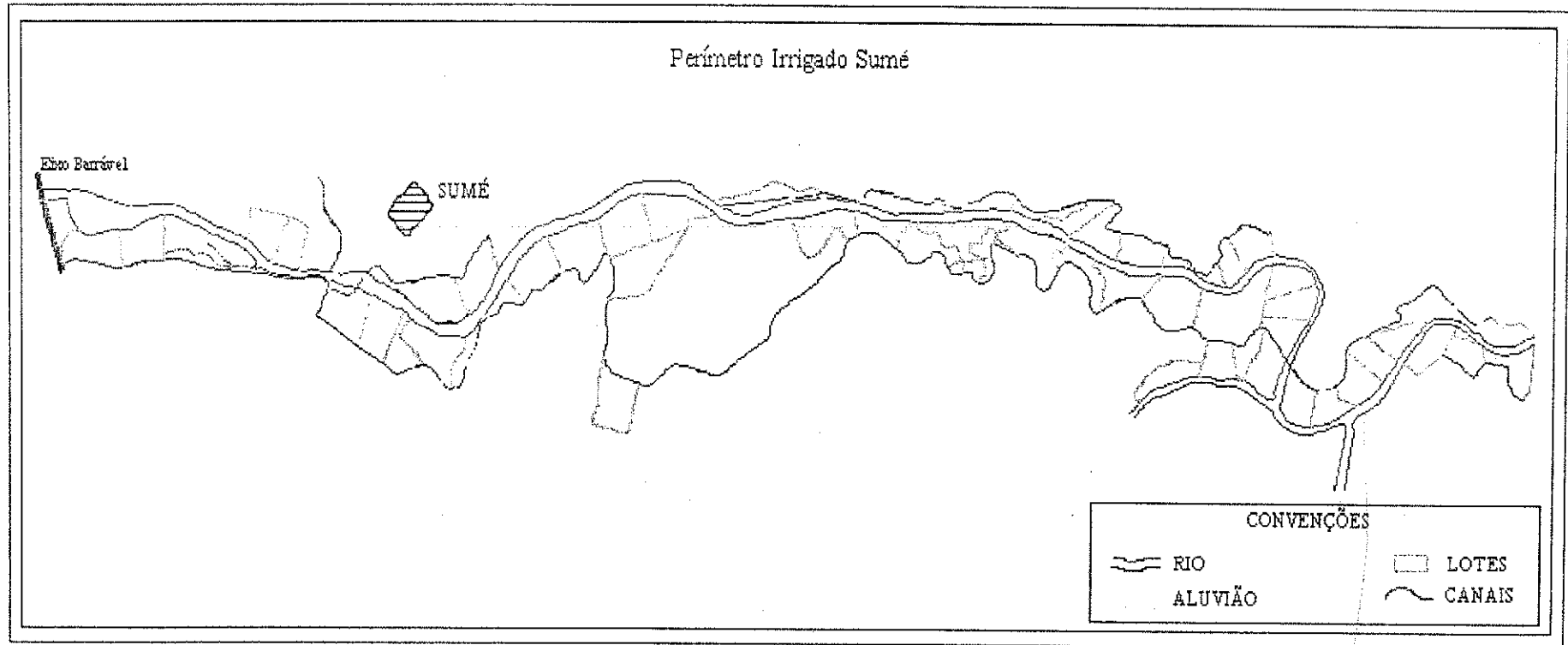


Figura 3.3 – Perímetro Irrigado de Sumé.

### 3.2 – Caracterização Litológica e Dimensional

As larguras dos depósitos aluviais ocorrentes no trecho da área do Perímetro variaram entre 100m e 350m, conforme foram identificados por análise de fotografias aéreas e reconhecimentos de campo, o que foi posteriormente confirmado com os resultados obtidos nas sondagens (ALBUQUERQUE, J. do P. T., RÊGO J. C., GOIS, R. S. S. & VIEIRA, L. J. dos S., 2000).

Para a determinação das espessuras do pacote aluvial se fez necessário conhecer a topografia do embasamento cristalino, o que foi feito através de sondagens realizadas na área.

Foram executadas 173 sondagens, ditas exploratórias, distribuídas, em sua maior parte, longitudinalmente em relação ao leito do rio, na sua maioria distanciando-se de cerca de 100m. umas das outras. As sondagens cobriram cerca de 90% da extensão do Perímetro. Os 10% restantes foram excluídos do estudo por se encontrarem alagados e/ou contaminados pelos esgotos e pelo lixo urbanos, ali depositados, os resultados obtidos nas sondagens foram lançados em fichas de “Registro de Sondagem”. No anexo 1, encontra-se algumas destas fichas, as quais contêm descrições das características litológicas e dimensionais de cada furo. A Tabela 3.1 apresentada a seguir contém uma síntese destes resultados.

Em termos de litologia, os aluviões do Rio Sucuru são predominantemente arenosos, de grãos poucos rolados, às vezes cascalhentos (os cascalhos ocorrem, principalmente, na base do perfil litológico), ocorrendo camadas de argila em espessuras significativas (variando de 1m a 4m) em, apenas, 38 sondagens (22%), o que dá ao pacote aluvial boas condições de armazenamento e circulação de água subterrânea, apesar dos grãos e seixos apresentarem baixo grau de rolamento.

A espessura do pacote aluvial varia no trecho sondado, longitudinalmente, em razão não somente da variação da topografia superficial do aluvião, mas, também e principalmente, em função da Configuração morfológica do substrato cristalino impermeável, dotado de altos e baixos, resultante de erosão diferencial pretérita que esculpiu um vale pré-aluvial bastante acidentado, conforme mostra o perfil longitudinal do aluvião (Figura 3.5). As profundidades das sondagens, que correspondem às espessuras totais do pacote aluvial, variaram entre um mínimo de 0,45 m e um máximo de 9,30 m. Pela distribuição estatística desses resultados, apresentada na Figura 3.4, verifica-se que a









Furos	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
Prof(m)											
0 a 1	F/Ag	Ag	F/Ag	F	Ag/F/R	F/Ag	F/Ag/C/R	F/Ag/R	F/Ag	F/M/G	F/Ag
1 a 2	Ag	Ag/F	F/Ag/R	F/Ag	R	F/Ag	R	R	F/M/Ag	M/C	F/M/G/Ag
2 a 3	Ag/R	Ag/F	R	F/Ag/M		F/Ag			Ag/F	M/Ag/F/G	G/C
3 a 4	R	Ag/M/F/R		M/R		F/Ag			Ag/F/G	G/F/Ag	G/C
4 a 5		R		R		R			M/G/C	F/Ag/G	C/G/R
5 a 6									R	G/Ag/F	R
6 a 7										M/G/C	
7 a 8										M/G/C	
8 a 9										M/G/C	
9 a 10										R	
10 a 11											
Furos	166	167	168	169	170	171	172	173			
Prof(m)											
0 a 1	F/Ag	F/Ag/R	F/Ag	F/Ag/M	F/Ag	F/Ag	F/Ag	F/Ag			
1 a 2	F/Ag	R	F/Ag	M/F/Ag	Ag	F/Ag	F/Ag	F/Ag	F/Ag/R		
2 a 3	F/M		F/Ag	Ag/F	R	F/Ag	Ag/F	R			
3 a 4	R		F/Ag	Ag/F		F/Ag	Ag/F				
4 a 5			F/Ag	Ag/F		F/Ag	R				
5 a 6			F/Ag	F/Ag/R		R					
6 a 7			R	R							
7 a 8											
8 a 9											
9 a 10											
10 a 11											

Convenções:

- F = Areia Fina
- M = Areia Média
- G = Areia Grossa
- C = Cascalho
- Ag = Argila
- Sil. = Silte
- R = Rocha/Cristalino

 NÍVEL D'ÁGUA

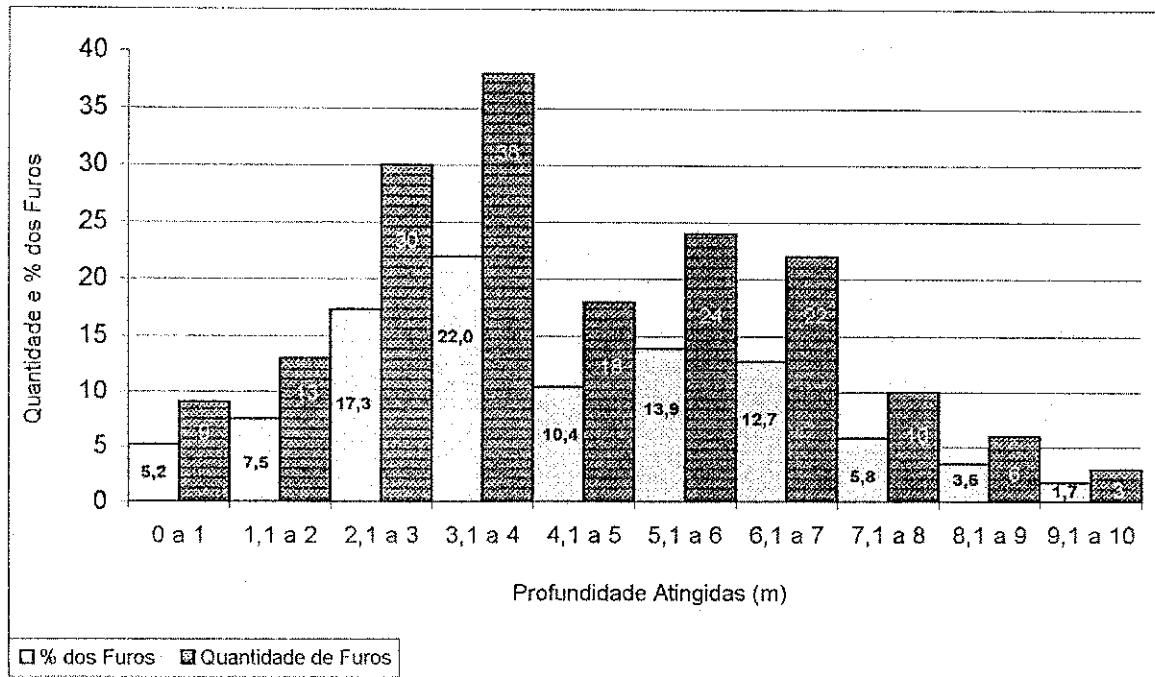


Figura 3.4 – Distribuição Estatística das Profundidades atingidas nas Sondagens

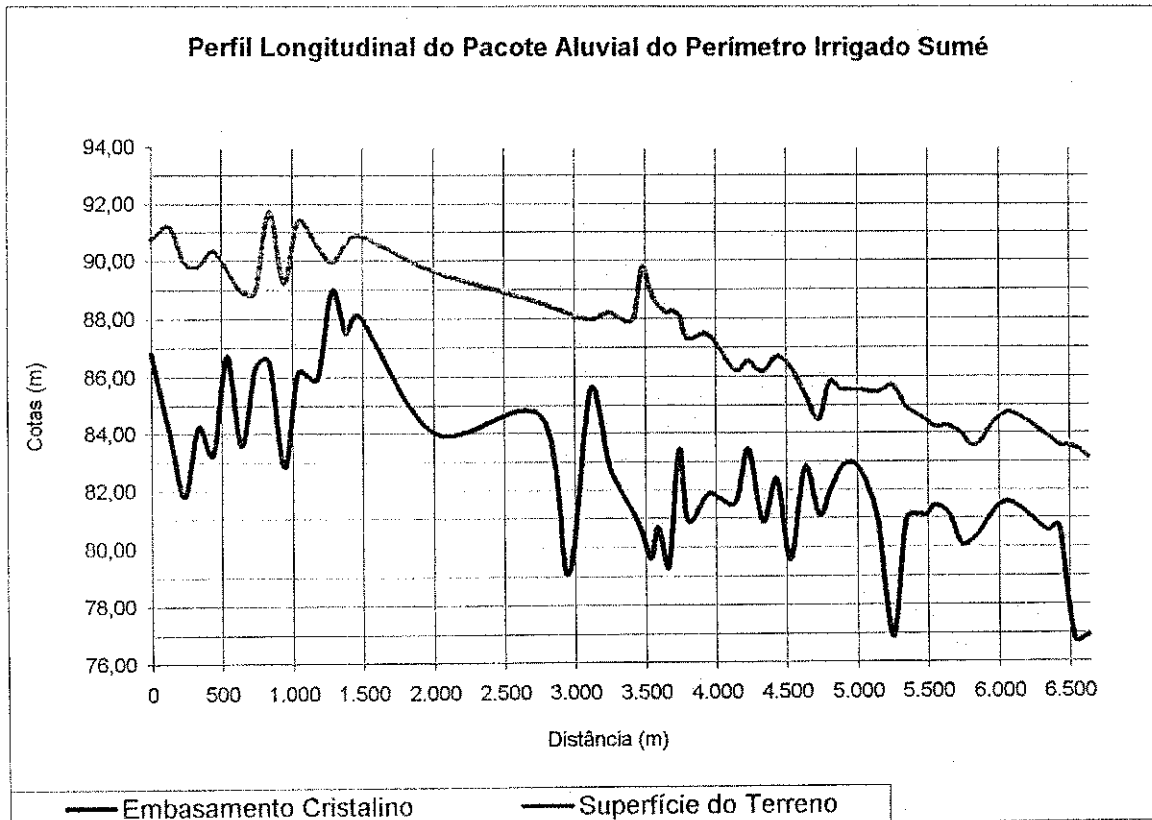


Figura 3.5 – Perfil Longitudinal do Perímetro Irrigado Sumé – PB



### 3.3 – Hidrogeologia do Sistema Aquífero

O Sistema Aquífero está contido no pacote aluvial dimensional e litologicamente já caracterizado. Trata-se de um aquífero do tipo livre, poroso, permeável, com vazios intergranulares interconectados, onde a água se acumula e circula na dependência direta dessas suas propriedades físicas, tendo como substrato impermeável, subjacente e adjacientemente, as rochas ígneas e metamórficas do Complexo Cristalino Pré-Cambriano.

Neste sistema aquífero, o grau de saturação (relação entre espessura saturada e espessura total do aquífero) é variável com o tempo, caracterizando um regime de escoamento transitório (não permanente).

#### 3.3.1 – Medições e Observações de Campo

##### 3.3.1.1 – Levantamento dos Pontos d'água

Foram mapeados todos os pontos d'água existentes no Perímetro; no total foram, identificados 49 pontos d'água, a maioria cacimbas (escavações rudimentares sem revestimento de até 3,0m de profundidade), indicadores da presença subjacente do aquífero aluvial. As informações colhidas são basicamente a profundidade do ponto d'água, a espessura da coluna d'água captada. O resumo deste levantamento é apresentado na Tabela 3.2

Tabela 3.2– Pontos d'água levantados na área do Perímetro Irrigado de Sumé

ORDEM	TIPO DE POÇO	COORDENADAS		LOTE	COLUNA D'ÁGUA(m)	OBSERVAÇÕES
		LATITUDE	LONGITUDE			
1	Amazonas	7°40'48"	36°48'36,7"	51	2,7	Explorado - cristalino
2	Cacimba	7°40'58,08"	36°48'32"	51	0,55	Explorado
3	Cacimba	7°40'51,9"	36°48'42,1	49	0,7	
4	Cacimba	7°40'48,5"	36°48'47,9"	48	2,7	Explorado
5	Cacimba	7°40'56,6"	36°48'58"	46 - 48	0,2	
6	Amazonas	7°40'59,3"	36°48'58,4"	45	1,5	Explorado
7	Amazonas	7°41'05,4"	36°49'01,8"	44	1,2	
8	Tubular	7°41'03,8"	36°49'15,6"	43	12,5	Explorado - cristalino
9	Cacimba	7°41'11,4"	36°49'14,5"	42 - 36	0,55	Explorado
10	Cacimba	7°40'56,2"	36°49'24,9"	42 - 36	0,5	
11	Amazonas	7°40'53,9"	36°49'21,0"	42 - 36	1,8	
12	Cacimba	7°40'52,1"	36°49'20,5"	37	0,5	

13	Cacimba	7°40'45,4"	36°49'14,9"	37	0,5	
14	Cacimba	7°40'44,8"	36°49'13,9"	38	0,4	
15	Amazonas	7°40'43,0"	36°49'15,4"	38	1,5	Explorado
16	Cacimba	7°40'42,5"	36°49'14,4"	38	0,45	
17	Cacimba	7°40'36,5"	36°49'16,8"	39	0,6	
18	Cacimba	7°40'32,6"	36°49'25,1"	41	0,25	
19	Amazonas	7°40'35,5"	36°49'28,9"	41	0,9	Explorado
20	Cacimba	7°40'33,2"	36°49'44,7"	30 - 40	0,5	Explorado
21	Amazonas	7°40'25,5"	36°49'51,3"	28	2,3	Explorado - cristalino
22	Cacimba	7°40'33,5"	36°49'55,9"	29 - 28	0,46	
23	Amazonas	7°40'33,1"	36°49'59,0"	28	2,1	Explorado
24	Amazonas	7°40'33,2"	36°50'02,1"	27 - 29	1,9	Explorado
25	Cacimba	7°40'33,1"	36°50'02,3"	27 - 29	0,5	
26	Amazonas	7°40'17,9"	36°50'05,0"	26	1,1	Cristalino
27	Amazonas	7°40'21,4"	36°50'01,0"	27	0,3	Cristalino
28	Amazonas	7°40'26,7"	36°50'14,5"	26	1,1	
29	Cacimba	7°40'24,2"	36°50'18,2"	25	0,3	
30	Cacimba	7°40'21,9"	36°50'35,3"	22	1	Explorado
31	Amazonas	7°40'19,9"	36°50'36,1"	22 - 24	0,3	
32	Cacimba	7°40'21,9"	36°50'40,0"	20	0,9	
33	Cacimba	7°40'21,4"	36°50'48,7"	20	0,3	Explorado
34	Cacimba	7°40'18,2"	36°50'50,0"	20 - 17	0,7	Explorado
35	Cacimba	7°40'15,0"	36°51'04,7"	18	0,6	
36	Cacimba	7°40'19,9"	36°51'18,0"	18	0,4	Explorado
37	Cacimba	7°40'15,1"	36°51'38,4"	13	0,5	Explorado
38	Cacimba	7°40'12,0"	36°51'39,3"	12	0,7	Explorado
39	Cacimba	7°40'13,9"	36°51'46,6"	12	0,3	
40	Cacimba	7°40'16,0"	36°51'51,5"	12	0,4	
41	Cacimba	7°40'18,1"	36°51'53,6"	12	0,9	
42	Cacimba	7°40'22,0"	36°52'07,2"	11	0,7	Explorado
43	Amazonas	7°40'29,2"	36°52'15,0"	10	1	Explorado
44	Amazonas	7°40'32,2"	36°52'11,5"	10	0,9	
45	Cacimba	7°40'36,9"	36°52'19,4"	9	0,6	Explorado
46	Amazonas	7°40'50,9"	36°52'30,2"	8	0,7	Explorado - cristalino
47	Amazonas	7°40'36,6"	36°52'41,8"	06 - 07	0,5	Explorado
48	Amazonas	7°40'30,9"	36°52'49,1"	4	1,2	Explorado
49	Amazonas	7°40'30,7"	36°52'35,0"	7	1,9	Explorado - cristalino

### 3.3.1.2 – Poço de Pesquisa Construído

Foi construído na área escolhida para o modelamento, um poço circular de grande diâmetro (Amazonas), concebido de modo a se obter um melhor rendimento, levando-se em consideração as características dimensionais, litológicas e hidráulicas do aquífero, de um lado, e, de outro, as características construtivas do poço.

O poço foi construído empregando-se tijolos de forma trapezoidal (bico de pato), fabricados no local, com dimensões e aperfeiçoamentos, com vistas a facilitar o fluxo lateral para dentro do poço, melhorando, assim, a eficiência da captação.

No poço construído, foi realizado teste de aquífero para determinação dos seus parâmetros hidráulicos, cujos resultados serão apresentados a seguir, Tabela 3.3 e no anexo 2.

Tabela 3.3 – Parâmetros Hidráulicos obtidos no teste de aquífero

<i>Condutividade Hidráulica K (m/s)</i>		
Theis	Jacob	Média
$5,42 \times 10^{-4}$	$1,13 \times 10^{-3}$	$8,36 \times 10^{-4}$
<i>Transmissibilidade T (m<sup>2</sup>/s)</i>		
Theis	Jacob	Média
$3,1 \times 10^{-3}$	$6,43 \times 10^{-3}$	$4,76 \times 10^{-3}$
<i>Porosidade Eficaz, S</i>		
Theis	Jacob	Média
12%	11%	11,50%

### 3.3.1.3 – Campanha de Medição de Nível d'água

Com objetivo de verificar a evolução temporal do nível freático na área a ser modelada, foram programadas e executadas campanhas de medição de nível nos 08(oito) piezômetros instalados na mesma.

As leituras foram realizadas a cada 15 (quinze) dias e compreenderam o período de maio de 1997 a fevereiro de 1998.

De posse dos valores das medições do nível freático, foi possível a elaboração dos gráficos da evolução temporal destes, os quais estão presentes no anexo 3.

Observa-se que em média a queda do nível freático entre os meses de maio/97 a fevereiro/98, ficou em torno 1,00m, este decréscimo deve-se: a exploração por poços e perdidos por evaporação, como ainda pelo próprio fluxo para jusante.

## **4.0 – O MODELAMENTO**

### **4.1 – Definição do Modelo**

Neste trabalho foi utilizado o programa computacional PMWIN (*“Processing Modflow for Windows”*) (CHIANG & KINZELBACH, 1996), na versão 5.0.

O PMWIN é um sistema, formado por diversos programas, para modelamento de fluxo de água subterrânea e processos de transporte que utiliza o método de Diferenças Finitas.

O sistema possui como modelador de fluxo de água subterrânea o programa MODFLOW (McDONALD & HARBAUGH, 1988); que é um sistema de modelos para simulação de fluxos de águas subterrâneas e processos de transporte apresenta uma grande variedade de opção, e sua utilização é bastante fácil.

Por se tratar de um Modelo de uso consagrado, apresenta grande confiabilidade.

Este modelo permite a simulação do comportamento do fluxo subterrâneo em aquífero, quando submetidos a efeito de poços, rios ou drenos, recarga, evaporação, barramentos, etc.

### **4.2 – Características Gerais**

Como limite de capacidade de processamento, o PMWIN permite tratar modelos com até 80 camadas e 1000 *periodos de cálculos ou passos de tempo*. Cada camada pode ser formada por 2000 x 2000 células. A malha do modelo pode ter as dimensões de suas células redefinidas e refinadas. É possível ainda, se sobrepor à malha até cinco mapas.

