



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CAMPUS II - CAMPINA GRANDE**

**MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE POÇOS, COM REDE  
ATÍPICA E FATORES DE AJUSTE, PARA UM MELHOR  
ENTENDIMENTO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**

**SILVESTRE LOPES DA NOBREGA**

**CAMPINA GRANDE**

**MAIO/2000**

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

**Título:**

**MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE POÇOS, COM REDE  
ATÍPICA E FATORES DE AJUSTES, PARA UM MELHOR  
ENTENDIMENTO DOS PARÂMETROS ENVOLVIDOS**

**SILVESTRE LOPES DA NOBREGA  
ORIENTANDO**

**SEEMANAPALLI VENKATA KAMESWARA SARMA  
ORIENTADOR**

**MAIO / 2000**

**SILVESTRE LOPES DA NOBREGA**

**MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DE POÇOS, COM REDE ATÍPICA E  
FATORES DE AJUSTES, PARA UM MELHOR ENTENDIMENTO DOS  
PARÂMETROS ENVOLVIDOS.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento as exigências para obtenção do grau de mestre em Ciências.

Orientador:

**Prof. Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma - Ph.D.**

**(DEC – CCT – UFPB)**

**CAMPINA GRANDE, PARAÍBA**

**MAIO DE 2000**



N954m Nóbrega, Silvestre Lopes da.  
Modelação computacional de poços, com rede atípica e fatores de ajustes, para um melhor entendimento dos parâmetros envolvidos / Silvestre Lopes da Nóbrega. - Campina Grande, 2000.  
59 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2000.  
"Orientação : Prof. Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma".  
Referências.

1. Poços - Modelação Computacional. 2. Redes Atípicas. 3. Fatores de Ajustes. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Sarma, Seemanapalli Venkata Kameswara. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 628.112:004(043)

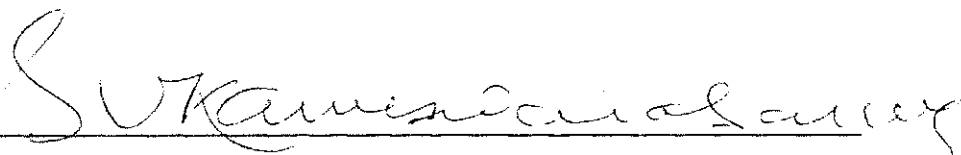
Dissertação de Mestrado aprovada em 04 / 05 / 2000

**Modelação Computacional de Poços, com Rede Atípica e Fatores de Ajustes, para um  
Melhor Entendimento dos Parâmetros Envolvidos**

Silvestre Lopes da Nobrega


**AUTOR**

**COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:**



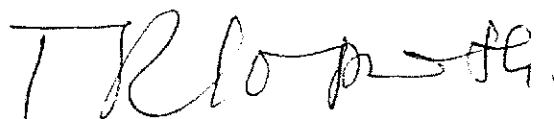
**Professor Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma - Ph.D.**

**ORIENTADOR**



**Professor Dr. Hans Dieter Max Schuster – Dr. Ing**

**EXAMINADOR**



**Professor Dr. Tumkur Rajarao Gopinath – Ph.D.**

**EXAMINADOR**

**Campina Grande, Paraíba**

**maio de 2000**

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Seemanapalli Venkata Kameswara Sarma - Ph.D, pelas orientações, sugestões, materiais fornecidos sempre solidário para o desenvolvimento desta dissertação, ressaltando também a boa convivência desde os projetos de iniciação científica e que até hoje é preservada.

A todos os professores da Área de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da UFPB, Campus - II, pelo apoio e os conhecimentos até então adquiridos em todo o curso de mestrado.

A todos os alunos de graduação e pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos, bem como aos funcionários pelo espírito de solidariedade e sempre dispostos a facilitar nosso trabalho. Em especial agradeço aos amigos Ricardo, Eunice, Betânea, Jorge e José Gomes pela união e exemplo de companheirismo do grupo.