Condições de contorno especiais e tensões hidrológicas são simuladas em programas especiais (“pacotes”) integrantes do MODFLOW. Como exemplo, é possível simular *poços* (WELI), *drenos* (DRAIN), contornos de *fluxo dependente da carga* (GHBI), *rios* (RIVER), *recarga* (RCHI), *evapotranspiração* (EVTI) e *carga especificada variante com o tempo* (CHDI).

Entre *períodos de cálculo* (*stress period*) é possível se ajustar às condições de contorno especiais e tensões hidrológicas, como cargas variáveis com o tempo, e taxa de recarga. Esses ajustes são em sua maioria disponíveis individualmente a cada célula do modelo. Os parâmetros hidráulicos são igualmente ajustáveis a cada célula. Os *períodos de cálculo* podem ser variáveis ao longo da simulação e, podem ainda ser subdivididos nos menores intervalos de tempo (*passos de tempo*) para permitir a estabilidade em determinadas simulações. As condições de contorno especiais, bem como as tensões hidrológicas não podem, entretanto, ser redefinidas entre esses intervalos menores de tempo.

Dados do modelo podem ser especificados de três maneiras: a primeira para cada célula individualmente, a Segunda por regiões em forma de zoneamentos e a terceira, diretamente pelo *interpolador de campo* a partir de dados interpolados distribuídos irregularmente no modelo.

O *interpolador de campo* PMDIS (“The Field Interpolator”) toma dados médios de parâmetros hidráulicos, elevação de camadas geológicas, etc. e os interpola para cada célula do modelo. Os resultados obtidos deste processo servem como dados gerais a serem utilizados nas simulações do modelo.

O MODFLOW possui um importante programa para calcular o balanço hídrico (“Water Budget Calculator”). Ele calcula o balanço hídrico volumétrico (célula a célula) para todo o modelo final de cada passo de tempo e o salva em arquivo. Um balanço hídrico fornece uma indicação de aceitabilidade geral da solução numérica. Os termos de fluxos calculados célula a célula podem ser utilizados também para calcular os balanços hídricos por sub-regiões especificadas pelo usuário, entre sub-regiões adjacentes e, de uma só vez para o modelo inteiro.

Como métodos de solução o MODFLOW oferece quatro opções de métodos mistos: o SIP (“Strongly Implicit Procedure”), o SSOR (“Slice Successive Overrelaxation”), o PCG2 (“Preconditioned Conjugate Gradient”) e o DE45 (Direct Solution).

### 4.3 – Área Escolhida para o Modelamento

Estudos realizados na área do Perímetro Irrigado de Sumé pela (UFPB 1998), apontaram, que uma reativação total do referido perímetro com água exclusivamente advinda do manancial subterrâneo, seria praticamente impossível.

De posse desta informação, e após visitas de campo na qual foi identificado que a região que abrange os primeiros lotes do perímetro, encontra-se contaminadas por esgotos e lixos provenientes do Município de Sumé, esta área foi retirada da modelagem.

Foi verificado ainda após minucioso estudo na morfologia do aluvião, que este apresentava em sua extensão final pequenas profundidades, intercaladas com afloramentos o que o tornava ineficaz para o armazenamento e conseqüente transmissão de água; para irrigação; esta área também foi retirada do modelamento.

Além das condições supracitadas a escolha da área a ser modelada, levou em conta ainda os seguintes aspectos:

- Maior profundidade do pacote aluvial;
- Não contaminação (ao menos aparente) por esgoto ou lixo;
- Não afloramento cristalino;
- Maior número de dados disponíveis na área.

Observa-se então que na área escolhida para o modelamento (Figura 4.1) a espessura mínima do pacote aluvial é de 4.00m., e que as maiores profundidades também são encontradas nesta área, não apresentado afloramento do embasamento cristalino, nem tampouco contaminação aparente por esgotos ou lixos.

É também nesta área que se dispõe de um maior número de informação no tocante a sondagens realizadas, campanhas de medição de nível d'água e ainda, foi nesta área que foi locado e construído um poço de pesquisa no qual foi realizado um teste de produção, que permitiu a determinação dos parâmetros hidráulicos do aquífero.

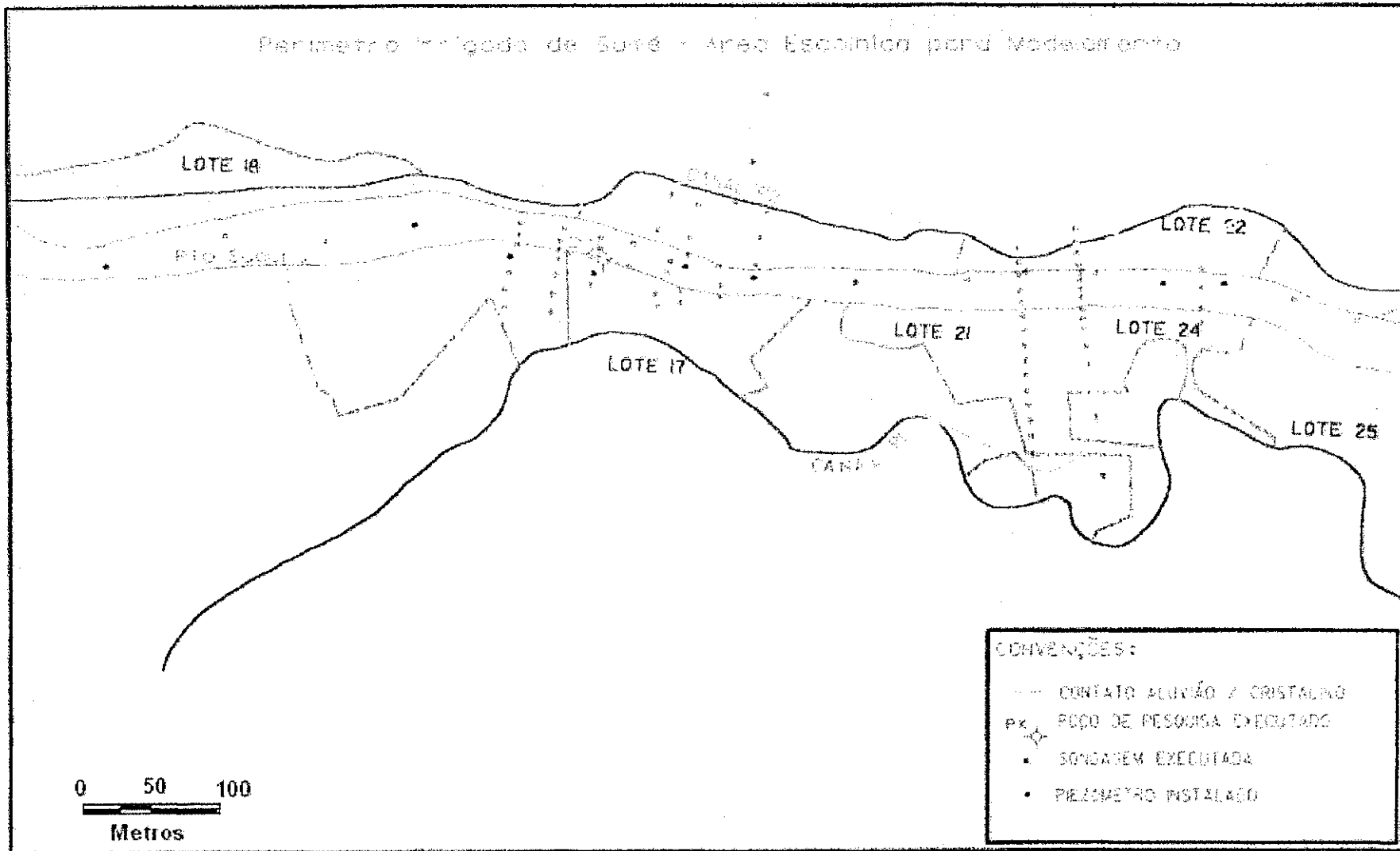


Figura 4.1 – Área Escolhida para o modelamento

#### 4.4 – Descrição do Modelo

Objetiva-se na implantação e operação deste modelo quantificar o potencial de água subterrânea do aquífero e simular o seu comportamento quando submetido à exploração por poços. Procura-se ainda verificar qual a influência que a inserção de uma barragem submersa traria ao aquífero, no tocante a disponibilidade hídrica, fazendo assim com se possa definir quanto do perímetro, poderá ser reativado utilizando água do aquífero aluvial.

O modelo utilizado é bidimensional e discretizado em uma malha contendo 50 (cinquenta) colunas e 25 (vinte e cinco) linhas; com cada célula medindo 50x25m. Posteriormente a malha foi refinada, quando da inserção da barragem submersa, como também dos poços, ficando as células com valores diferentes, menores quando próximas a estes até um tamanho mínimo de 5x5m onde foram locados os poços.

No modelo utilizado foram definido 9 (nove) períodos de tempo, com 28 (vinte e oito) dias cada, isso devido a termos igual período de observação em campo, cada período deste foi subdividido em dois passos de tempos iguais, e ainda foi definido como unidade de tempo para o modelamento o dia.

A evapotranspiração ocorrida na área foi inserida no modelo, mês a mês, onde era definida a máxima de acordo com os dados de evapotranspiração do posto da cidade de Sumé, e foi definido como 0,60m a profundidade a partir da qual não existiria mais evapotranspiração.

Neste modelo não foi considerada a recarga, uma vez que durante o período de observação do nível freático, que serviu para a calibragem do modelo, tal fenômeno não foi observado, em virtude ter sido realizado durante a estação seca de um ano hidrológico de baixa pluviometria.

A Figura 4.2, mostra a área escolhida para o modelamento já inserida na malha e ainda a localização dos piezômetros que serviram para a calibração do modelo. As entradas de todos os dados foram feitas célula a célula, A Figura 4.3 mostra como exemplo de entrada de dados a distribuição dos níveis d'água no início do período de simulação. Cada cor representa uma mesma cota e esta é constante naquela célula.

O Funcionamento do modelo foi preparado de forma que ele calcula a evolução do nível freático dia a dia e apresenta um resultado a cada quinze dias. Essa forma é absolutamente adequada para o processo de calibração do modelo, já que as leituras de nível d'água eram feitas em campo a cada quinze dias.



A calibração procedeu-se através da comparação entre valores calculados pelo modelo e os valores observados em campo.

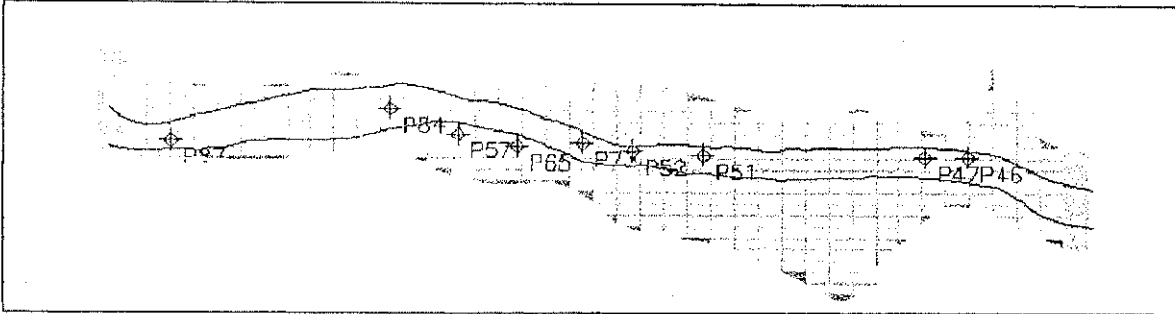


Figura 4.2 – Malha Definida para o Modelamento e Localização dos Piezômetros de Observação

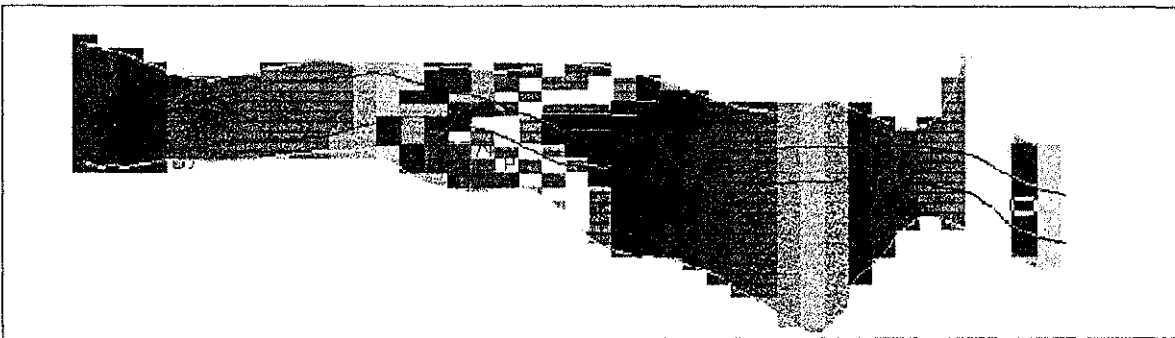


Figura 4.3 – Entrada de Dados no Modelo

#### 4.5 – Condições de Contorno

As condições de contorno do modelo foram definidas de modo a aproximá-lo o mais possível da realidade apresentada em campo.

As fronteiras foram definidas pelo contato cristalino-aluvião, onde as células que ficaram fora deste contato, constituíram-se em células inativas, e utilizando uma ferramenta do próprio modelo (Time-Variant Specified-Head), foram definidas cargas variáveis na entrada e saída da área de modelagem, isso se justifica, pois se tratando de um modelo simulado no regime transitório, não poderíamos trabalhar com potencial de carga fixa na entrada e saída do modelo; a cada período de tempo foi definido um intervalo onde

o nível d'água poderia oscilar, este intervalo foi definido de acordo com as observações de campo.

#### 4.6 – Calibração do Modelo

Para calibrar o modelo foram utilizados os valores medidos em campo do nível d'água em cada piezômetro e comparado com os valores obtidos com o modelo, foi utilizado ainda o valor médio dos parâmetros hidráulicos, obtidos com o teste de bombeamento.

Na Calibração do modelo os únicos valores que foram ajustados foram os de condutividade hidráulica e porosidade eficaz, os demais valores eram mantidos fixos, uma vez mudado o valor da condutividade e/ou da porosidade eficaz, o programa era rodado e verificado o gráfico tempo x rebaixamento. Era tentada a cada ajuste uma sobreposição da curva referente ao valor observado com a referente ao valor calculado em cada piezômetro.

Como valor inicial na calibração foram adotados os valores médios dos parâmetros hidráulicos obtidos no teste de bombeamento, ou seja,  $K = 8,36 \times 10^{-4}$  m/s e  $S = 11,50\%$ . Estes valores não foram adotados imediatamente, em virtude de além de serem valores médios, os teste de aquíferos são pontuais, embora possam ser representativas de uma área. O objetivo era encontrar valores que melhor representasse a situação real no aquífero.

O modelo mostrou ser bastante sensível a alteração destes parâmetros, já que a medida que era modificado um, ou os dois parâmetros a nova configuração das curvas em cada piezômetro era bastante modificada.

A configuração que apresentou melhor relação entre os valores observados e calculados foi a apresentada Figura 4.4.

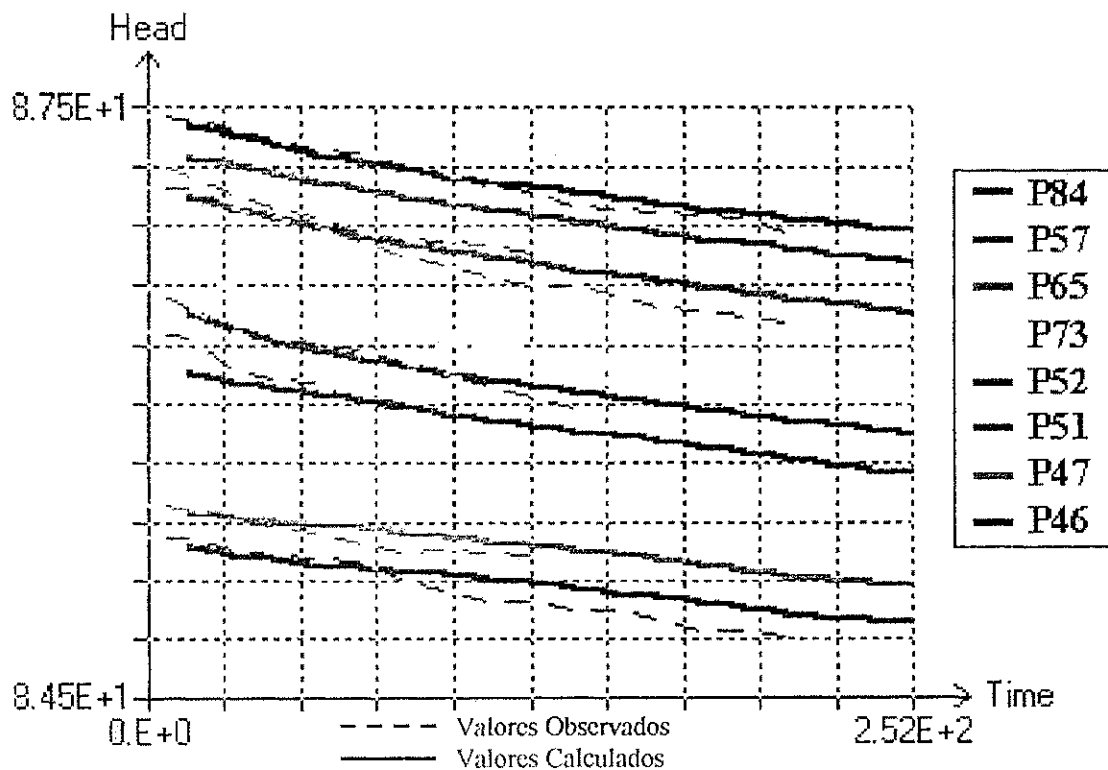


Figura 4.4 – Relação entre os valores observado e calculado

De acordo com a Figura acima os valores calculados pelo modelo e os valores obtidos em campo, foram plotados em um mesmo gráfico e verificado o coeficiente de correlação entre eles. Foi verificado que em todos os piezômetros o coeficiente foi superior a 0.95, considerado muito bom. Como forma de apresentação foi escolhido o piezômetro que apresentou a melhor correlação e o que apresentou a pior. Estes foram os piezômetros 84 e 57, respectivamente, que apresentaram um coeficiente de Correlação de 0.9842 e de 0.966, respectivamente, conforme mostra as Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

A Tabela 4.1 mostra os valores dos parâmetros Hidráulicos, com os quais, não sem esforço, o modelo foi calibrado.

Tabela 4.1 – Parâmetro Hidráulicos, com os quais o modelo foi calibrado.

Conductividade Hidráulica $K$ (m/s)
$7.87 \times 10^{-4}$
Porosidade Eficaz, $S$
10%

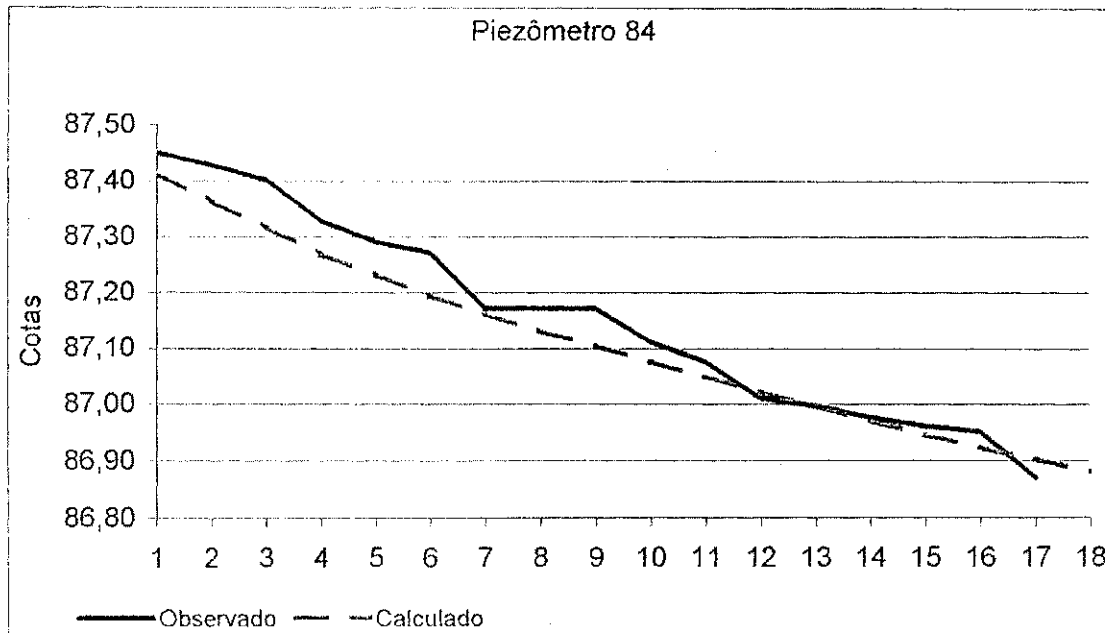


Figura 4.5 – Relação entre os valores observado e calculado no piezômetro 84

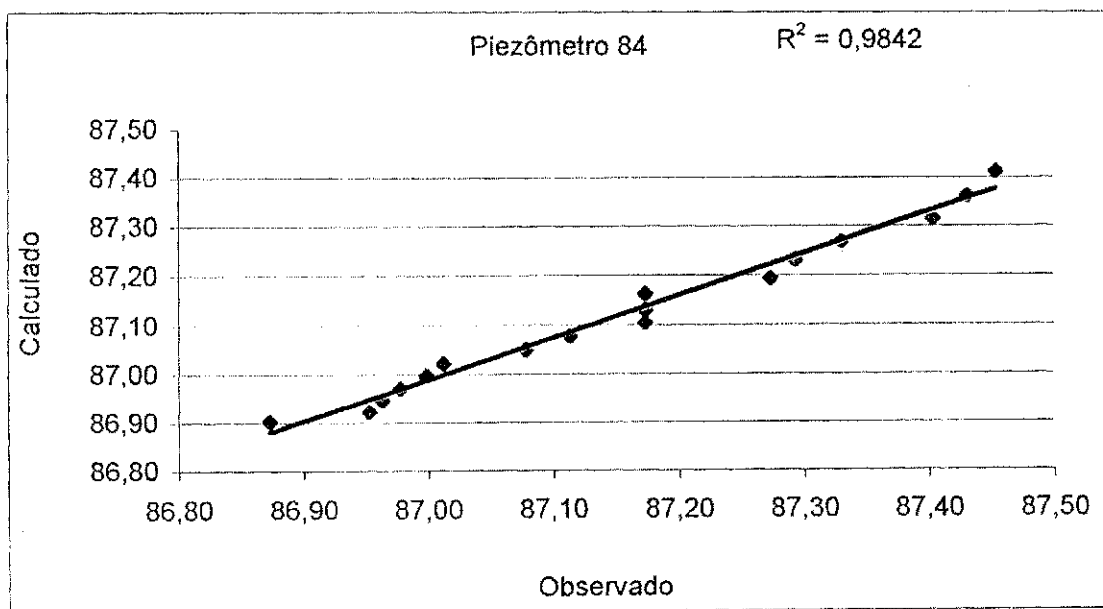


Figura 4.6 – Correlação entre os valores observado e calculado no piezômetro 84

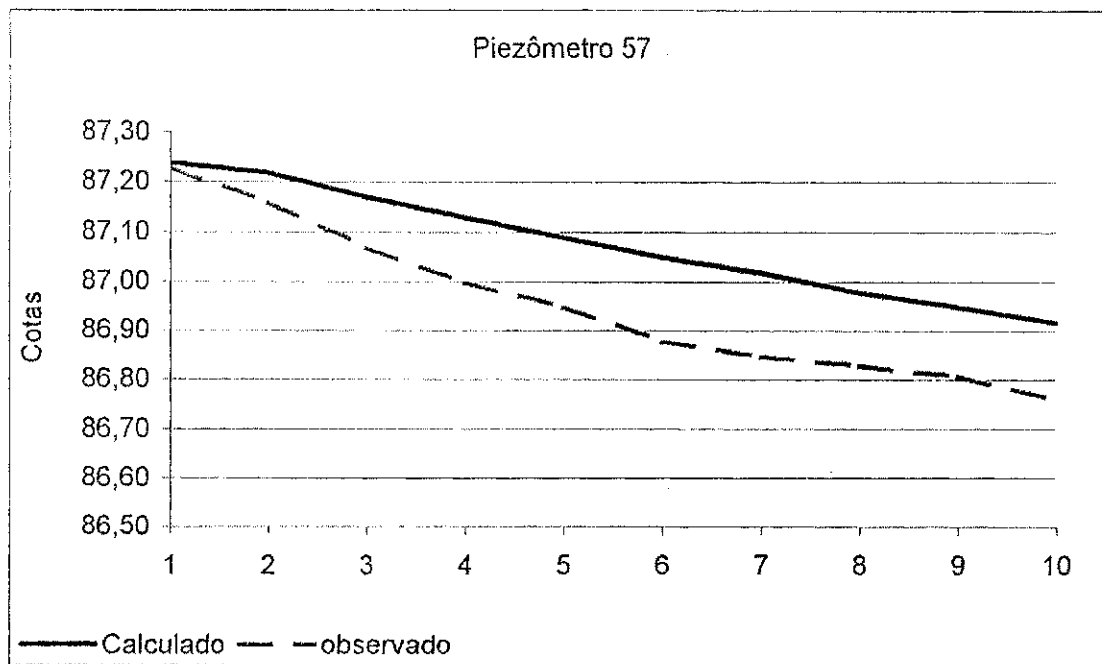


Figura 4.7 – Relação entre os valores observado e calculado no piezômetro 57.

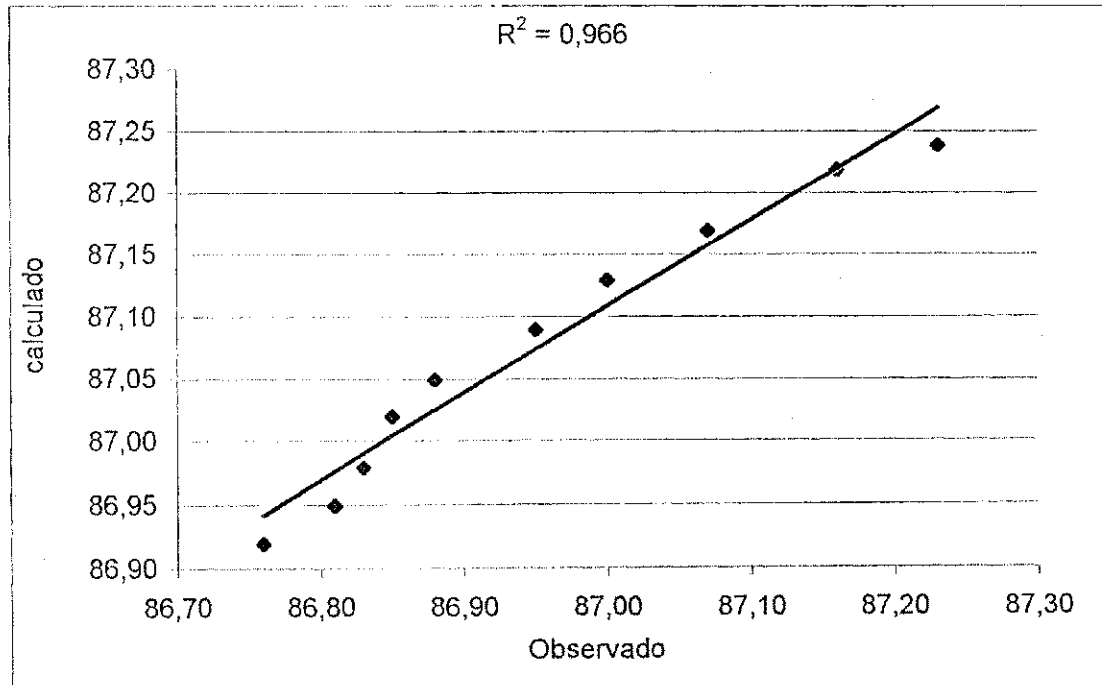


Figura 4.8 – Correlação entre os valores observado e calculado no piezômetro 57

## 5.0 – ALTERNATIVAS PARA EXPLOTAÇÃO DO AQÜÍFERO

Definir uma forma de explorar o aquífero aluvial é algo que requer bastante estudo, uma vez que são muitas as situações possíveis para isto.

Antes de tudo devem ser definidas quais as demandas requeridas e as formas de supri-las.

Neste capítulo trata-se do cálculo das demandas, da localização da barragem subterrânea e os poços e a definição das alternativas (cenários) de operação do aquífero.

### 5.1 – Demandas para Irrigação

Para definição de demandas para irrigação deve-se levar em conta alguns fatores, tais como: tipos de culturas normalmente praticadas, ciclos destas culturas, uso consuntivo das plantas, etc.

Comumente o DNOCS, que é o órgão responsável pelos Perímetros, considera um consumo por hectare de 1,00 l/s, e ainda um período de irrigação de 08 (oito) meses, o que implicaria em uma demanda de  $20.736\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ .

Contudo, a alternativa mais racional e que atenderia um maior número de irrigantes seria obtida com a adoção de culturas de ciclo curto, que reduzissem o período de irrigação para três meses, no máximo. Além disso, este período deveria corresponder ao de menor uso consuntivo das culturas, que, na região do perímetro, está entre os meses de maio e agosto.

A Figura 5.1 mostra a distribuição da precipitação média mensal e da evapotranspiração potencial correspondente, calculada pelo método de Thornthwaite, no posto de Sumé. Por esta Figura, a evapotranspiração potencial total nos meses de maio,

junho, julho atinge 217mm, o que corresponde a uma demanda de 2.170 m<sup>3</sup>/ha. Nos meses de agosto, setembro e outubro atinge 258 mm, o que corresponde a uma demanda de 2.580m<sup>3</sup>/ha; já os meses de novembro, dezembro e janeiro são os meses de maior uso consuntivo, uma vez que a evapotranspiração é muito alta, atingido 400mm, o que corresponde a 4.000 m<sup>3</sup>/ha.

A vazão utilizada no modelo é em m<sup>3</sup>/dia, uma vez que, como já foi explicitado anteriormente o modelo trabalhará com a variável tempo em dias.

Tendo como objetivo o atendimento às demandas acima calculadas, será determinada qual a vazão máxima possível de ser explorada em cada poço em cada mês está vazão é constante, podendo ser alterado de um mês para outro.

O volume total possível de ser retirado em cada mês de cada poço, e a área passível de ser irrigada são facilmente determinados pelas equações 5.1 a 5.3.

$$Vmês_i = \sum (Q_{pi} * n_i) \quad (5.1)$$

$$Vt = \sum Vmês_i \quad (5.2)$$

$$A = \frac{Vt}{D} \quad (5.3)$$

Onde:  $Vmês_i$  = Volume explorado no mês i, em m<sup>3</sup>;

$Q_{pi}$  = Vazão máxima explorada no poço i, em m<sup>3</sup>/h;

$n_i$  = Número de dias do mês i, adotado o valor constante de 30 dias;

$Vt$  = Volume total, em m<sup>3</sup>;

$A$  = Área passível de ser irrigada em ha;

$D$  = Demanda requerida, em m<sup>3</sup>/ha.

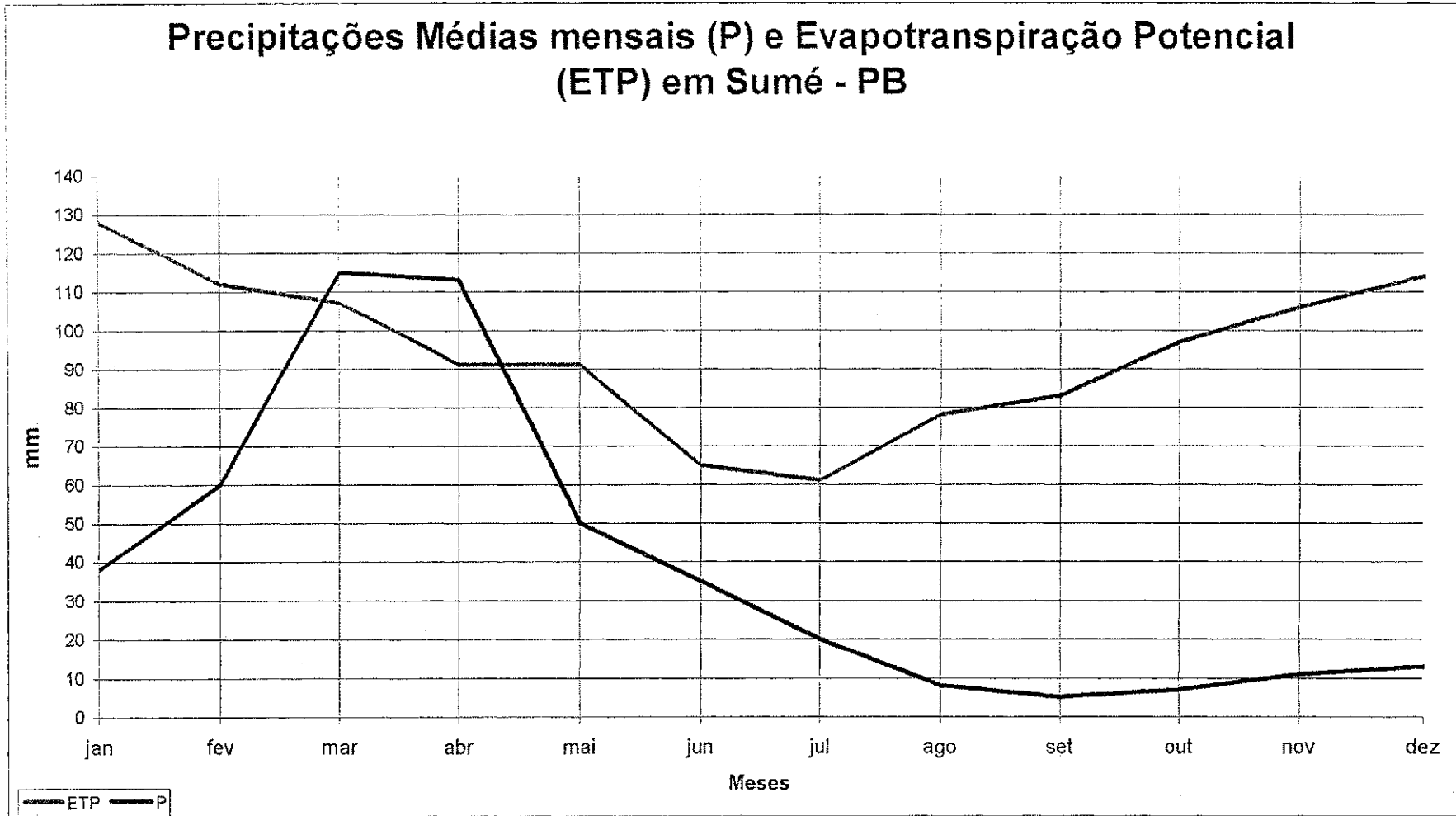


Figura 5.1 – Precipitações médias mensais e Evapotranspiração Potencial no posto de Sumé – PB



## 5.2 – Inserção de Barragem Subterrânea

Numa tentativa de se conseguir uma melhor forma de operação do aquífero, será inserida no modelo uma barragem submersa, que objetiva, impedir que a água subterrânea flua mais para jusante se perdendo, tal barramento permitira o retardando do fluxo e com isso possibilitar a captação, através de poços.

Verificou-se, pelo perfil longitudinal do aquífero na área modelada, que o mesmo já apresenta uma elevação do substrato cristalino (Figura 5.2), formando assim um barramento natural, isso fez com que o local escolhido para a inserção da barragem subterrânea fosse feito, atendendo as seguintes considerações:

- Região mais a jusante na área escolhida para o modelamento, evitando assim uma interferência sobre o barramento natural existente, como também possibilitando uma cobertura sobre toda a área.
- Definida a região, se procurou local numa seção transversal, onde naturalmente o contato cristalino/aluvião, a tornava estreita, facilitando assim o processo construtivo, e minimizando os custos.

Escolhido o local, no qual será simulada a inserção da barragem submersa, as células que correspondem ao local da barragem tiveram suas condutividades hidráulicas, reduzidas a valores bem pequenos. Enquanto que nas outras células os valores da condutividade hidráulicos eram de  $7,87 \times 10^{-4}$  m/s, na área da barragem a condutividade hidráulica foi reduzida para 0,5 m/dia o que implica em  $5,79 \times 10^{-6}$  m/s (Figura 5.3).

A decisão de simular uma barragem reduzindo o valor da condutividade hidráulica na área de locação da mesma, se justifica por corresponder ao que é feito na prática, uma vez que, principalmente em regiões onde a possibilidade de salinização está presente, não é recomendado barrar totalmente o fluxo, o que poderia aumentar a chance de salinização do aquífero, tornando-o impróprio quer seja para abastecimento ou para irrigação.

E ainda o que comumente é realizado em pequenas obras, nada mais é do que na área escolhida para construção da barragem, se fazer um corte transversal ao leito do rio ou riacho, até atingir o embasamento cristalino e em seguida preencher a vala com material de condutividade hidráulica baixa, como, por exemplo, argila compactada.

A Figura 5.3 mostra o local escolhido para a inserção da barragem submersa.

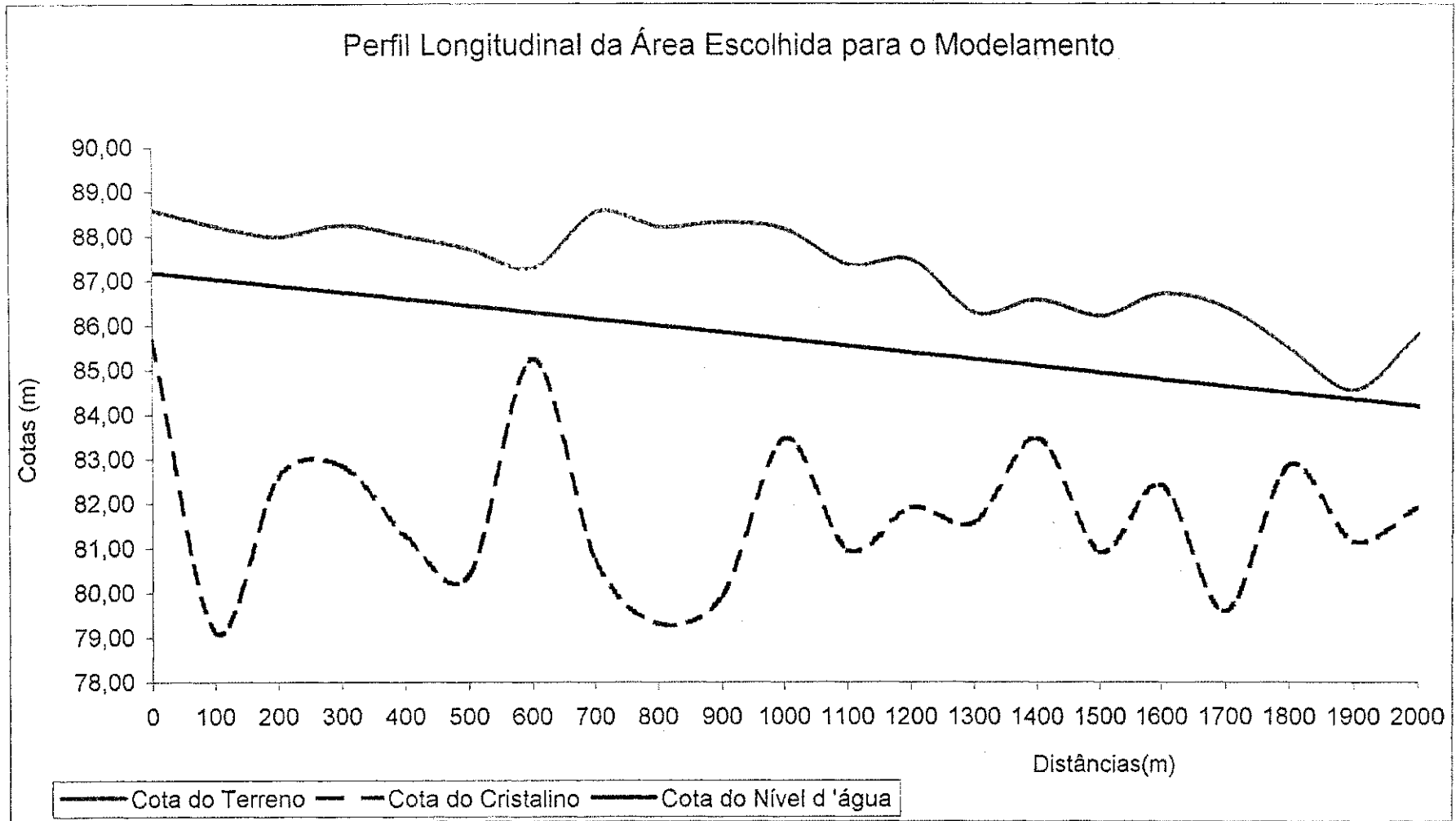


Figura 5.2 – Perfil Longitudinal da Área Modelada.

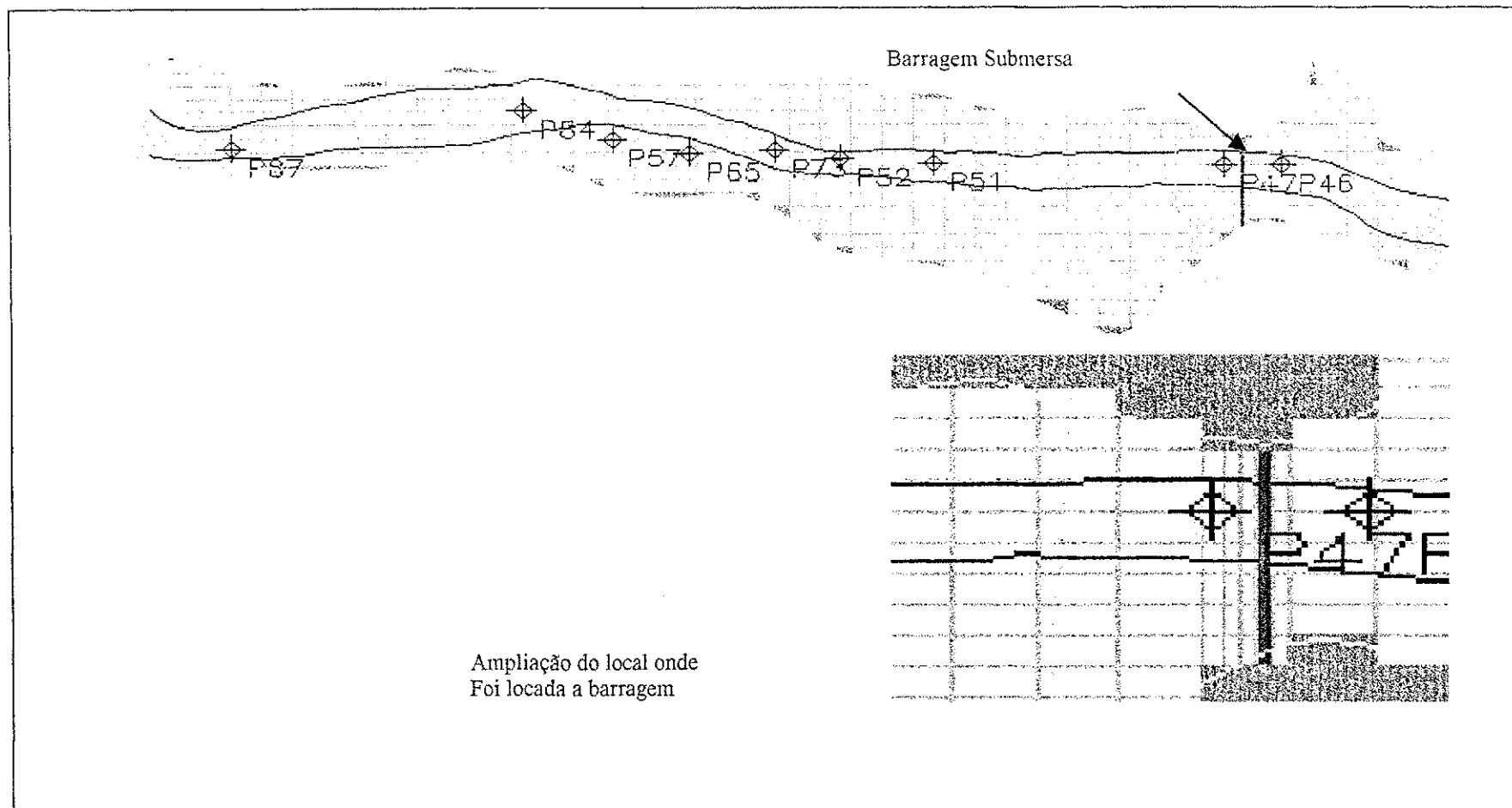


Figura 5.3 – Localização da Barragem submersa na Área Modelada

### 5.3 – Inserção de Poços

Para a correta locação dos poços, se fez necessária uma demorada e exaustiva análise de toda a área do aquífero, tentando verificar qual seria a maneira mais racional de explorá-lo, para isso algumas análises tiveram de ser feitas.