Faço também um agradecimento muito especial ao também amigo Alex Neyves Mariano Alves, pelo fundamental apoio no aperfeiçoamento dos modelos, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

Enfim, ao CNPq e a Área de Recursos Hídricos, pelo importante incentivo e apoio à pesquisa no país, aos meus familiares e sobretudo a Deus, por permanecerem sempre presentes em todos os momentos da minha vida.

## DEDICATÓRIA

Aos Meus **PAIS**, Seu Jonas e Dona Neuma;

A Minha **ESPOSA**, Nina;

Ao **FILHO**, Silvestre;

Aos **IRMÃOS**, João, Francisca e Ana.

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>AGRADECIMENTO</b> .....                            | <b>III</b>  |
| <b>DEDICATÓRIA</b> .....                              | <b>IV</b>   |
| <b>SUMÁRIO</b> .....                                  | <b>V</b>    |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                         | <b>VIII</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                         | <b>XI</b>   |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....                        | <b>XIII</b> |
| <b>RESUMO</b> .....                                   | <b>XV</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                 | <b>XVII</b> |
| <b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b> .....                  | <b>1</b>    |
| <b>CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>            |             |
| 2.1 - HISTÓRICO .....                                 | 3           |
| 2.2 - TIPOS DE AQUÍFEROS .....                        | 4           |
| 2.3 - PARÂMETROS QUE DEFINEM O MEIO POROSO .....      | 5           |
| 2.4 - TEORIAS FUNDAMENTAIS DO FLUXO SUBTERRÂNEO ..... | 6           |
| 2.4.1 - <i>Aquífero Confinado</i> .....               | 7           |
| 2.4.2 - <i>Aquífero Livre</i> .....                   | 8           |



|   |    |
|---|----|
| 2.5 - TEORIAS DE FLUXO RADIAL .....                 | 9  |
| 2.5.1 - Fluxo radial em um aquífero confinado ..... | 9  |
| 2.5.2 - Fluxo radial em um aquífero livre .....     | 11 |

### **CAPÍTULO III - LOCAL DE ESTUDO**

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 3.1 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA ..... | 14 |
| 3.2 - ALUVIÃO ESTUDADO .....     | 15 |

### **CAPÍTULO IV - HIDRÁULICA DE POÇOS**

|  |    |
|--|----|
| 4.1 - TIPOS DE POÇOS .....   | 16 |
| 4.2 - EFICIÊNCIA HIDRÁULICA .....  | 17 |
| 4.3 - EFEITO DA REDUÇÃO DE ESPESSURA SATURADA NO AQUIFERO LIVRE SOBRE O CONE DE REBAIXAMENTO ..... | 19 |
| 4.4 - FATORES DE AJUSTE F1, F2 E F .....   | 21 |

### **CAPÍTULO V - DADOS DA PESQUISA**

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 5.1 - ORIGEM DOS DADOS .....  | 23 |
| 5.2 - TESTE DE AQUIFERO ..... | 24 |

### **CAPÍTULO VI - MODELO MATEMÁTICO E PROGRAMAS UTILIZADOS**

|   |    |
|---|----|
| 6.1 - INTRODUÇÃO .....  | 28 |
| 6.2 - EQUAÇÃO DE FLUXO DOS POÇOS NO EIXO CARTESIANO (X,Y) .....                 | 29 |
| 6.3 - DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA NO MODELO PARA SIMULAÇÃO DO POÇO TUBULAR RASO ..... | 29 |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.4 - DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA NO MODELO PARA SIMULAÇÃO DO POÇO AMAZONAS ..... | 31        |
| 6.5 - PROCESSO DE CALIBRAÇÃO .....  | 33        |
| <b>CAPÍTULO VII - ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                   |           |
| 7.1 - CALIBRAGEM DO MODELO USANDO POÇO TUBULAR RASO .....                   | 37        |
| 7.2 - CALIBRAGEM DO MODELO USANDO POÇO AMAZONAS .....                       | 38        |
| 7.3 - SIMULAÇÕES REALIZADAS USANDO O MODELO PARA POÇO TUBULAR .....         | 40        |
| 7.3.1 - <i>Mudança nos Fatores de Ajustes</i> .....                         | 40        |
| 7.3.2 - <i>Mudança na Vazão de Bombeamento</i> .....                        | 42        |
| 7.4 - SIMULAÇÕES REALIZADAS USANDO O MODELO PARA POÇO AMAZONAS .....        | 46        |
| 7.4.1 - <i>Mudança no Fator de Ajuste</i> .....                             | 46        |
| 7.4.2 - <i>Mudança na Vazão de Bombeamento</i> .....                        | 47        |
| 7.4.3 - <i>Mudança no Diâmetro do Poço</i> .....                            | 50        |
| <b>CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                           |           |
| 8.1 - CONCLUSÕES .....  | 53        |
| 8.2 - RECOMENDAÇÕES .....   | 55        |
| <b>CAPÍTULO IX - BIBLIOGRAFIA .....</b>                                     | <b>56</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>59</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 2.1 – REPRESENTAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA NOS MEIOS HOMOGÊNEOS, HETEROGÊNEOS, ISOTROPICO E ANISOTROPICO (FONTE: ADAPTADO DE MORESE, 1998).....  | 6  |
| FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO DA APROXIMAÇÃO DE DUPUIT (FONTE: ADAPTADO DE BEAR, 1990).....  | 8  |
| FIGURA 2.3 - POÇO CAPTANDO UM AQUÍFERO CONFINADO NO CENTRO DE UMA ILHA CIRCULAR. (FONTE: ADAPTADO DE CUSTODIO & LLAMAS, 1983).....  | 9  |
| FIGURA 2.4 – POÇO BOMBEADO NUM AQUÍFERO LIVRE, MOSTRANDO O EFEITO DA REDUÇÃO NA ESPESSURA SATURADA. (FONTE: FILHO, JOÃO M. E FEITOSA, FERNANDO A., 1997).....   | 12 |
| FIGURA 2.5 - POÇO NO CENTRO DE UMA ILHA CIRCULAR EM UM AQUÍFERO LIVRE ILUSTRANDO AS CONDIÇÕES PARA O REGIME PERMANENTE. (FONTE: ADAPTADO DE CUSTODIO & LLAMAS, 1983).....   | 12 |
| FIGURA 3.1 – MAPA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DA PARAÍBA (FONTE: LMRS -PB).....  | 14 |
| FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE JERICÓ (FONTE: LMRS-PB).....   | 15 |
| FIGURA 4.1 – COMPARAÇÃO DO REBAIXAMENTO TEÓRICO COM O REAL, ATRAVÉS DO PROLONGAMENTO DA RETA DO DIAGRAMA DAS DISTÂNCIAS REBAIXAMENTO ATÉ A ABSCISSA CORRESPONDENTE AO RAIO DO POÇO SOMADO AO TAMANHO DA ZONA DE TRANSIÇÃO (FONTE: EXEMPLO, CETESB, 1978)..... | 17 |
| FIGURA 4.2 - DECOMPOSIÇÃO DO REBAIXAMENTO TOTAL $s_r$ EM REBAIXAMENTO DE FORMAÇÃO $S_f$ E REBAIXAMENTO DO POÇO $S_p$ .....  | 18 |
| FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DA MUDANÇA NA TRANSMISSIVIDADE $T$ DENTRO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO POÇO TUBULAR RASO. ....  | 21 |
| FIGURA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO DA MUDANÇA NA TRANSMISSIVIDADE $T$ DENTRO DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO POÇO AMAZONAS. ....  | 22 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 5.1 – FICHA DE LOCAÇÃO.....   | 25 |