- Determinação das maiores profundidades no aquífero, nas quais deveriam ser locados os poços;
- Verificação do volume máximo de água que poderia ser retirado com determinada locação dos poços naquele determinado local;
- Simulações para comparar as vantagens entre locar muitos poços com vazões menores, ou poucos poços com vazões maiores;

Além disso, foram adotados os seguintes critérios:

- Tentar abranger toda a área do modelamento a fim de evitar um custo maior de adução;
- Evitar uma proximidade exagerada entre os poços, evitando assim que um possa interferir significativamente no outro.

Terminada essa fase de análise, foram locados 07 (sete) poços, 02 (dois) deles locados de forma estratégica, antes e depois da barragem submersa, que serviram para análise da influência do barramento sobre a captação por poços. Foi procedido um refinamento na malha com a finalidade de deixar a célula na qual o poço foi locado com uma dimensão mais próxima da real que foi 5 x 5m, e as células vizinhas com valores que cresciam de acordo com seu afastamento do poço, evitando assim que em função do tamanho das células algum erro pudesse ser cometido; contudo foi verificado que as dimensões das células em nada interferiam no resultado obtido para o modelo ora em estudo. Mesmo assim foi mantido o refinamento da malha.

A Figura 5.4 mostra qual a melhor configuração para localização dos poços e seus respectivos nomes e ainda a Figura 5.5 mostra o refinamento realizado na malha, com objetivo de melhor adequação a realidade.

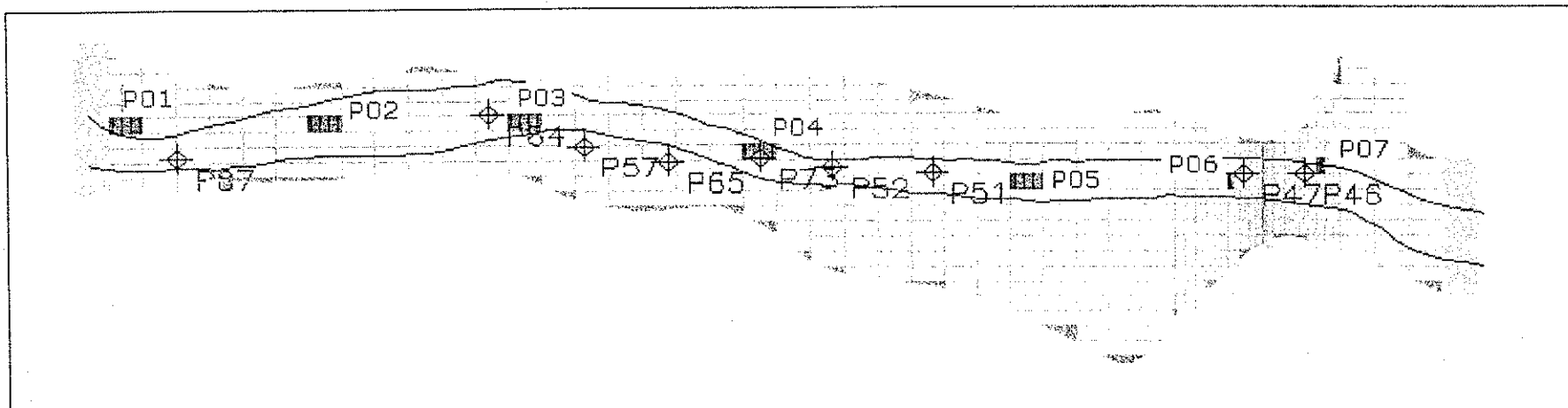


Figura 5.4 – Localização dos poços na área de modelamento

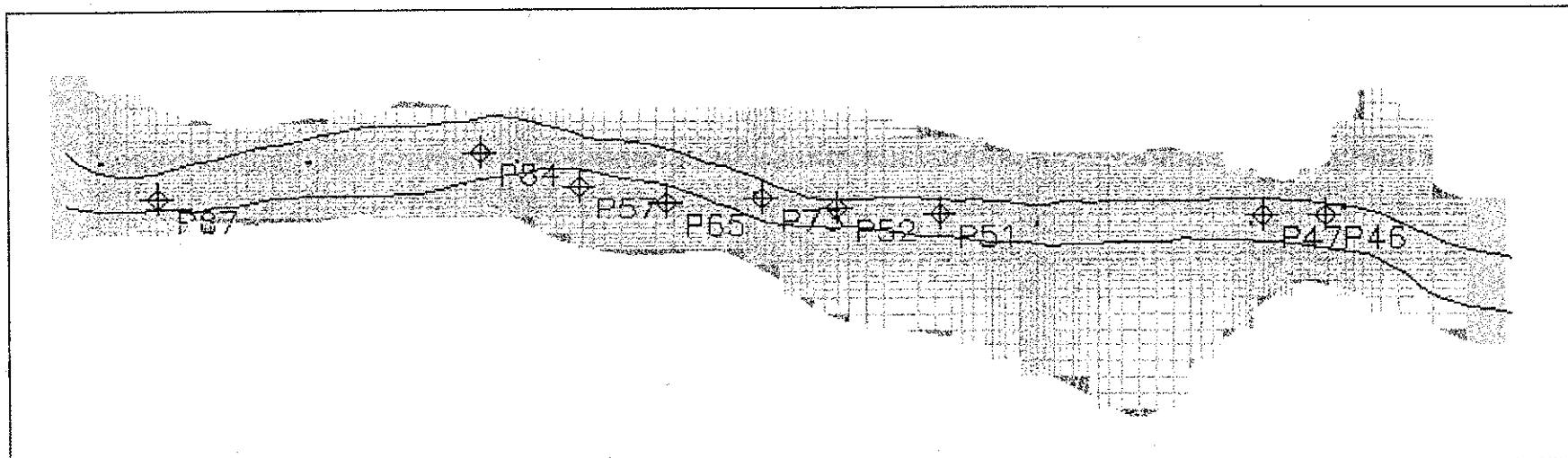


Figura 5.5 – Refinamento da malha nas proximidades dos poços

#### 5.4 – Critérios e Cenários Adotados para a Simulação da Exploração do Aquífero

Como forma de obtenção de um manejo racional do aquífero aluvial, foram adotados alguns critérios na simulação da exploração:

- Adoção de safras de ciclos curtos 03 (três) meses;
- Utilização como demanda para irrigação o uso consuntivo das plantas no trimestre;
- Irrigação iniciada no final do período chuvoso;
- Definição da maior vazão possível se ser extraída de cada poço, sem que este viesse a secar antes do período de simulação;
- Definição de 20 ha, como sendo a menor área que atendendo a razões econômicas deveria ser reativada através da irrigação com água proveniente do manancial subterrâneo;
- Tentativa de uma segunda safra, mesmo que para isso fosse necessária a diminuição da área irrigável, em relação à primeira safra, contudo atendendo ao limite mínimo de 20 ha;
- Suspensão total ou parcial da irrigação nos meses de novembro dezembro e janeiro, trimestre este, que apresenta maior uso consuntivo das plantas;

Definidos os critérios acima foram criados 07 cenários para simulação, cujos resultados estão no capítulo seguinte.

São simuladas 07 (sete) situações distintas: o aquífero aluvial sem barragem após um ano hidrológico regular (cenário 1), o aquífero aluvial com barragem após um ano hidrológico regular (cenário 2), o aquífero aluvial com barragem após um ano hidrológico regular seguido de um ano de estio (cenário 3), o aquífero aluvial sem barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio (cenário 4), o aquífero aluvial sem barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio seguido de um ano de estio (cenário 5) e o aquífero aluvial com barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio (cenário 6) e o aquífero aluvial com barragem em um ano onde o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio (cenário 7). Com exceção do cenário 1, os demais cenários são hipotéticos em relação à situação encontrada em Sumé – PB.

## **6.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1 – Cenário 01: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, sem barragem submersa.**

Este cenário simula a exploração do aquífero em um período seco com condições iniciais semelhantes ao período observado em 1997, empregado para calibração. Neste caso é possível observar, após a simulação, a situação atingida pelos níveis freáticos em comparação à situação real medida em campo.

O aquífero foi submetido à exploração, através de poços, onde por tentativa e erro, foi determinado qual a maior vazão, que se poderia retirar de cada um dos 07(sete) poços, a fim de se garantir pelo menos duas safras com ciclos de três meses, observadas as demandas e critérios definidos anteriormente.

Foram feitas diversas simulações, sempre mudando os valores das vazões retiradas de cada poço, contudo, era evitado que o mesmo secasse antes de completado o período de simulação. Os valores apresentados na Tabela 6.1 mostram qual a vazão à qual, após diversas simulações, cada poço foi submetido e em quais meses foi verificado isto, como ainda o volume obtido com o bombeamento e as áreas irrigáveis possíveis de serem atendidas.

Tabela 6.1 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 01.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Maio	43	37	30	27	33	63	33
Junho	43	37	30	27	33	63	33
Julho	43	37	30	17	33	60	33
Agosto	43	37	30	17	33	60	33
Setembro	43	27	20	10	17	53	33
Outubro	43	27	13	0	10	37	30
Novembro	43	30	13	0	0	30	30
Dezembro	0	0	0	0	0	0	0
Janeiro	0	0	0	0	0	0	0
Meses	Volume(m <sup>3</sup> )		Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)		
Maio, junho, julho.	70.800		2.170		33		
Agosto, setembro e outubro.	55.500		2.580		22		

O período, no qual poderão ser atendidas as demandas para irrigação com água proveniente do aquífero, é de maio a outubro, sendo que para os três primeiros meses, a água presente no mesmo possibilita o atendimento a 33 ha e nos três meses seguintes a área atendida cairia para 22 ha, estes valores de áreas atendidas estão sempre arredondados para um valor inteiro, o que atende ao critério de termos pelo menos 20 ha reativados. Essa Configuração mostra um esvaziamento progressivo no aquífero, motivado em parte pela exploração simulada, mas também pelo seu próprio esvaziamento natural, uma vez que não havia nada que impedisse esse esvaziamento, como uma barragem subterrânea por exemplo.

Este cenário demonstra que alguma intervenção artificial deverá ser feita, objetivando tornar o aquífero capaz de armazenar água suficiente, para pelo menos uma safra no ano seguinte, em caso deste ano ser de seca. Esta intervenção poderá ser a construção de uma barragem submersa, como ainda a suspensão do bombeamento nos meses de novembro e dezembro, meses estes de maior uso consuntivo das plantas em virtude da elevada evapotranspiração.

A Figura 6.1 mostra o comportamento do nível freático observado nos piezômetros, onde se pode verificar uma queda mais acentuada nos primeiros meses, já que a taxa de



bombeamento era maior, seguido de uma suavização até seu esvaziamento e/ou perto deste, nos meses seguintes.

A Figura 6.2 mostra as vazões máximas explotáveis em cada poço ao longo do tempo. Observa-se que os poços 01 e 07 foram os que se mostraram ser mais eficientes, no tocante à exploração dos meses simulados, pois só nos últimos meses sua vazão precisou ser reduzida.

Isto se explica por o poço 01 estar locado em uma área a montante de uma elevação do embasamento cristalino que formou assim um barramento natural. Já o poço 07 está colocado na parte mais a jusante do aquífero e como não existe barramento ele recebe contribuição de toda a área a montante dele. O poço 06 foi o que permitiu ser extraída a maior vazão, contudo com o passar do tempo teve de ser diminuída evitando assim que ele secasse. Os poços 01, 02, 03, 06 e 07, continuaram a serem explorados no mês de novembro, como forma de poder suprir as comunidades com reservas hídricas para dessedentação de animais, ou cultivo de hortas, fato este comum nestas áreas.

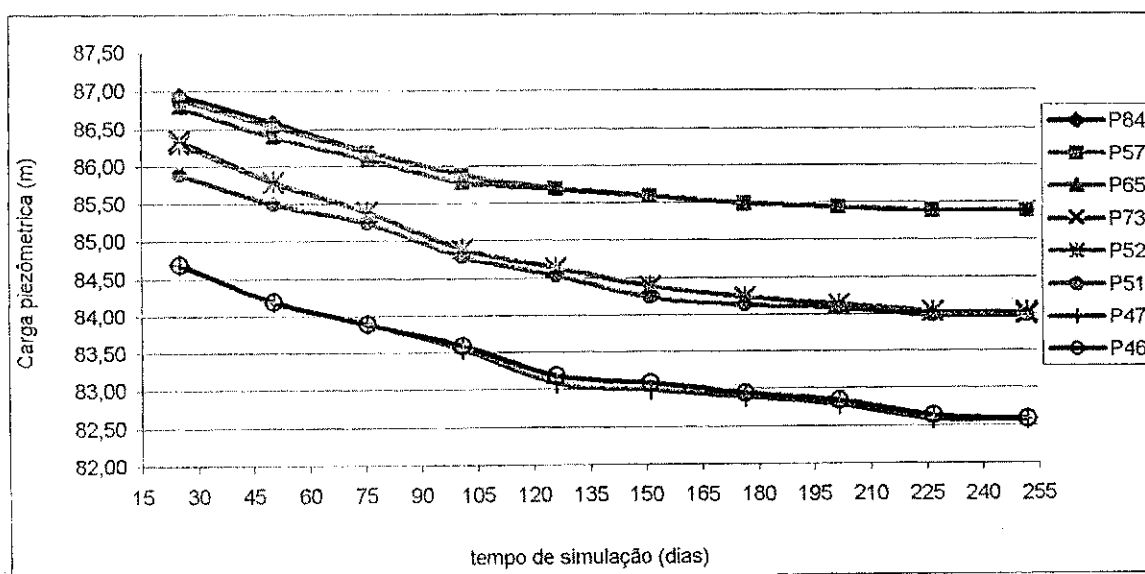


Figura 6.1 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 01

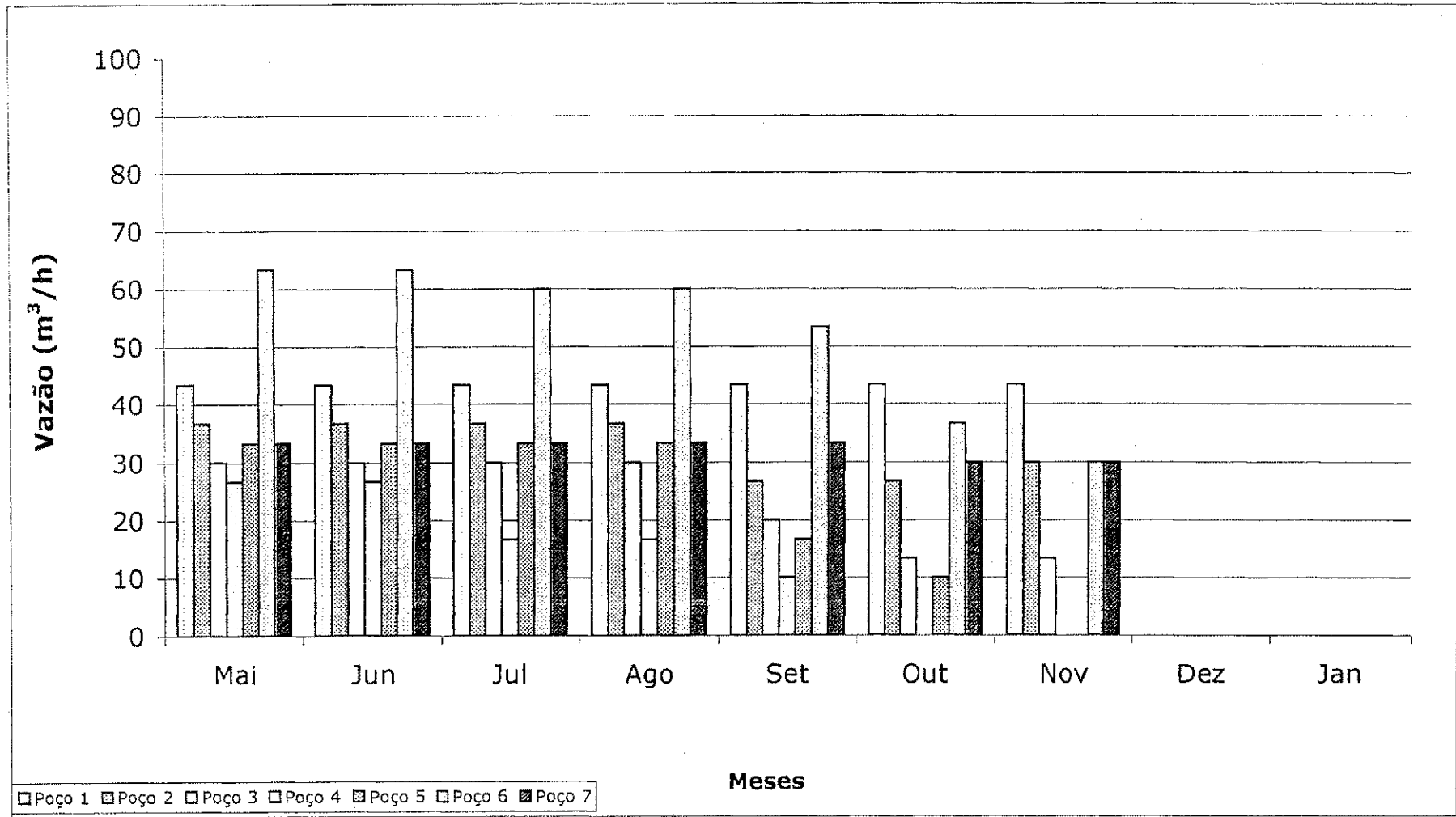


Figura 6.2 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal e sem barragem subterrânea) cenário 01.

## 6.2 – Cenário 02: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, com barragem submersa.

Com o objetivo de criar uma possibilidade de exploração maior do aquífero, gerando assim meio de se reativar mais áreas, atendendo desta forma um maior número de irrigantes, foi simulado o cenário 02 no qual foi inserida uma barragem submersa, locada de maneira a possibilitar um maior acúmulo de água e obedecendo aos critérios já mencionados anteriormente no capítulo V.

Após a inserção da barragem foram novamente feitas inúmeras simulações, mudando os valores das vazões extraídas em cada poço, em busca de uma vazão ótima de exploração em cada um destes. A Tabela 6.2 mostra as vazões em  $m^3/h$ , possíveis de serem retiradas em cada poço, como ainda o volume no período e as áreas atendidas.

Tabela 6.2 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 02.

Meses	Poço 01/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 02/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 03/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 04/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 05/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 06/ Vazões ( $m^3/h$ )	Poço 07/ Vazões ( $m^3/h$ )
Maio	53	40	33	30	37	60	33
Junho	53	40	33	30	37	60	33
Julho	53	40	33	30	37	60	33
Agosto	47	43	37	27	43	60	33
Setembro	47	43	37	27	43	53	33
Outubro	20	23	30	20	27	40	30
Novembro	7	7	3	7	3	13	10
Dezembro	0	0	0	0	0	0	0
Janeiro	0	0	0	0	0	0	0
Meses		Volume( $m^3$ )		Demanda( $m^3/ha$ )		Área atendida(ha)	
maio, junho, julho		77.400		2.170		36	
agosto, setembro e outubro		68.700		2.580		27	

Analisando a Tabela verifica-se o aumento da área possível de ser irrigada, que passou a ser de 36 ha, nos meses de maio, junho e julho e de 27 ha nos meses de agosto, setembro e outubro, o que representa além de um aumento na área de irrigação, a possibilidade de retenção do fluxo, a montante da barragem, e com isso somando-se a suspensão do bombeamento nos meses de novembro e dezembro, possibilite a irrigação no ano seguinte em caso de seca.

Os rebaixamentos apresentados com a exploração na qual foi submetido o aquífero está mostrada na Figura 6.3.

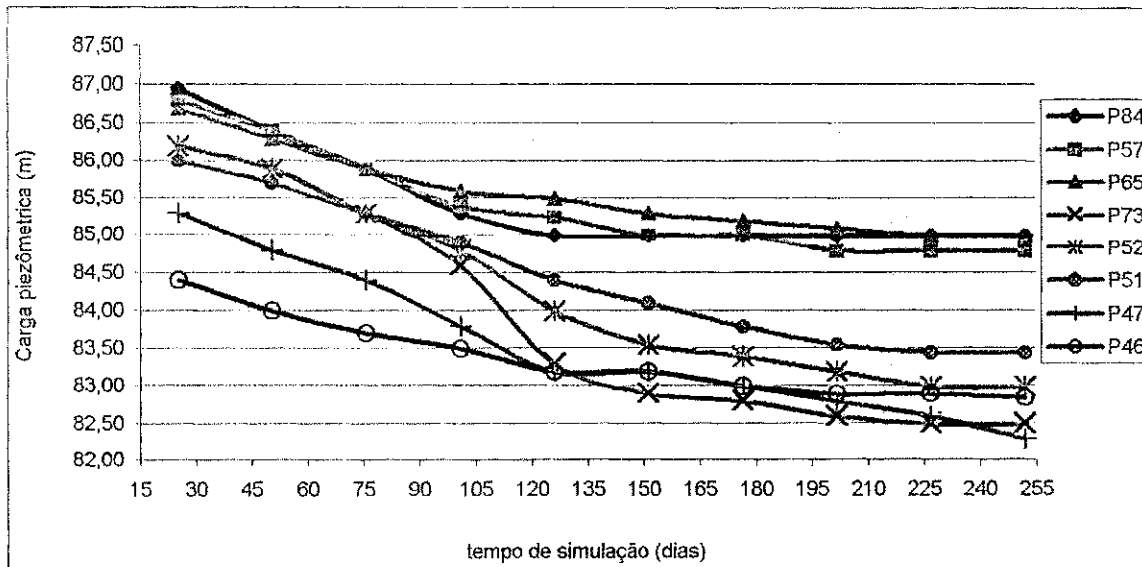


Figura 6.3 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 02.

A Figura 6.4 mostra o esquema de operação dos poços, onde se verifica, qual vazão foi retirada de cada poço e o mês onde isto ocorreu, como era de se esperar o poço que forneceu uma maior vazão, foi o poço 06 que fica próximo a barragem, a montante desta. Em quase todos os poços e meses aconteceram aumento na vazão, mostrando assim a eficácia da inserção da barragem submersa.

Atendendo aos mesmos critérios adotados no cenário 01, no mês de novembro foi continuada a exploração dos poços, com diferencial, que, em virtude de uma maior exploração nos meses anteriores, a exploração neste mês apresentou uma vazão menor do que no cenário anterior.