| FIGURA 6.1 - DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA PARA SIMULAÇÃO DO POÇO TUBULAR RASO – MALHA (62 X 64).....  | 30 |
| FIGURA 6.2 - PARTE CENTRAL DA MALHA ( 62 X 64 ), MOSTRANDO O CONTORNO DO POÇO TUBULAR RASO SIMULADO – $DX = DY = 0,15$ M. ....   | 31 |
| FIGURA 6.3 - DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA PARA SIMULAÇÃO DO POÇO AMAZONAS - MALHA (63 X 65). ....   | 32 |
| FIGURA 6.4 - PARTE CENTRAL DA MALHA ( 63 X 65 ), MOSTRANDO O CONTORNO DO POÇO AMAZONAS SIMULADO – $DX = DY = 0,25$ M. ....   | 33 |
| FIGURA 6.5 – OBSERVAÇÃO DA VARIAÇÃO DO RAIO DE INFLUÊNCIA ( $r_i$ ), USANDO DUPUIT, EM FUNÇÃO DA PERMEABILIDADE DO MEIO ( $K$ ) E CONSIDERANDO AS DIFERENTES CARGAS OBSERVADAS. .... | 34 |
| FIGURA 7.1 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO $F_2 = 1$ (FATOR DE AJUSTE DO POÇO) E FAZENDO VARIAR $F_1$ (FATOR DE AJUSTE DA ESPESSURA SATURADA)...                            | 41 |
| FIGURA 7.2 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO $F_1 = 1$ (FATOR DE AJUSTE DA ESPESSURA SATURADA) E FAZENDO VARIAR $F_2$ (FATOR DE AJUSTE DO POÇO)...                            | 42 |
| FIGURA 7.3 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO VAZÕES DE BOMBEAMENTO DIFERENTE DA EXPLORADA.....  | 43 |
| FIGURA 7.4A - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POÇO TUBULAR RASO PARA VALORES DIFERENTES NA VAZÃO DE BOMBEAMENTO.....   | 45 |
| FIGURA 7.4B - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA AQUÍFERO-POÇO TUBULAR PARA VALORES DIFERENTES NA VAZÃO DE BOMBEAMENTO. ....  | 45 |
| FIGURA 7.5 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES FAZENDO VARIAR $F$ (FATOR DE AJUSTE DO POÇO AMAZONAS). ....   | 47 |
| FIGURA 7.6 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO VAZÕES DE BOMBEAMENTO DIFERENTE DA EXPLORADA.....  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 7.7 - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POÇO AMAZONAS PARA VALORES DIFERENTES NA<br>VAZÃO DE BOMBAMENTO. .... | 49 |
| FIGURA 7.8 – VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO POÇO AMAZONAS EM RESPOSTA VARIAÇÃO DO SEU<br>DIÂMETRO. ....           | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 5.1 – SONDAGENS PARA RECONHECIMENTO E DETALHAMENTO DO AQUÍFERO.....                           | 24 |
| TABELA 5.2 – RESULTADOS GERAIS OBTIDOS NOS TESTES DE AQUÍFERO.....                                   | 26 |
| TABELA 7.1 – COMPARAÇÃO ENTRE OS REBAIXAMENTOS DE CAMPO E CALIBRADOS<br>(EM METROS).....             | 37 |
| TABELA 7.2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS REBAIXAMENTOS DE CAMPO E CALIBRADOS<br>(EM METROS).....             | 39 |
| TABELA 7.3A – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO $F2 = 1$ E ALTERANDO O VALOR<br>DE $F1$ .....   | 40 |
| TABELA 7.3B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CONSIDERANDO $F1 = 1$ E ALTERANDO O VALOR<br>DE $F2$ .....   | 40 |
| TABELA 7.4 – REBAIXAMENTO OBSERVADO NO POÇO COM APLICAÇÕES DIFERENTES DE<br>VAZÕES.....              | 42 |
| TABELA 7.5A – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO POÇO DEVIDO A MUDANÇA NA VAZÃO DE<br>BOMBEAMENTO.....         | 44 |
| TABELA 7.5B – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA-POÇO DEVIDO A MUDANÇA NA VAZÃO DE<br>BOMBEAMENTO..... | 44 |
| TABELA 7.6 – REBAIXAMENTO OBSERVADO NO POÇO COM DIFERENTES DO FATOR DE AJUSTE $F$ .<br>.....         | 46 |
| TABELA 7.7 – REBAIXAMENTO OBSERVADO NO POÇO COM APLICAÇÕES DIFERENTES DE<br>VAZÕES.....              | 47 |
| TABELA 7.8 – CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO POÇO AMAZONAS DEVIDO A MUDANÇA NA VAZÃO<br>DE BOMBEAMENTO..... | 48 |
| TABELA 7.9 – VALORES CORRIGIDOS DE $F$ PARA CADA DIÂMETRO SIMULADO.....                              | 51 |

TABELA 7.10 - REBAIXAMENTO OBSERVADO COM APLICAÇÕES DE DIFERENTES DIÂMETROS DO POÇO..... 51

TABELA 7.11 – COMPORTAMENTO DA EFICIÊNCIA DO POÇO AMAZONAS COM RELAÇÃO A VARIAÇÃO DO SEU DIÂMETRO..... 52

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                 |                                     |   |
|---------------------------------|-------------------------------------|---|
| A                               | (m <sup>2</sup> )                   | Área da seção vertical  |
| b                               | (m)                                 | Distância do datum até o embasamento cristalino   |
| D <sub>x</sub> , D <sub>y</sub> | (m)                                 | Distâncias na malha nas direções x e y  |
| E                               | (%)                                 | Eficiência  |
| f, f1 e f2                      | -                                   | Fatores de ajustes  |
| g                               | (m/s)                               | Aceleração da gravidade   |
| H'                              | (m)                                 | Superfície de ressurgência  |
| h                               | (m)                                 | Carga hidráulica  |
| h <sub>0</sub>                  | (m)                                 | Carga hidráulica inicial  |
| h <sub>p</sub>                  | (m)                                 | Carga hidráulica no poço  |
| i                               | -                                   | Gradiente hidráulico  |
| K                               | (m/s)                               | Permeabilidade ou Condutividade hidráulica (dependendo se meio poroso esta ou não saturado)             |
| <b>K</b>                        | (m/s)                               | Tensor simétrico de condutividade hidráulica  |
| k                               | -                                   | Permeabilidade intrínseca   |
| n <sub>s</sub>                  | (m)                                 | Nível estático  |
| n <sub>D</sub>                  | (m)                                 | Nível dinâmico  |
| q <sub>i</sub>                  | (m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> ) | Vazão específica  |
| Q                               | (m <sup>3</sup> /s)                 | Vazão de Extração   |
| R                               | (m)                                 | Raio de influência  |
| R                               | -                                   | Fator de relaxação  |
| R <sub>p</sub>                  | (m)                                 | Raio do poço bombeado   |
| R(x,y)                          | -                                   | Volume de água adicionado ou retirado do aquífero, por unidade de tempo por unidade de área do aquífero |



|            |                                       |  |
|------------|---------------------------------------|--|
| S          | (m)                                   | Coeficiente de armazenamento               |
| $S_t$      | (m)                                   | Rebaixamento total no poço                 |
| $s_f$      | (m)                                   | Rebaixamento devido a Formação do Aquífero |
| $s_p$      | (m)                                   | Rebaixamento devido a Construção do Poço   |
| t          | (s)                                   | Tempo                                      |
| T          | (m <sup>2</sup> /s)                   | Transmissividade                           |
| $T_i, T_j$ | (m <sup>2</sup> /s)                   | Transmissividade na direção x e y          |
| V          | (m <sup>3</sup> )                     | Volume                                     |
| x, y       | (m)                                   | Coordenadas cartesianas                    |
| $\theta$   | -                                     | Declividade da superfície freática         |
| $\rho$     | $\frac{\text{Kg(massa)}}{\text{m}^3}$ | Densidade ou massa específica              |
| $\mu$      |                                       | Viscosidade dinâmica                       |
| $\Delta$   | -                                     | Delta                                      |