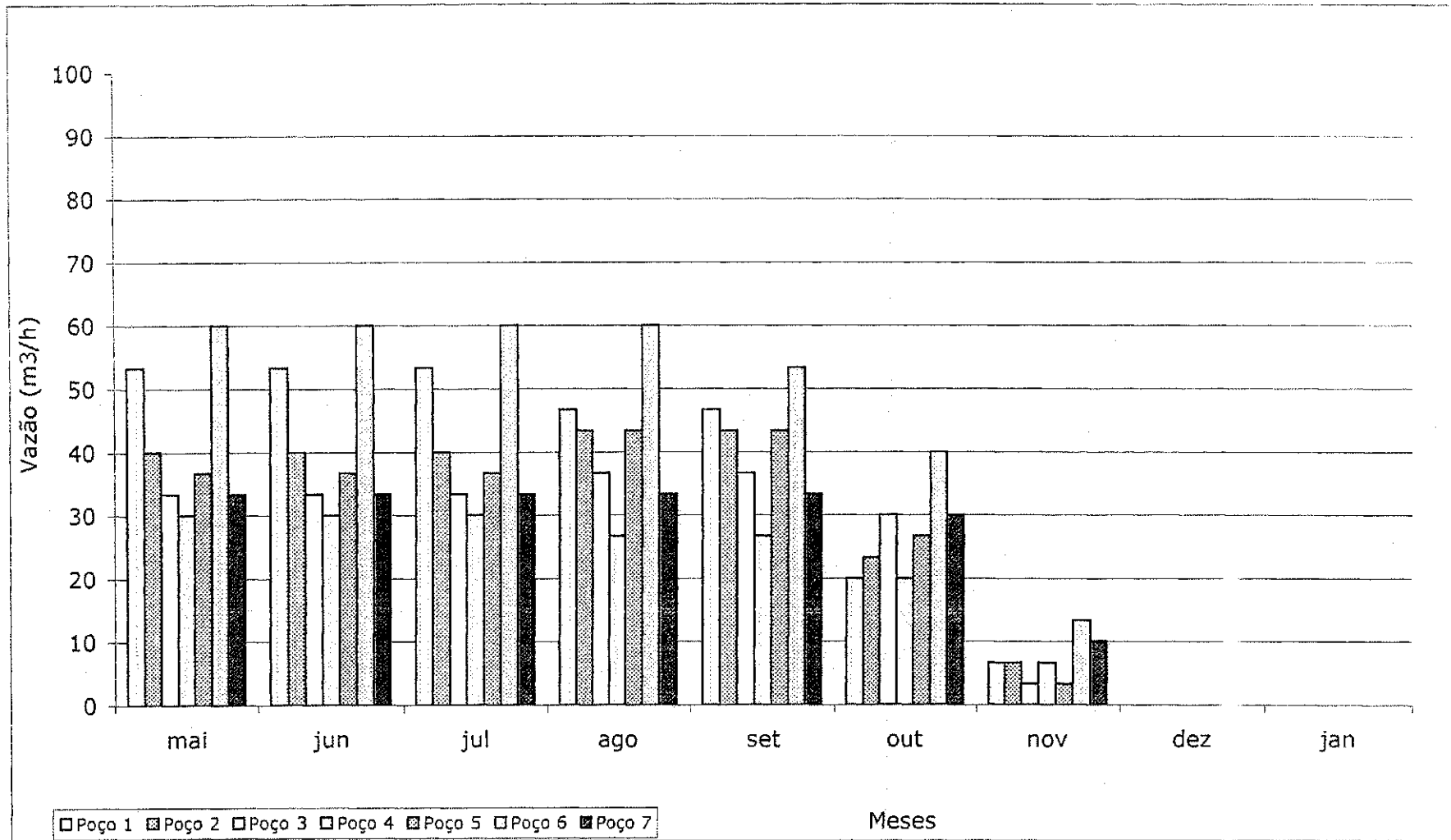


Figura 6.4 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal e com barragem subterrânea), Cenário 02.

### **6.3 – Cenário 03: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, seguido de um ano de estio com barragem submersa.**

Uma vez que períodos de estiagem são comuns nas regiões semi-áridas em particular no Nordeste do Brasil, neste cenário foi simulado o caso de termos um ano regular de chuvas, no qual o aquífero é explorado, para obtenção de mais duas safras, contudo o ano seguinte é um ano de seca, fazendo com que não exista recarga no aquífero.

Diante disto foi verificada a possibilidade de obtenção de pelo menos uma safra, amenizando assim um pouco a situação, já precária, vivida pela população dessa área. Foi verificada ainda a possibilidade de se ter um ano onde se inicia o período de chuvas e logo em seguida cessa, quando os agricultores já haviam plantado. Para tal situação seria implantada a chamada “irrigação de salvação”; que consiste em fornecer água para o agricultor irrigar, evitando assim uma perda total na sua safra, ou ainda o agricultor plantava esperando que as chuvas viessem, e na falta destas, a irrigação poderia diminuir suas perdas.

Para isso o período de simulação foi aumentado em três meses, o qual passou a ser de maio a março. Neste caso, o aquífero foi bombeado nos seis primeiros meses, o que garantiria ao agricultor mais duas safras. Após isso, o bombeamento foi suspenso.

Durante o período em que o bombeamento foi suspenso aconteceria uma recuperação do nível freático, principalmente nos poços localizados mais próximos a barragem, conforme pode ser visto nos piezômetros localizados próximo ao barramento (Figura 6.5).

A Tabela 6.3 mostra os resultados que foram obtidos após terem sido feitas, novamente, inúmeras simulações, mudando os valores das vazões extraídas em cada poço.

De acordo com as simulações feitas, para o cenário modelado, nos três primeiros meses, seria possível atender a uma área de 30 ha, já para os três meses seguintes e os três meses do próximo ano, só seria possível irrigar 20 ha, mesmo sendo uma área pequena em relação à dos outros cenários simulados, é significativa, uma vez que ajudaria na economia tão fragilizada dessas áreas, e atendia os critérios definidos anteriormente.

Observa-se, no entanto, que a área irrigável nos meses de maio, junho e julho diminui em relação aos dos cenários anteriores, isso foi necessário em virtude de ter que se atender ao critério adotado de atingir o mínimo de 20 ha de área irrigável.

Tabela 6.3 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 03

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Maio	37	33	30	23	33	53	30
Junho	37	33	30	23	33	53	30
Julho	37	33	30	23	33	53	30
Agosto	33	27	17	17	30	40	27
Setembro	33	27	17	17	30	40	27
Outubro	33	23	17	17	27	40	23
Novembro	0	0	0	0	0	0	0
Dezembro	0	0	0	0	0	0	0
Janeiro	37	33	17	13	30	30	30
Fevereiro	37	33	17	13	30	30	30
Março	37	33	17	13	30	30	30
Meses		Volume(m <sup>3</sup> )		Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)	
Maio, junho, julho		64.800		2.170		30	
Agosto, setembro e outubro		50.400		2.580		20	
Janeiro, fevereiro e março		51.300		2.580		20	

Na Figura 6.5 observa-se claramente a recuperação do nível d'água, após cessar-se o bombeamento, essa recuperação se deve em grande parte a existência da barragem subterrânea, que mesmo sendo em um período de tempo pequeno, o efeito da barragem já pode ser visto. Na Figura 6.6 é mostrada a vazão retirada mensalmente em cada poço, o vazio nos meses de novembro e dezembro se deve ao fato de não ter sido simulado exploração nestes meses.

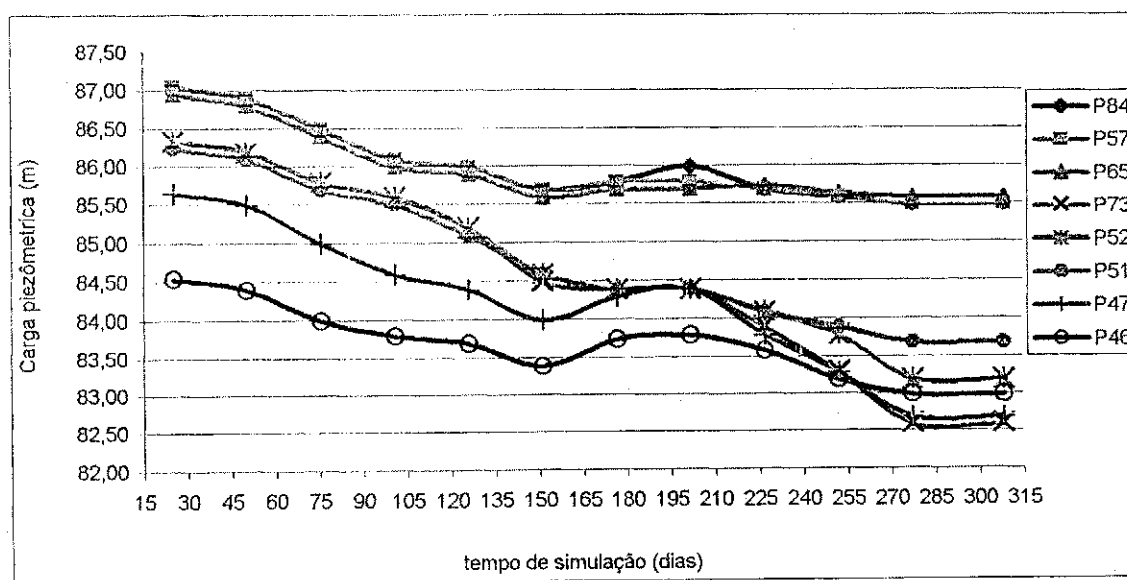


Figura 6.5 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 03.

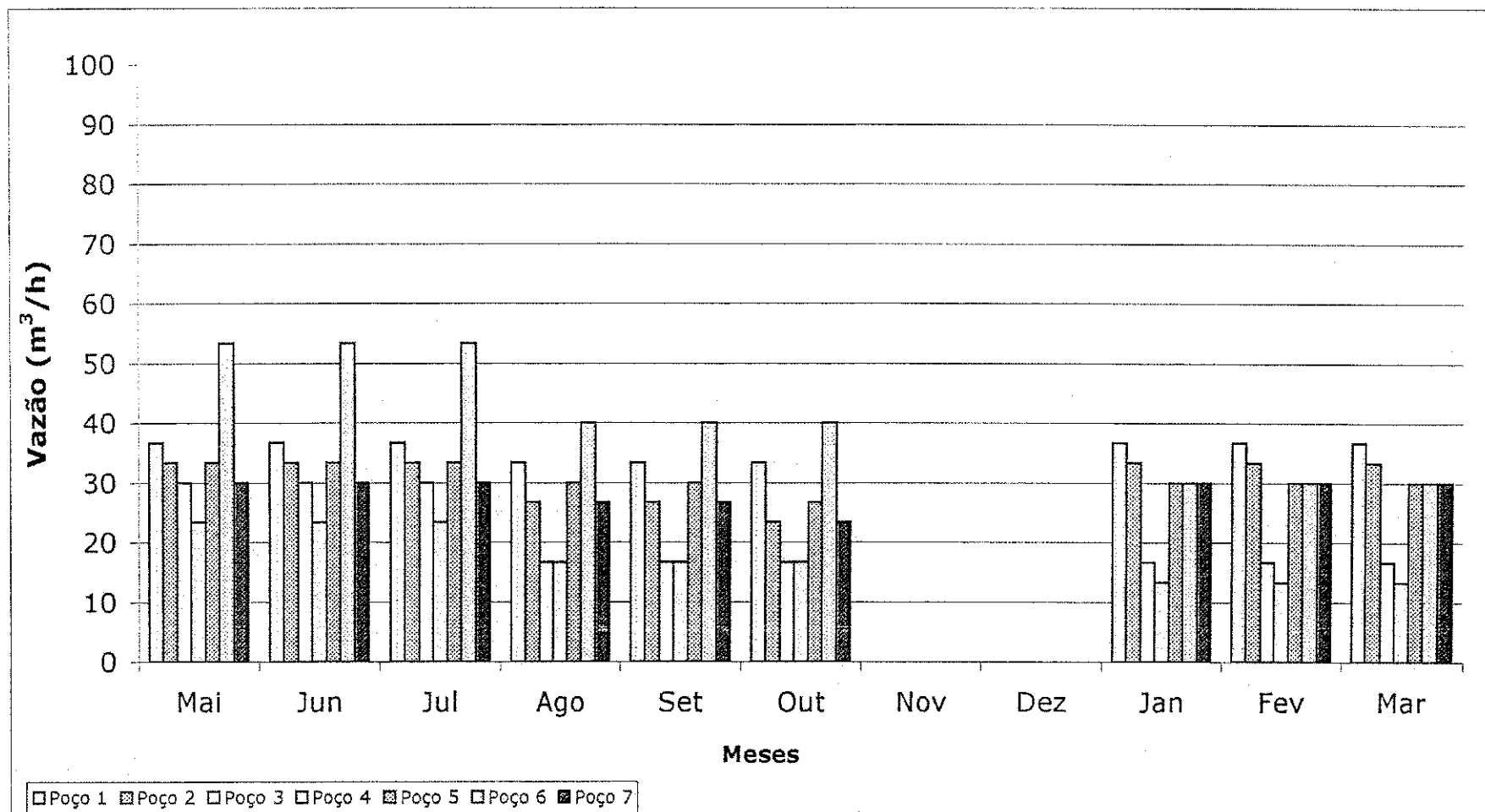


Figura 6.6 – Vazões Máximas explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Período normal seguido de estio e com barragem subterrânea), cenário 03



#### 6.4 – Cenário 04: Aquífero aluvial sem barragem em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio.

Este cenário também é verificado nestas regiões. Seria o de um ano onde a pluviometria, fosse maior do que a média, acontecendo um recarregamento total do aquífero, fazendo com que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio. Este foi o nível usado como inicial para a simulação.

Essa seria uma situação considerada ideal, uma vez que poderíamos contar com o máximo que o aquífero pode contribuir para atender as demandas para irrigação.

Neste cenário foi simulado o aquífero sem barragem, e testado a possibilidade de uma safra a mais, ou seja, três períodos de três meses. Foram realizadas também, diversas simulações para se chegar a um melhor esquema de operação dos poços.

A Tabela 6.4 mostra os resultados que foram obtidos após terem sido feitas, novamente, inúmeras simulações, mudando os valores das vazões extraídas em cada poço.

Tabela 6.4 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 04.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Maio	60	50	40	30	33	70	47
Junho	60	50	40	30	33	70	47
Julho	60	50	40	30	33	70	47
Agosto	50	43	37	30	30	60	47
Setembro	50	43	37	30	30	60	47
Outubro	47	33	17	20	30	60	47
Novembro	33	33	20	10	30	40	47
Dezembro	33	33	10	7	27	30	47
Janeiro	30	27	7	3	20	20	43
Meses	Volume(m <sup>3</sup> )		Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)		
Maio, junho, julho	89100		2170		41		
Agosto, setembro e outubro	76200		2580		30		
Novembro, dezembro e janeiro	49500		4000		12		

Foi verificado com análise da Tabela, que ocorreu um aumento da área irrigável nos três primeiros meses, de 36 ha para 41 ha, nos três meses seguintes de 27 ha para 30 ha, e nos três últimos meses para 12 ha, mostrando assim que não é recomendado esse terceiro período de irrigação, pois se trata de um período, onde o consumo é bastante elevado, e a

área que seria atendida é pequena, não atendendo ao mínimo de 20 ha, sendo mais racional a suspensão da irrigação favorecendo a recuperação do nível do aquífero para voltar a irrigar no ano seguinte.

Esta configuração também mostra que mesmo em um ano hidrológico acima da média, no qual houvesse uma recarga completa no aquífero, este ainda não seria capaz de ceder água suficiente para reativação de todo o perímetro.

No cenário 06 será simulada a inserção de uma barragem submersa, quando a situação for à mesma simulada neste cenário.

A Figura 6.7 mostra o rebaixamento nos piezômetros para o cenário simulado.

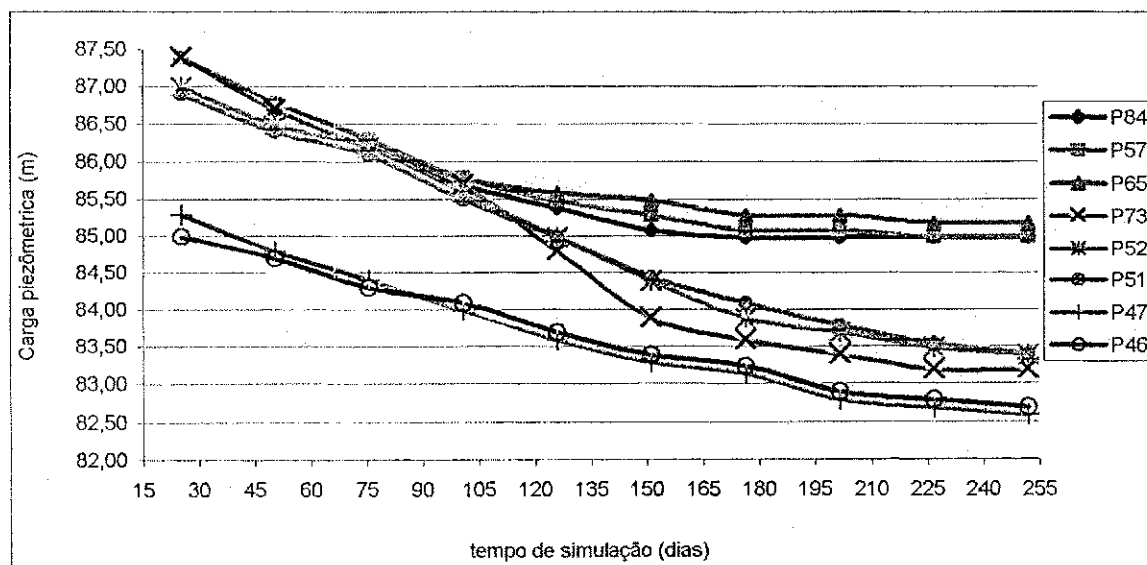


Figura 6.7 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 04.

Na Figura 6.8 podemos verificar que a vazão extraída em todos os poços foi aumentada, isso já era esperado, já que o nível do freático estava elevado. Comprovou-se ainda que o poço 06 é o que fornece a maior vazão e o poço 04 o que fornece a menor, isso verificado nos outros cenários também, a explicação para o poço 04 ser o que permite retirar a menor vazão deve-se ao fato do mesmo estar locado perto de uma elevação do substrato cristalino.

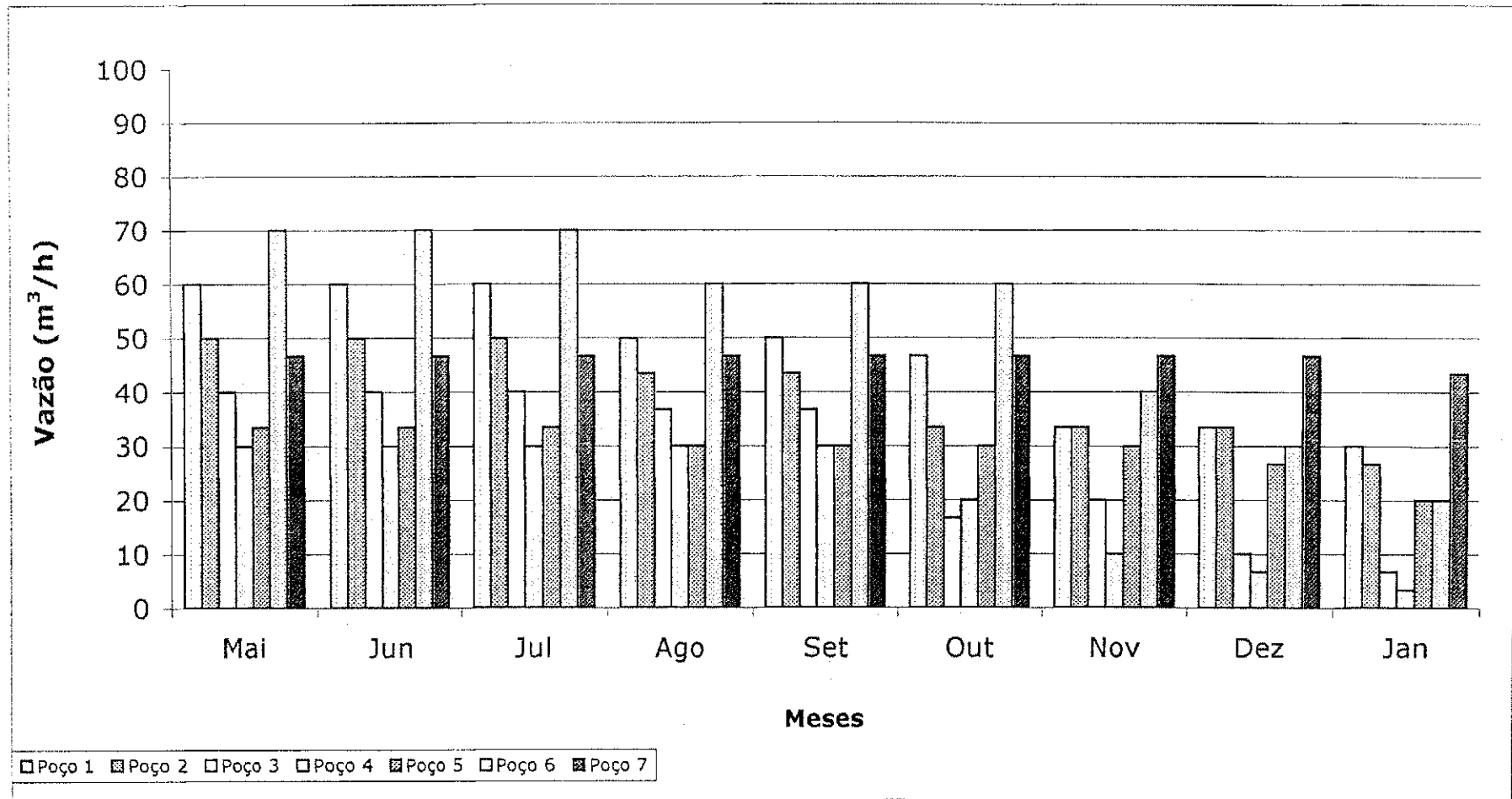


Figura 6.8 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível d’água inicial na cota do talvegue do rio, sem barragem subterrânea), cenário 04.

**6.5 – Cenário 05: Aquífero aluvial sem barragem em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio.**

Este cenário tem por objetivo verificar a eficiência da suspensão do bombeamento nos meses de maior uso consuntivo das plantas, como forma de propicia para o ano seguinte a possibilidade de irrigação em caso deste ser um ano de seca.

Foi verificada a possibilidade de obtenção de duas safras no primeiro ano, e em seguida, era efetuada a suspensão do bombeamento, e com isso espera-se possibilitar pelo menos uma safra no ano seguinte, sendo este um ano hidrológico de baixa pluviosidade.

Devido a este fato o período de simulação foi aumentado em três meses, similar ao cenário anterior.

A Tabela 6.5 mostra os resultados que foram obtidos após, não sem esforços, terem sido feitas inúmeras simulações, mudando os valores das vazões explotáveis em cada poço.

Tabela 6.5 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 05.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Mai	57	50	40	30	33	67	47
Jun	57	50	40	30	33	67	47
Jul	57	50	40	30	33	67	47
Ago	50	43	30	30	30	60	47
Set	50	43	27	30	30	60	47
Out	47	33	17	20	30	60	47
Nov	0	0	0	0	0	0	0
Dez	0	0	0	0	0	0	0
Jan	40	40	27	23	30	60	40
Fev	37	33	20	20	30	60	40
Mar	33	33	20	13	30	53	40
Meses			Volume(m <sup>3</sup> )	Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)	
Maio, junho, julho			87.300	2.170		40	
Agosto, setembro e outubro			74.700	2.580		29	
Janeiro, fevereiro e março			65.100	2.580		25	

Na Figura 6.9, observa-se perfeitamente a recuperação do nível d'água, logo em seguida da suspensão do bombeamento, mesmo se a existência de uma barragem subterrânea.

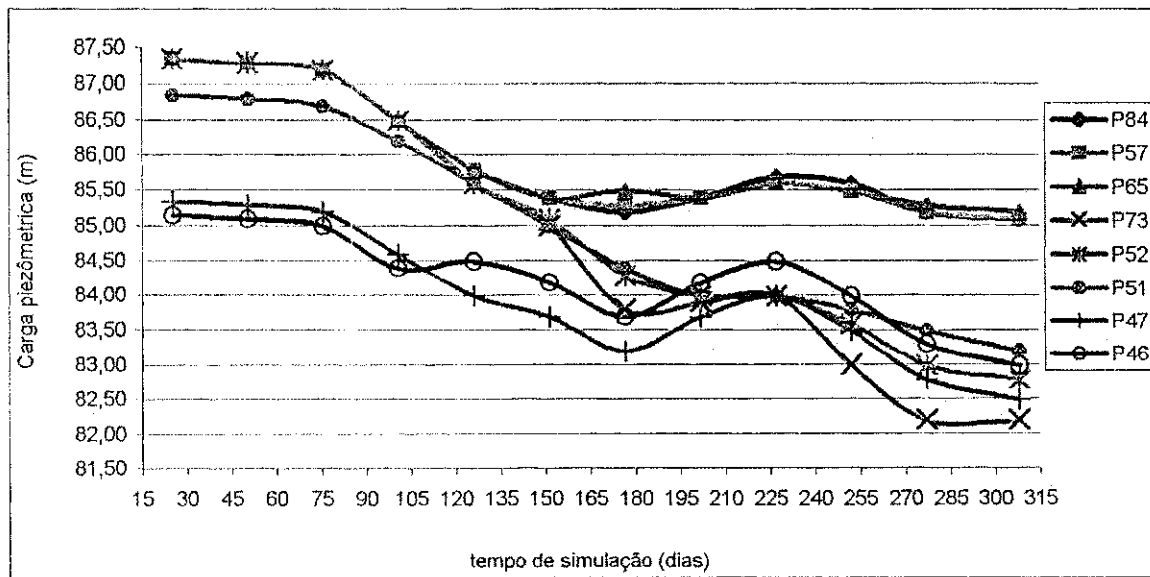


Figura 6.9 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 05.

Na Figura 6.10, observa-se às vazões retiradas em cada poço em cada mês, o vazio nos meses de novembro e dezembro deve-se ao fato de não ter sido simulado exploração nestes meses.

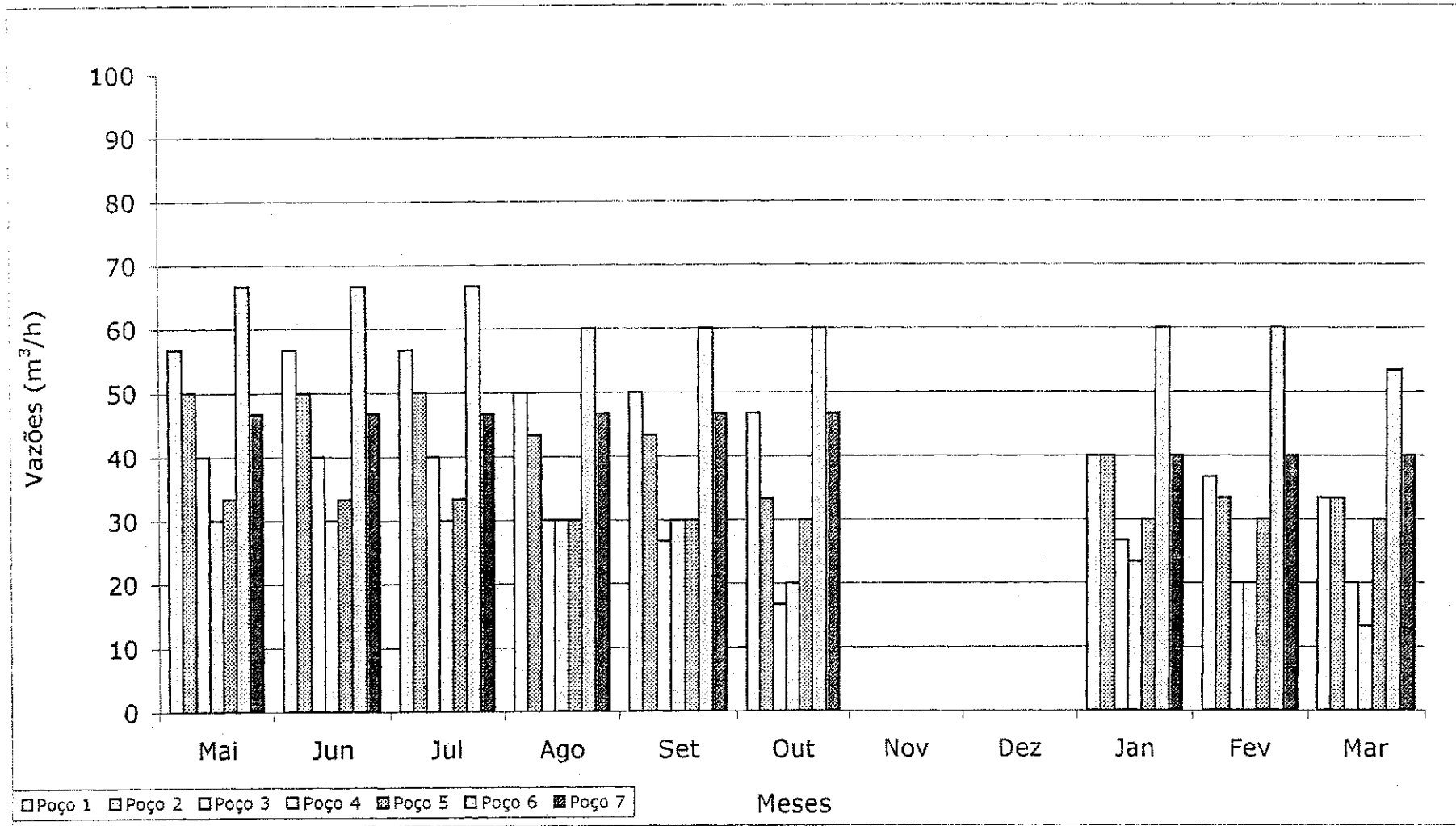


Figura 6.10 – Vazões Máximas explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível; d’água inicial na cota do talvegue, sem barragem subterrânea), cenário 05.

### 6.6 – Cenário 06: Aquífero aluvial com barragem em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio.

Similar à situação apresentada no cenário 04, com a diferença de que neste cenário mais uma vez é inserida uma barragem submersa e verificada sua influência, pois, como foi relatado anteriormente, seria mais racional a suspensão da irrigação nos meses de novembro e dezembro, e a inserção de uma barramento ajudaria a retardar o fluxo para jusante, possibilitando assim um maior volume passível de ser captado para irrigação.

Com esta situação foram feitas novamente inúmeras simulações mudando, como nos casos anteriores, os valores das vazões extraídas em cada poço. A Tabela 6.6 mostra qual a vazão à qual, após diversas simulações, cada poço foi submetido e em quais meses foi verificado isto, como ainda o volume obtido com o bombeamento e as áreas possíveis de serem atendidas.

Tabela 6.6 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 06.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Maio	60	50	40	30	43	77	47
Junho	60	50	40	30	43	77	47
Julho	60	50	40	30	43	77	47
Agosto	50	43	37	30	40	67	47
Setembro	50	43	37	30	40	67	47
Outubro	40	37	27	20	40	67	47
Novembro	33	33	20	10	30	50	47
Dezembro	33	33	10	7	27	30	47
Janeiro	30	27	7	3	20	20	43
Meses			Volume(m <sup>3</sup> )	Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)	
Maio, junho, julho			93.600	2.170		43	
Agosto, setembro e outubro			81.300	2.580		32	
Novembro, dezembro e janeiro			50.400	4.000		13	

Verifica-se então que nos três primeiros meses a área passível de ser irrigada subiu para 43 ha, uma vez que no cenário 04 a área foi de 41 ha, nos três meses seguintes a área subiu de 30 ha no cenário 04 para 32 ha neste cenário.

Como no cenário anterior a irrigação do terceiro período de meses também não é recomendada, embora neste cenário também tenha aumentado, o mais racional continua sendo, a suspensão da irrigação para aguardar o novo período chuvoso.

No entanto, verificou-se, que mesmo com a inserção da barragem submersa, uma terceira colheita com irrigação não será possível, pelo menos a que atenda o requisito de 20 ha como área mínima de ser reativada.

A Figura 6.11 mostra o rebaixamento apresentado nos piezômetros e a Figura 6.12 as vazões exploráveis em cada poço.

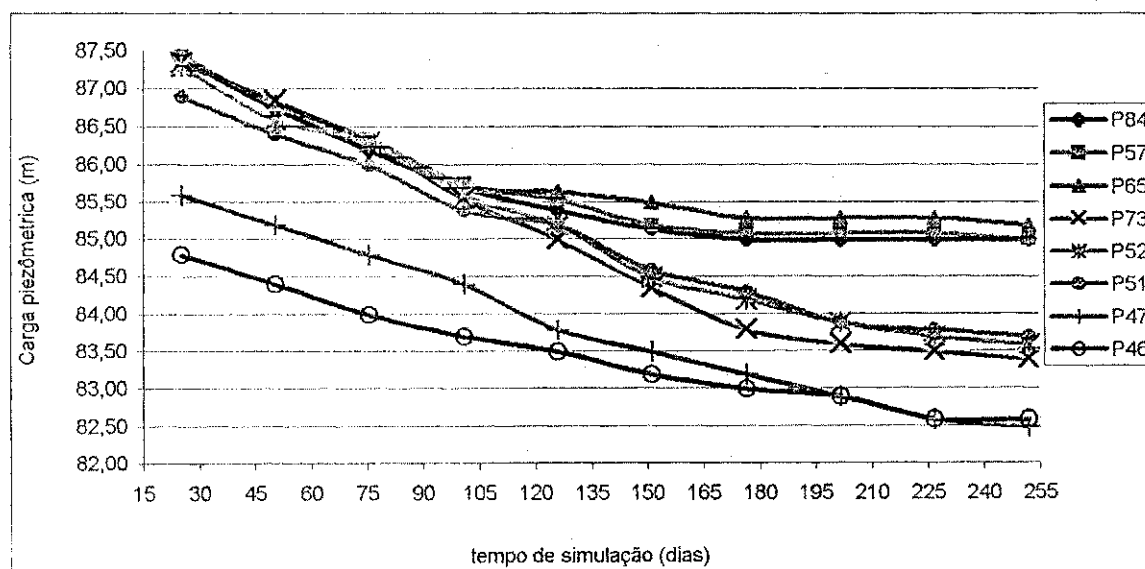


Figura 6.11 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 06.

A Figura 6.12 mostra os valores das vazões extraídas em cada poço, onde podemos observar que de todos os cenários, foi neste onde se conseguiu retirar de um poço a maior vazão que foi 77 m<sup>3</sup>/h, esta vazão foi locada no poço 06, que fica mais próximo, parte montante, da barragem, fazendo com que se possa comprovar mais ainda a eficácia do barramento artificial. Ainda semelhante ao notado nos outros cenários o poço 04, também foi o que mostrou menor vazão explorável, as razões possíveis para isto já foram discutidas no cenário anterior.



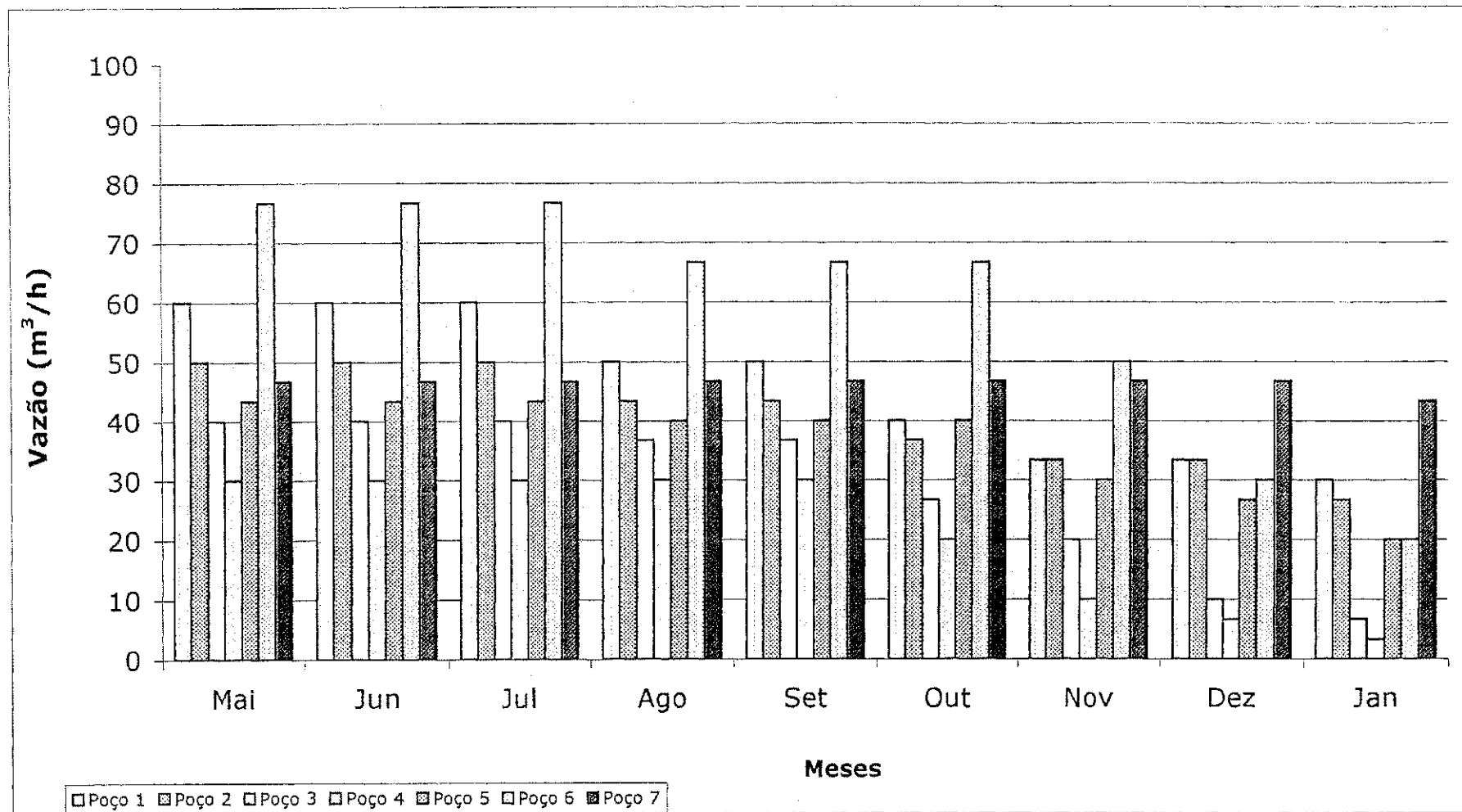


Figura 6.12 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (nível d’água inicial na cota do talvegue do rio e com barragem subterrânea), cenário 06.

### 6.7 – Cenário 07: Aquífero aluvial com barragem em um ano em que o nível d'água atingisse a cota do talvegue do rio, seguido de um ano de estio.

Similar a situação apresentada no cenário 05, este apresenta a diferença que mais uma vez é inserida a barragem submersa e analisada sua influência.

Este cenário tem por objetivo comprovar de uma forma definitiva que o manejo mais racional do aquífero seria, a suspensão do bombeamento nos meses de novembro e dezembro, como também a inserção de uma barragem subterrânea, na área já escolhida.

A Tabela 6.7 mostra qual a vazão à qual, após diversas simulações, cada poço foi submetido e em quais meses foi verificado isto, como ainda o volume obtido com o bombeamento e as áreas possíveis de serem atendidas.

Tabela 6.7 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 07.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Mai	53	43	37	27	43	70	47
jun	53	43	37	27	43	70	47
Jul	53	43	37	30	43	70	47
Ago	50	43	37	27	40	67	47
Set	43	37	30	27	37	67	43
Out	37	37	27	20	37	67	43
Nov	0	0	0	0	0	0	0
Dez	0	0	0	0	0	0	0
Jan	47	40	27	20	33	63	40
Fev	47	40	27	20	33	63	40
Mar	47	33	20	13	33	63	40
Meses			Volume (m <sup>3</sup> )	Demanda (m <sup>3</sup> /ha)	Área (ha)		
Maio, junho, julho			86.700	2.170	40		
Agosto, setembro e outubro			77.400	2.580	30		
Janeiro, fevereiro e março			71.100	2.580	28		

Na Figura 6.13, observa-se perfeitamente a recuperação do nível d'água, logo em seguida da suspensão do bombeamento, influenciado em parte pela presença da barragem subterrânea.

A influência da barragem fica bem evidente se compararmos as áreas passíveis de serem irrigadas. No Cenário 05, quando não tinha a presença de barragem subterrânea, a

área irrigável era de 40 ha nos três primeiros meses, 29 ha nos três meses seguintes e de 25 ha nos três primeiros meses do ano vindouro, esses valores passaram para 40, 30 e 28 ha, mostrando que não aconteceram mudanças somente nos três primeiros meses.

Este cenário, quando comparado com os demais similares a este, ou seja, com um ano hidrológico acima da média mostra de forma clara que o critério da suspensão da irrigação nos meses de maior uso consuntivo das plantas, é o mais racional, haja vista que nos cenários, onde, em condições hidrológicas iguais, o bombeamento não foi suspenso, estes não permitiram a reativação de 20 ha, que como já foi dito ser a área mínima, economicamente falando, que se deve reativar.

Contudo com a suspensão da irrigação e a inserção da barragem subterrânea foi possível irrigar 28 ha no ano seguinte, o que justifica a aplicabilidade da barragem subterrânea.

A Figura 6.13 mostra o rebaixamento apresentado nos piezômetros e a Figura 6.14 as vazões exploráveis em cada poço.

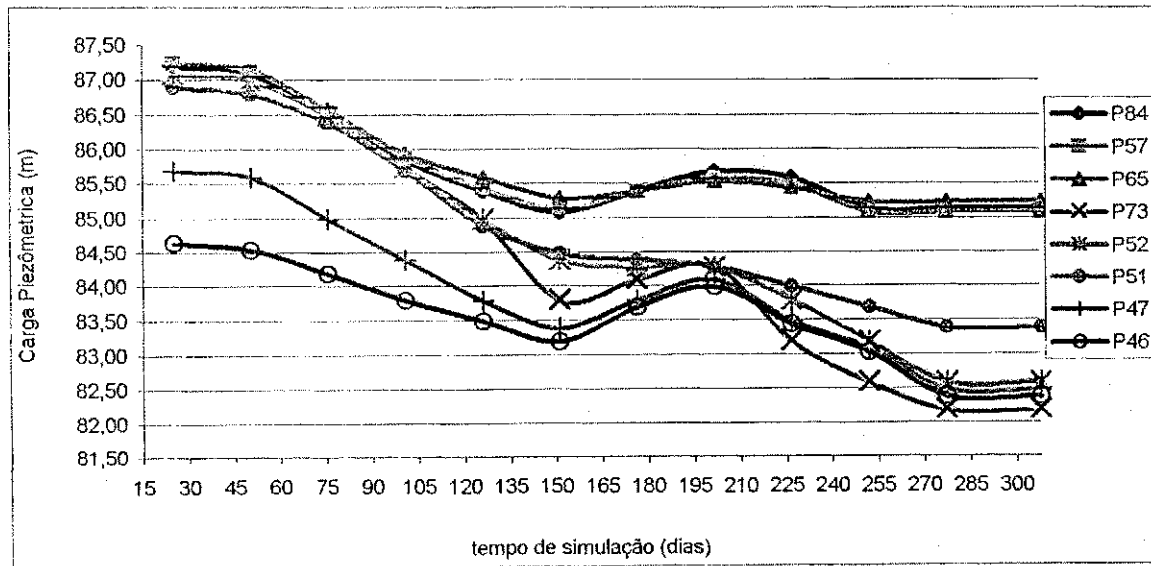


Figura 6.13 – Rebaixamento observado nos Piezômetros durante o período simulado, cenário 07.