# **Modelação Computacional de Poços, com Rede Atípica e Fatores de Ajustes, para um Melhor Entendimento dos Parâmetros Envolvidos**

**Silvestre Lopes da Nobrega**

## **RESUMO**

Este trabalho de dissertação é mais um desenvolvido na importante linha da pesquisa da hidrodinâmica do sistema de poços, que visa buscar um entendimento de como deve proceder a exploração econômica dos Poços Tubulares, bem como do tipo Amazonas em aquíferos não confinados nos mananciais aluviais rasos localizados no semi-árido paraibano, afim de ser obtido um maior rendimento e vida útil do sistema aquífero-poço, através de simulações computacionais utilizando uma discretização mais refinada da área de influência do poço, principalmente nas proximidades dos poços (tubulares e Amazonas) em estudo, assim permitindo a implementação de alguns fatores de ajuste para representar melhor, através do modelo, o comportamento do sistema real.

O refinamento da malha utilizada no modelo de fluxo subterrâneo, que tem sua equação governante escrita na forma de volume finito, tornou-se necessária devido o objetivo de estudar o comportamento do rebaixamento nas proximidades dos poços de produção e o que de alguma forma interfere no maior ou menor desempenho desses poços e em especial nos poços de grande diâmetro ou poços Amazonas. Tais Poços de Grande Diâmetros tem sua importância reconhecida no semi-árido paraibano, especialmente para as propriedades rurais do pequeno e médio porte no nordeste brasileiro.

O modelo foi concebido usando a Linguagem Pascal - Versão VI, onde foram utilizados dois programas, sendo que um simula o poço tubular raso e o segundo simula o funcionamento do poço de grande diâmetro, ambos localizados em um mesmo aquífero no município de Jericó no alto sertão da Paraíba, pesquisados pela Companhia de

Desenvolvimento de Recursos Minerais (CDRM), de onde foram adquiridos os dados desta pesquisa.

Os resultados obtidos através de simulações feitas sobre ambos os tipos de poços foram satisfatórios e foram mais próximos dos valores obtidos no campo, assim permitindo extrapolações dos mesmos para outras situações descritas na dissertação. Os fatores de ajuste, os quais foram necessários para a calibragem da curva de rebaixamento, de uma seção mais afastada como o raio de influência até seções mais próximas ao poço de produção, serviram bem para mostrar a realidade da curva de rebaixamento, sem os quais, os ensaios de poços de observação não poderão ser calibrados. Usando estes fatores de ajuste, o estudo facilita extrapolar os diâmetros, as vazões e os rebaixamentos, usando os quais o pequeno agricultor poderá escolher o poço certo num determinado tipo do solo do aquífero em questão.

# **Computer Modeling of Wells with Atypical Network and Adjustment Factors for the Same for a better understanding of the parameters Involved**

**Silvestre Lopes da Nobrega**

## **ABSTRACT**

This Master's Dissertation is yet another attempt to better understand the hydrodynamics of the Well System, this being an extension of the line of research on this topic, in search of finding a viable solution for the economic exploration of both tubular and Amazonas type wells in unconfined shallow aquifers of the Semi-Arid Paraiba state. Thus, this study is aimed at obtaining better yields from the Aquifer-Well system, as also to prolong the useful life of the system, by way of computer simulations utilizing discretization of the area of influence by a refined network, principally in the proximity of the wells (both tubular and Amazonas type) under study. Such an approach permits the implementation of certain adjustment factors for a better representation of the behavioral tendencies of the real system through the adoption of the model.

The refined network utilized in the ground water flow modeling has its governing equation expressed in the finite volume form. This method was adopted with the object of studying the drawdowns that occur in the proximity of the production well, which in some form or the other, influence the behavior of the well, more so in Large Diameter Amazonas type Wells. Such Large Diameter Wells are of particular interest, as they are of fundamental importance to the small and medium farmers in the rural areas of north-east Brazil.

The model is developed in the Pascal Language Version VI, where-in were utilized two programs, one developed for Tubular Shallow