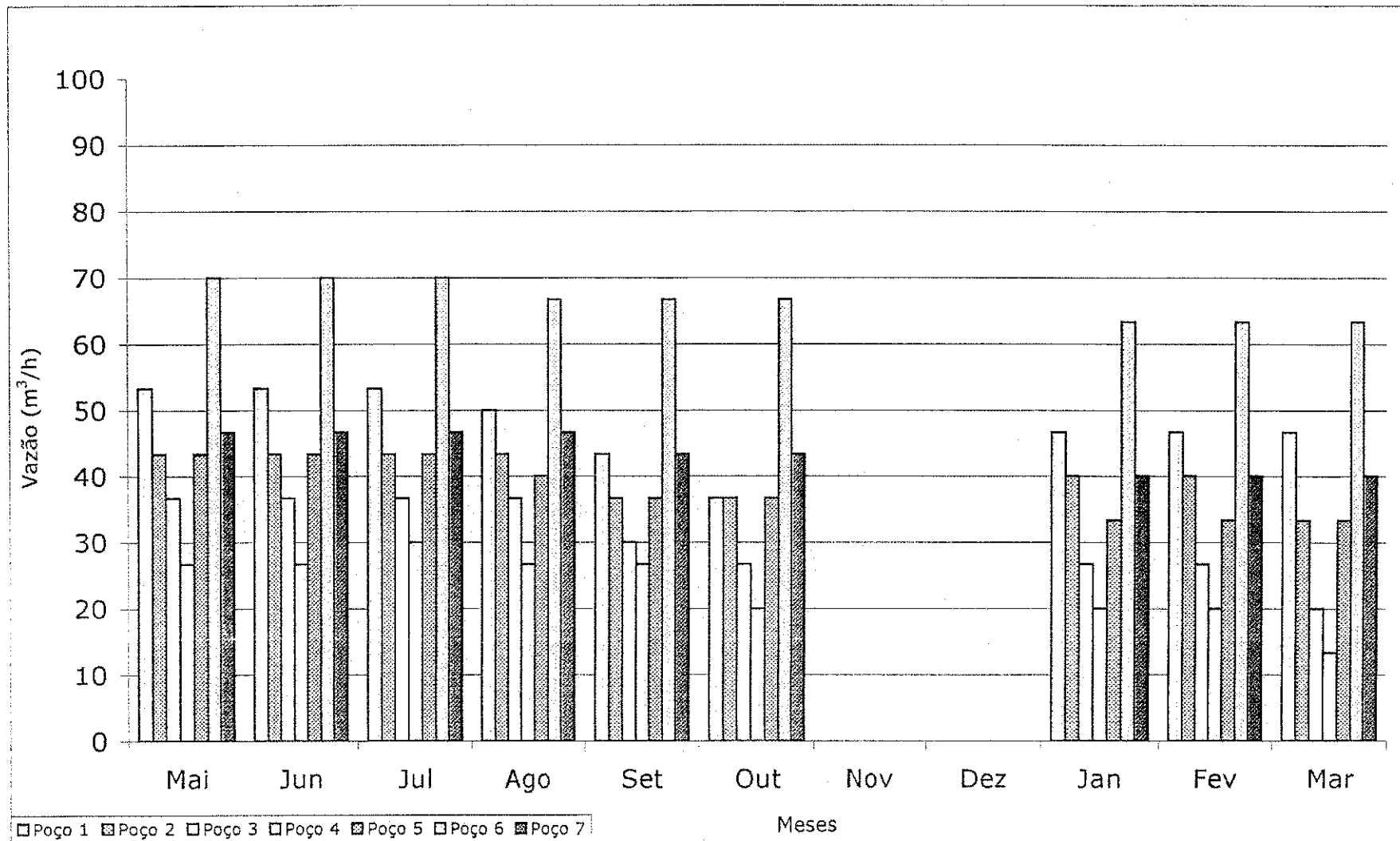


Figura 6.14 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Nível d’água inicial na cota do talvegue do rio e com barragem, seguido de um ano de estio), cenário 07.

### 6.8 – Cenário 08: Aquífero Aluvial após período hidrológico regular, seguido de um ano de estio sem barragem submersa.

Dentre os cenários simulados, este é o que apresenta uma situação mais desfavorável para o irrigante, similar ao cenário 03, com a diferença que neste a inserção do barramento artificial não foi feito.

Esta situação embora bastante desfavorável, é normalmente possível de ocorrer, seria uma situação onde após um ano hidrológico regular o irrigante exploraria o aquífero para obtenção de mais duas safras, e no ano seguinte seria um ano de estiagem ou de pluviometria abaixo da média. Tenta-se com esse cenário verificar a possibilidade de atendimento do número mínimo de hectare, adotando os critérios anteriormente citados, e apenas com irrigação com água proveniente do manancial subterrâneo.

A tabela 6.8 mostra as vazões máximas possíveis de serem retiradas em cada poço a cada mês, como ainda as áreas passíveis de serem atendidas.

Tabela 6.8 – Vazões retiradas em cada poço, em cada mês e áreas atendidas, cenário 08.

Meses	Poço 01/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 02/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 03/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 04/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 05/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 06/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)	Poço 07/ Vazões (m <sup>3</sup> /h)
Mai	30	27	23	20	30	40	30
jun	30	27	23	20	30	40	30
Jul	30	27	23	20	30	40	30
Ago	30	27	20	17	30	40	27
Set	30	27	20	17	30	40	27
Out	30	27	17	17	27	40	23
Nov	0	0	0	0	0	0	0
Dez	0	0	0	0	0	0	0
Jan	37	33	17	13	30	30	30
Fev	37	33	17	13	30	30	30
Mar	37	33	17	13	30	30	30
Meses		Volume(m <sup>3</sup> )		Demanda(m <sup>3</sup> /ha)		Área atendida(ha)	
Maio, junho, julho		54.000		2.170		25	
Agosto, setembro e outubro		50.400		2.580		20	
Janeiro, fevereiro e março		51.300		2.580		20	

Observa-se que para o atendimento do critério de 20 ha, foi necessário reduzir a área possível de ser irrigada no primeiro trimestre para 25 ha, contudo mesmo sem a inserção da barragem subterrânea esse critério foi atendido o que faz com que se conclua que para o atendimento dos critérios supracitados a inserção do barramento artificial não é

tão necessária, porém verifica-se que quando inserida uma barragem submersa a área passível de ser irrigada sempre foi maior.

A Figura 6.15 mostra a distribuição das vazões explotáveis em cada poço a cada mês, onde podemos observar que nos poços 01 e 02 aconteceu um aumento na vazão possível de ser retirada nos meses de janeiro a março em relação aos outros meses simulados, esse aumento deve-se a existência, a jusante destes poços, de uma elevação do substrato cristalino fazendo com que naturalmente ocorra um barramento, e com a suspensão da irrigação nos meses de novembro e dezembro, esse barramento possibilite uma recuperação do nível d'água favorecendo a uma maior captação nos meses subseqüentes.

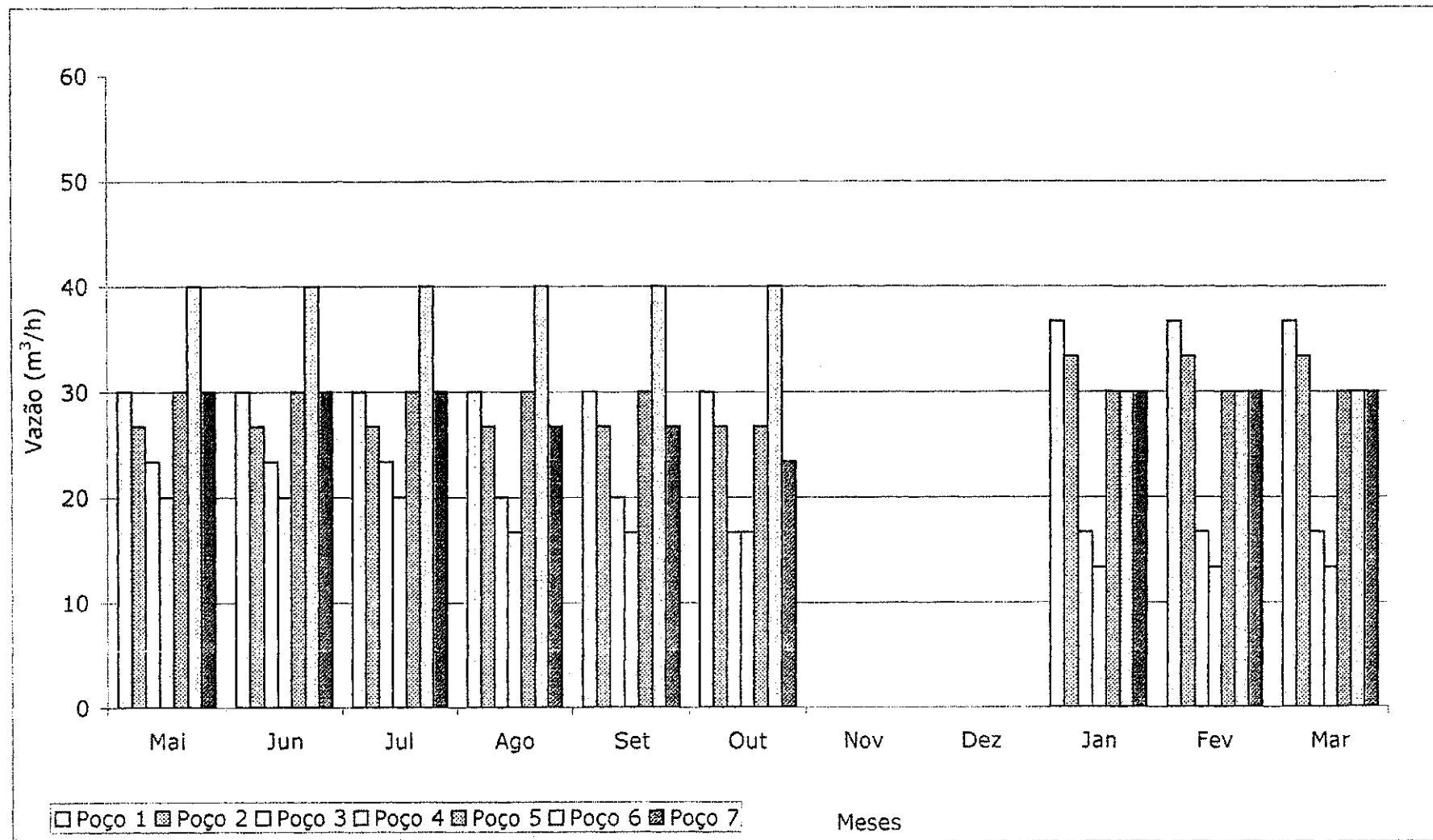


Figura 6.15 – Vazões Máximas Explotáveis em cada poço ao longo do tempo (Aqüífero Aluvial após período hidrológico regular, seguido de um ano de estio sem barragem submersa), cenário 08

### 6.9 – Síntese dos Resultados Obtidos com a Simulação da Exploração do Aquífero

Como já foi supracitado o objetivo do emprego do modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo, era definir alternativas para exploração do aquífero aluvial, que atendessem às demandas para irrigação e propiciasse ao órgão gestor do Perímetro Irrigado uma ferramenta de suporte a decisão, no tocante a reativação do referido Perímetro. Assim, inúmeras simulações foram feitas nos diversos cenários criados, nas quais se tentou cobrir um maior número de situações possíveis de ocorrer na prática. A Tabela 6.8 mostra um resumo de todos estes cenários, onde se pode verificar a situação na qual foi simulado e a área passível de ser atendida naquela situação.

Tabela 6.9 – Resumo dos resultados obtidos nos cenários simulados

<i>Cenários</i>	<i>Ano Hidrológico</i>	<i>Barragem</i>	<i>Meses Irrigados</i>	<i>Área Atendida (ha)</i>
01	Regular	Sem Barragem	Mai, Jun, Jul	33
			Ago, Set, Out	22
02	Regular	Com Barragem	Mai, Jun, Jul	36
			Ago, Set, Out	27
03	Regular seguido de Estio	Com Barragem	Mai, Jun, Jul	30
			Ago, Set, Out	20
			Jan, Fev, Mar	20
04	Acima da Média (aquífero recarregado até a cota do talvegue do rio)	Sem Barragem	Mai, Jun, Jul	41
			Ago, Set, Out	30
			Nov, Dez, Jan	12
05	Acima da Média (aquífero recarregado até a cota do talvegue do rio), seguido de Estio	Sem Barragem	Mai, Jun, Jul	40
			Ago, Set, Out	29
			Jan, Fev, Mar	25
06	Acima da Média (aquífero recarregado até a cota do talvegue do rio)	Com Barragem	Mai, Jun, Jul	43
			Ago, Set, Out	32
			Nov, Dez, Jan	13
07	Acima da Média (aquífero recarregado até a cota do talvegue do rio), seguido de Estio	Com Barragem	Mai, Jun, Jul	40
			Ago, Set, Out	30
			Jan, Fev, Mar	28
08	Regular seguido de Estio	Sem Barragem	Mai, Jun, Jul	25
			Ago, Set, Out	20
			Jan, Fev, Mar	20



## 7.0 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização do modelo PMWIN (“*Processing Modflow for Windows*”) ( CHIANG & KINZELBACH, 1996), na versão 5.0, mostrou ser uma ferramenta bastante eficaz, quando utilizada como técnica aplicada à gestão na tomada de decisão, conforme foi verificado no caso particular estudado.

A análise dos cenários simulados neste trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- i. Parte do perímetro pode ser reativada simplesmente com a perfuração de poços e uma exploração adequada e controlada do manancial subterrâneo;
- ii. Possibilidade de reativação de pelo menos 20 ha, isto quando verificada a pior das situações simuladas, que foi um ano regular seguido de um de seca, situação pior do que está, não faz sentido simular, uma vez que certamente o aquífero aluvial estaria seco;
- iii. A inserção de barragem submersa mostrou resultado significativo, observa-se isto, comparando os cenários em condições similares, onde a única diferença era a inserção ou não da barragem submersa. Nos cenários onde a barragem foi inserida sempre foi maior a área possível de ser irrigada. Isso mostra que se não fosse inserido um barramento, não seria possível irrigar uma área maior do perímetro; contudo para a implantação de uma barragem submersa deve-se ainda levar em conta a relação custo benefício, que não foi feita neste trabalho.
- iv. A área máxima possível de ser reativada é de 43 ha, isso aconteceria quando ocorresse um ano hidrológico acima da média, fazendo com que o aquífero se encontrasse recarregado até a cota do talvegue do rio.
- v. Não é recomendada a adoção de uma terceira safra, com irrigação, em virtude desta ser em um período de alto uso consuntivo das plantas, já que, a

evapotranspiração é muito alta nestes meses, e ainda são pequenas as áreas possíveis de serem reativadas, não atendendo assim, aos critérios estabelecidos anteriormente.

- vi. Como melhor forma de operação do aquífero, apresenta-se que: nos meses de novembro e dezembro independente do ano hidrológico a irrigação deverá ser suspensa e só retornar no ano seguinte, isso faria com que o aquífero recuperasse um pouco o seu nível freático e em caso do ano seguinte ser seco pelo menos uma safra seria garantida, como foi simulado neste trabalho.

Uma outra conclusão que pode ser tirada com a realização deste trabalho foi, que o modelo possui uma flexibilidade quanto à elaboração de outras alternativas de exploração, que poderão ser analisadas, adotando-se outros modelos de irrigação, de ciclos e eficiências diferenciadas, ao sabor do modelador.

A partir da experiência do presente estudo, sugere-se algumas recomendações para trabalhos subseqüentes.

Uma maior atenção no tocante aos levantamentos preliminares, uma vez que estes mostraram ser de suma importância, para a correta caracterização e calibração do modelo.

Modelar levando em conta, possíveis contaminações, advindas de esgotos e/ou lixos jogados na área.

Simular um período onde ocorresse recarga advinda das chuvas, e ainda quando ocorresse escoamento superficial.

Simular a inserção de sistema de barragens submersas sucessivas.

## 8.0 BIBLIOGRAFIA

- ALBUQUERQUE, J. do P. T.(1984). Os Recursos de Água Subterrânea do Trópico Semi-Árido do Estado da Paraíba. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.
- ALBUQUERQUE, J. do P.T. (1986) O Sistema Aquífero Aluvial no Semi-árido do Estado da Paraíba. IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Brasília – DF: Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. P. 273-274.
- ALBUQUERQUE, J do P. T.; RÉGO, J. C. ( 1997) O Potencial e as Disponibilidades de Água Subterrânea no Nordeste. XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande – PB.
- ATECEL (1999) Estudo de Aluviões em um Trecho do Rio Sucuru para Irrigação do Perímetro Sumé, Relatório Final v.n p.54 Campina Grande – PB.
- ATECEL (2000) Estudos para Avaliação da Potencialidade e Disponibilidade Hídrica Subterrânea do Perímetro Irrigado do Açude Público Custódia, Município de Custódia – PE, Relatório Final v.u p.47 Campina Grande – PB.
- ATECEL (2000) Estudos para Avaliação da Potencialidade e Disponibilidade Hídrica Subterrânea do Perímetro Irrigado do Açude Público Boa Vista, Município de Salgueiro – PE, Relatório Final v.u p.49 Campina Grande – PB.

- BEAR, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*, New York; McGraw-Hill. p. 19-141.
- CHIANG, W.H.; KINZELBACH, W. (1996). *Processing Modflow – A simulation system for modeling groundwater flow and pollution*. Washigton – DC: User's Manual, Scientific Software Group. 200p.
- CIRILO, J. A.; CABRAL, J. P. (1989) Modelos de Águas Subterrânea. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. Eds. Luis Carlos Wrobel et al. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH v1. p. 302-350.
- CLEARY, R. W. (1989) Águas Subterrâneas. In: Engenharia Hidrológica. Fábio Ramos, et al. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, cap. 5, v.2, p. 293-404. Editora da UFRJ, Rio de Janeiro.
- COSTA, W. D. (1986) O Aquífero Aluvial e sua exploração Racional. In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – ABAS , p. 467-478, São Paulo-SP.
- COSTA, W. D. (1987) Pesquisa Hidrogeológica Visando a Implantação de Barragens Subterrâneas em Aluviões. Recife – PE: I Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste. P. 13-23.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1976). *Hidrologia Subterrânea*. 1ª ed Barcelona – Espanha. Ediciones Omega S.A Tomo II.
- DAVIS, S.N. & DE WIEST, R.J.M. *Hydrogeology*. New York, NY. Jonh Wiley and Sons, 1966. 463p.
- DEMAESILY, F. G. *Groundwater and wells* 2nd edition, St. Paul, Minnesota, Johnson Division, 1986. p. 1089.
- BORGES, G. V. L.; ALBUQUERQUE, J. do P. T., RÊGO J. C., GOIS ,R. S. S. & VIEIRA, L. J. dos S. (2000), Avaliação da Disponibilidade Hídrica Subterrânea do Perímetro Irrigado do Açude Público Custódia, Município de Custódia – PE

HANTUSH, M.S. Hydraulics of wells. In: CHOW, V.T. ed “Advances in Hydroscience” New York, NY, Academic Press, 1964. Vol. 1, p281-432.

KINZELBACH, W. (1986) Groundwater Modelling An Introduction with Simple Programs in Basic – Developments in Water Science, v. 25, Amsterdam – Holland, 333p.

MEIER, W. (1987) Modelagem Numérica de Fluxo de Água Subterrânea pelo Método das Diferenças Finitas – Uma Introdução. In: I Curso de Métodos Avançados em Hidrologia Aplicada, Parte I, (apostila), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

MONTEIRO, N. B. (1997) Modelamento Bidimensional do fluxo do Aquífero Aluvial para uso de Pequenos Agricultores no Semi-Árido de Santa Luzia – PB Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

OLIVEIRA, P. R. S. (1992) Estudo Hidrogeológico de um Aquífero Aluvial com Barragens Submersas na Região de Santa Luzia – PB. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

PRICKETT , T. A. (1975) Modelling Techniques for Groundwater Evolution. In: Advances in hydroscience, Chow, V. Academic Press, Cap. 01, V. 10, P. 1-128, New York.

RABELO, J. L., (2000) Simulação de Fluxo Unidimensional em Aquíferos Aluviais com Barragens Submersas,. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

RÊGO, J. C., ALBUQUERQUE, J. do P. T., e VIEIRA, L. J. dos S.,(1999): Reativação de Perímetros de Irrigação através da exploração de aquíferos Aluviais – O Caso Sumé. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte – MG.

RÊGO, J. C., ALBUQUERQUE, J. do P. T., (1997): O Manejo Integrado dos Recursos Hídricos em Pequenas Bacias Hidrográficas do Nordeste Semi-Árido do Brasil. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória – ES.

REBOUÇAS, A.C.; GASPARY, J. (1971). As Águas Subterrâneas do Nordeste: Estimativas Preliminares. Recife – PE: 2ª ed SUDENE. Série Hidrogeológica, n.6.

SANTOS, N. C. F.; (1992) Estudo do Comportamento de Aquíferos Aluviais no Período Seco no Semi-Árido do Nordeste Brasileiro,. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

SANTOS, N. C. F.; RÊGO, J.C.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. (1991) Estudo do Comportamento de Aquíferos Aluviais no Período Seco no Semi-Árido do Nordeste Brasileiro. In: Anais do IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH, v.I, p. 244-253, Rio de Janeiro – RJ .

SANTOS, N. C. F.; RÊGO, J.C.; ALBUQUERQUE, J. do P. T. (1992) Análise das Alternativas de Exploração de um Aquífero Aluvial com Barragens Subterrâneas. In: VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – ABAS.

SCHEIDEGGER, A. E. (1961). Theoretical Geomorphology. Springer-Verlag. Berlin, Göttingen, Heidelberg. p. 2-4.

SCHUSTER, H. D. M.; VITORINO, F. S.; BISCHOFF, J. H. (1988). Combined Resistivity and Electromagnetic Investigations for Groundwater in the Precambrian Area of Semi-Arid Paraíba. In: Anais do V Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo – SP: ABAS. P. 279-280.

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. Southampton – UK: Ed. W. Blain. WITPress Computational Mechanics Publications. P. 479-488.

SCHUSTER, H. D. M.; MONTEIRO, N. B.; SRINIVASAN, V. S.; RABELO, J. L. (1999) Modelagem para Simulação do Fluxo de um Aquífero Aluvial com Barragens

Subterrâneas. Belo Horizonte – MG, XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos CD ROM.

WANG, H. F, ANDERSON, M. P.,(1982). Introduction to Groundwater Modelling, San Francisco; W. H. Freeman and Company. P. 19-112.

WROBEL, L. C. (1989) Introdução aos Métodos Numéricos. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Cap. 1. Vol 1, p. 2-83, Rio de Janeiro – RJ.

VITORINO, S. F. (1991). Estudos de Águas Subterrânea com Métodos Elétricos na região do Semi-Árido de Patos – PB . Belém – PA: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, PA.



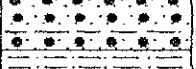
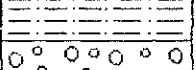
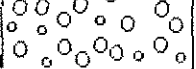
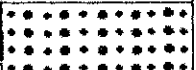


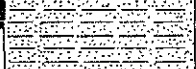
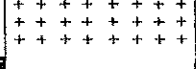
# **ANEXOS**



ANEXO 1  
Ficha de Registro de Sondagens

**REGISTRO DE SONDAGEM**

CLIENTE: DNOCS CONTRATO:	SEÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 20
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	COTA EM RELA- ÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1		1 - Areia fina a grossa, cor marron, quartzo-feldspático, pouco rolado.
	0,35		2 - Areia fina a grossa, cor marron escura, pouco argilosa, quartzosa, pouco rolada.
	2		3 - Argila de cor cinza esverdeada, algo arenosa, pouco plástica.
	1,20		4 - Cascalho de granulometria variada, grosso no topo e na base, fino à médio na parte mediana, onde se apresenta arenoso, com composição predominantemente quartzosa, sendo que, na parte superior, os seixos são também de feldspato e de fragmentos de rocha grosseira, grãos e seixos poucos rolados.
	3		5 - Areia média a grossa, cor marron, pouco argilosa na metade inferior da seção, quartzosa, pouco rolada.
	1,60		6 - Argila de cor cinza esverdeada, siltsosa, pouco plástica.
	N.A. 1,90		7 - Areia fina a grossa, cor marron escura, quartzosa, argilosa na base, pouco rolada.
	4		8 - Cristalino impermeável.
	3,10		
	5		
	5,15		
	6		
	5,70		
	7		
	6,45		
	8		

R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 1,90 m.	FIGURA Nº 20
COTAS:	ENG. RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1 : 50
INÍCIO: 22/12/96		DATA:
TÉRMINO: 22/12/96		
OBSERVAÇÃO:		



ASSOCIAÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA  
ERNESTO LUIZ DE OLIVEIRA JUNIOR

REGISTRO DE SONDAGEM

CLIENTE: DNOCS CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 36
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	COTA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	ESCALA	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1			1 - Silte de cor marron, argiloso com restos de raízes secas.
	0,30			2 - Areia fina a média, marron clara, grãos de quartzo e feldspato pouco rolados.
	0,60			3 - Areia fina a grossa, cor marron escura, cascalhenta fina, grãos de seixos de quartzo e feldspato pouco rolados.
	1,05			4 - Areia média a grossa, cor marron, cascalhenta fina, grãos e seixos pouco rolados de quartzo e feldspato.
	N. A. 1,70			5 - Cascalho médio, cor marron escuro, argiloso, seixos de quartzo e feldspato pouco rolados.
	2,70			6 - Rocha cristalina sã.
	2,80			
	6			

R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 1,70 m.	FIGURA Nº 36
COTAS:		
INICIO: 14/01/97	ENG. RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1 : 50
TERMINO: 15/01/97		DATA:
OBSERVAÇÃO:		

REGISTRO DE SONDAGEM

CLIENTE: CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 64
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	COTA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1		1 - Areia fina a média, marron escura, argilosa, grãos de quartzo e feldspato pouco rolados.
	0,65		
	2		2 - Areia média a grossa, marron escura, argilosa, grãos de quartzo e feldspato, pouco rolados.
	0,90		
	3		3 - Argila arenosa, cinza amarronzada, baixa plasticidade.
	1,60		
	4		4 - Areia fina, marron acinzentada, pouco argilosa, grãos de quartzo e feldspato pouco rolados.
	2,05		
	5		5 - Areia média a grossa, marron acinzentada, com pouca argila, algo cascalhenta, grãos e seixos de quartzo e feldspato, pouco rolados.
	N.A. 3,25m		
	3,40		6 - Areia grossa, marron clara, bem classificada, grãos predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	6		
	5,80		7 - Cascalho quartzoso, marron claro, de granulometria variando entre o fino e o grosso, esta mais abundante na parte basal da seção.
	7		
	7,00		8 - Areia média a grossa, marron clara, com grãos predominantemente de quartzo, mais grosseira na base da seção, pouco rolados.
	3		
	9,25		9 - Cascalho médio, grãos de quartzo e feldspato, pouco rolados.
	9,30		
	10		10 - Rocha cristalina sã, impermeável.

R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 3,25m.	FIGURA Nº 64
COTAS:		
INÍCIO: 18/02/97	ENC. RESTOS À VEL:	ESCALA: 1:100
TÉRMINO: 19/02/97		DATA:
OBSERVAÇÃO: Detalhamento.		

REGISTRO DE SONDAGEM

CLIENTE: CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 73
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

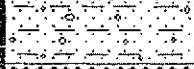


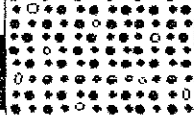
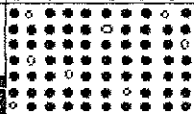
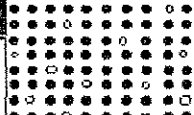
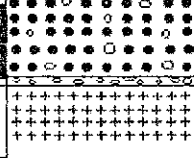
COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	COTA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1		1 - Areia média, marron clara, bem classificada, predominantemente quartzosa, pouco rolada.
	0,70		
	0,85		2 - Areia fina, marron clara, bem classificada, predominantemente quartzosa, pouco rolada.
	0,95		
	1,25		3 - Argila de cor marron escura, algo arenosa, baixa plasticidade.
	1,90		
	2,25		4 - Areia fina, marron clara, bem classificada, predominantemente quartzosa, pouco rolada.
	2,35		
	NA. 3,25		5 - Areia média a grossa, marron clara, algo cascalhenta, grãos e seixos finos predominantemente de Quartzo, pouco rolados.
	3,60		
	4,70		6 - Areia grossa, marron clara, algo cascalhenta, grãos e seixos finos predominantemente de Quartzo, pouco rolados.
	5,30		
	6,30		7 - Areia grossa, cor marron acinzentada, argilosa, algo cascalhenta, grãos e seixos finos, predominantemente de Quartzo, pouco rolados.
	6,35		
	6,35		8 - Argila de cor cinza esverdeada, pouco arenosa, baixa plasticidade.
	6,35		
	6,35		9 - Areia média a grossa, cor marron, pouco argilosa, grãos predominantemente de Quartzo, pouco rolados.
	6,35		
	6,35		10 - Cascalho fino, marron, arenoso, algo argiloso, seixos e grãos predominantemente de Quartzo, pouco rolados.
	6,35		
	6,35		11 - Areia fina, cor marron esverdeada escura, argilosa, bem classificada, pouco rolada.
	6,35		
	6,35		12 - Argila de cor cinza esverdeada escura, um pouco arenosa, baixa plasticidade.
	6,35		
	6,35		13 - Rocha cristalina sã, impermeável.

R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 3,25 m.	FIGURA Nº 73
COTAS:		
INÍCIO: 28/02/97	ENG. RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1:100
TÉRMINO: 01/03/97		DATA:

OBSERVAÇÃO: Detalhamento.

**REGISTRO DE SONDAGEM**




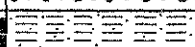

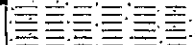



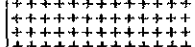
CLIENTE: CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 86
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R.N.	COTA EM RELA- ÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	ES- C- C	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1			1 - Areia fina, cor marrom pouco argilosa, pouco cascalhenta, grãos e seixos finos, de quartzo e feldspato pouco rolados.
	0,75			2 - Areia média, cor marrom clara, grãos predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	1,10			
	NA 1,55			
	3			3 - Areia fina, cor marrom, grãos predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	2,85			
	4			4 - Areia média a grossa, marrom clara, algo cascalhenta, grãos e seixos predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	5,10			
	5			5 - Areia grossa, de cor marrom clara, cascalhenta, grãos e seixos finos, predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	8,95			
	9,10			6 - Cascalho fino a médio, marrom claro, cascalhento, grãos e seixos finos, predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	7			7 - Rocha cristalina sã, impermeável.

R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 1,55 m.	FIGURA Nº 86
COTAS:		
INÍCIO: 13/03/97	ENG.º RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1/100
TERMINO: 13/03/97		DATA:
OBSERVAÇÃO:		

## REGISTRO DE SONDAGEM

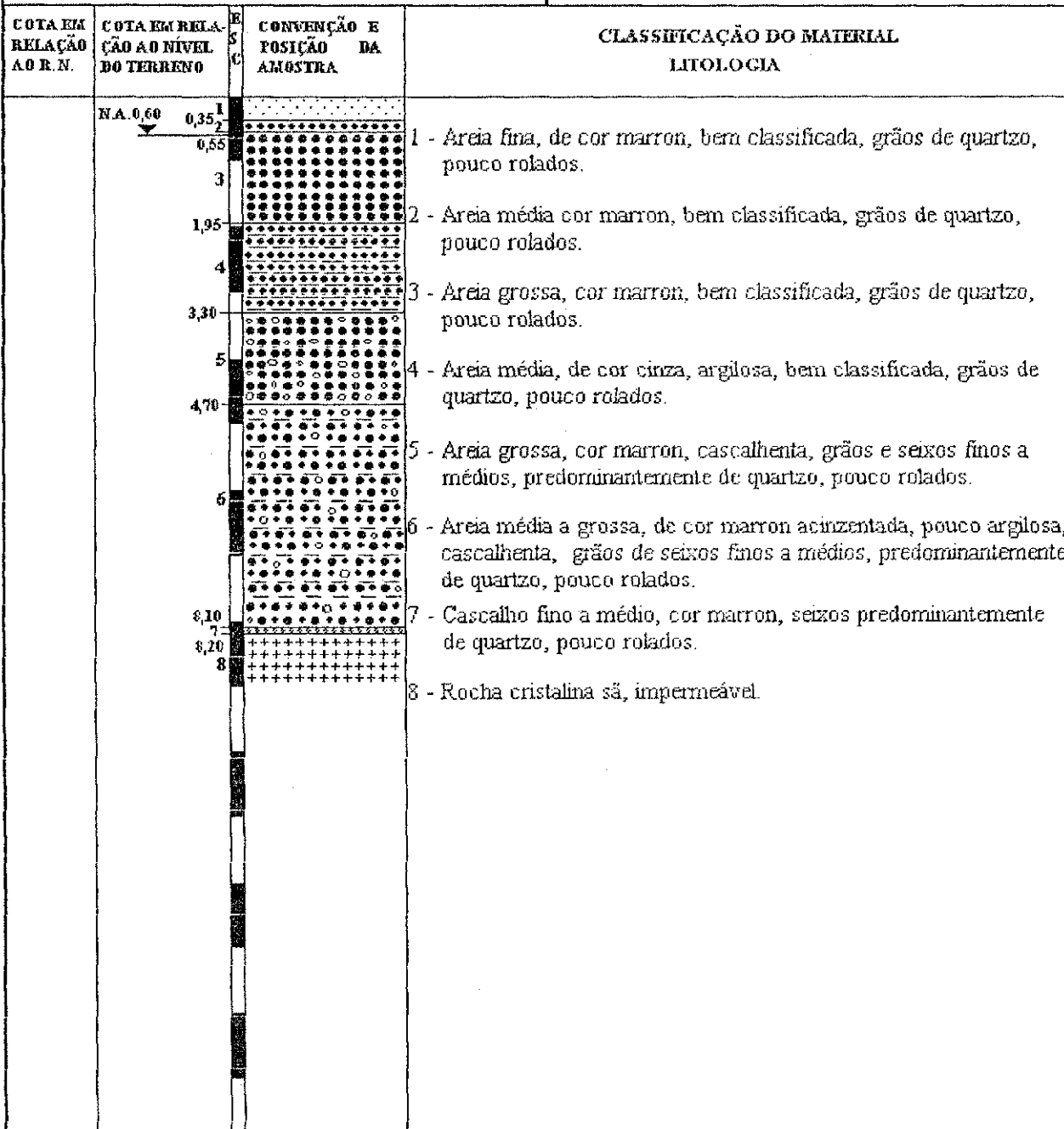
CLIENTE: CONTRATO:	SEÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 96
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R. N.	COTA EM RELA- ÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	E S C	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1			1 - Areia fina a média, marron escura, argilosa, restos de vegetais secos, grãos de quartzo e feldspato, pouco rolados.
	0,25			2 - Areia média a grossa, marron, cascalhenta, grãos e seixos finos predominantemente de quartzo, pouco rolados.
	2			3 - Argila de cor cinza escura, um pouco arenosa, pouco plástica.
	0,95			4 - Areia fina a grossa, cor marron acinzentada, cascalhenta, argilosa, grãos e seixos finos predominantemente de quartzo.
	N.A. 1,65			5 - Rocha cristalina sã, impermeável.
	3			
	2,55			
	4			
	2,60			
	5			

R. N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 0,40 m.	FIGURA Nº 96
COTAS:		
INÍCIO: 29/03/97	ENG.º RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1 : 50
TERMINO: 29/03/97		DATA:
OBSERVAÇÃO:		

REGISTRO DE SONDAGEM

CLIENTE: CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAGEM Nº 101
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMSTRADOR:



R.N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 0,60 m.	FIGURA Nº 101
COTAS:		
INÍCIO: 09/04/97	ENG. RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1:100
TERMINO: 10/04/97		DATA:
OBSERVAÇÃO:		



REGISTRO DE SONDAAGEM

CLIENTE: DNOCS CONTRATO:	SECÇÃO DE SONDAAGEM Nº
TRECHO ALUVIAL: RIO SUCURU	FURO DE SONDAAGEM Nº- 114
MUNICÍPIO: SUMÉ - PB.	REVESTIMENTO DO FURO:
	AMOSTRADOR:

COTA EM RELAÇÃO AO R. N.	COTA EM RELAÇÃO AO NÍVEL DO TERRENO	CONVENÇÃO E POSIÇÃO DA AMOSTRA	CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL LITOLOGIA
	1		1 - Areia fina, cor marrom, bem classificada, quartzosa.
	2,70		
	3,00		2 - Areia fina, cor marrom, bem classificada, composta de quartzo-feldspato, pouco rolada.
	3,30		
	3,30		3 - Areia média, cor marrom, um pouco argilosa, quartzosa, bem classificada, pouco rolada.
	3,60		
	3,90		4 - Areia média grossa, cor marrom escura, argilosa, algo cascalhenta, pouco rolada, composta de quartzo-feldspato.
	4,40		
	N.A. 5,10m		5 - Areia média, cor marrom, um pouco argilosa, quartzosa, bem classificada, pouco rolada.
	6,30		
	6,30		6 - Areia média grossa, cor marrom escura, argilosa, algo cascalhenta, pouco rolada, composta de quartzo-feldspato.
	7,90		
	8,50		7 - Areia fina, cor marrom escura, muito argilosa, bem classificada, pouco rolada, quartzosa.
	8,50		8 - Areia média a grossa, cor marrom, pouco argilosa, cascalhenta, grãos e seixos finos de quartzo, pouco rolados.
			9 - Areia média, cor marrom clara, bem classificada, quartzosa, pouco rolada.
			10 - Argila de cor cinza esverdeada, um pouco arenosa, pouco plástica.
			11 - Cristalino são.

R. N.:	NÍVEL D'ÁGUA: 5,10 m.	FIGURA Nº
COTAS:		
INÍCIO: 22/12/97	ENG.º RESPONSÁVEL:	ESCALA: 1:100
TERMINO: 23/12/97		DATA:
OBSERVAÇÃO:		

## ANEXO 2

# Teste de Bombeamento

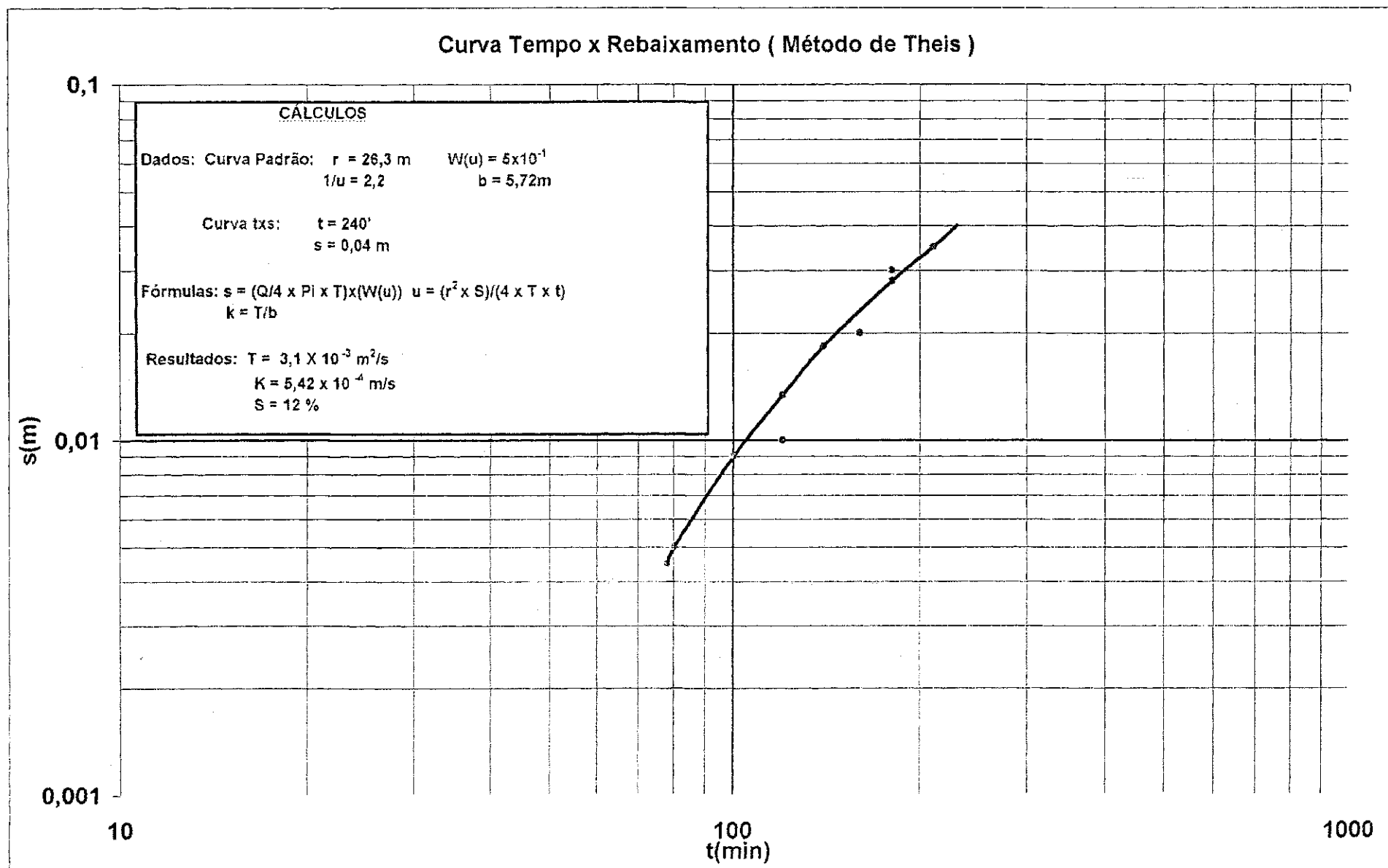
### Teste de Aquífero

Poço 02 - Área 02 Nome: Caçulinha  
 Localização: Perímetro Irrigado de Sumé - PB  
 Data: 22/07/98

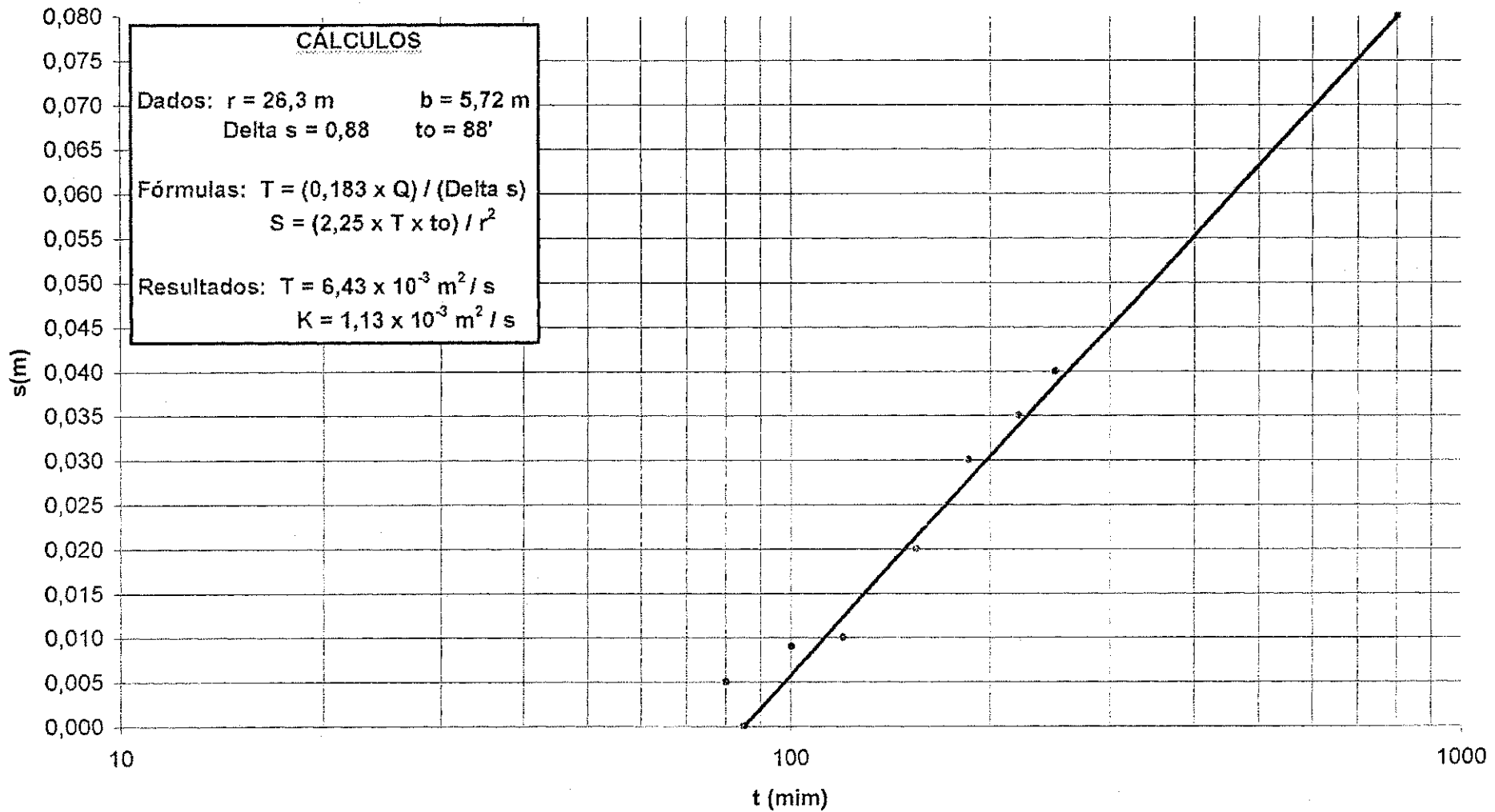
#### Dados Tempo x Rebaixamento

Hora	t(mim)	s(m)
09:56	0	0,000
	1	0,000
	2	0,000
	3	0,000
	4	0,000
	5	0,000
	10	0,000
	15	0,000
	20	0,000
	28	0,000
	31	0,005
	36	0,005
	40	0,005
	52	0,005
	65	0,005
	80	0,005
	100	0,009
	120	0,010
	150	0,020
	180	0,030
	210	0,035
13:56	240	0,040

Vazão do Teste (Q)  $3,11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$   
 Início do Teste 09:56 horas  
 Término 13:56 horas  
 Duração 04:00 horas  
 Piezômetro S65  
 Distância (r) 26,30 m  
 Nível Estático 5,08 m



### Curva Tempo x Rebaixamento ( Método de Jacob )



ANEXO 3  
Evolução Temporal do Nível d'água nos  
Piezômetros

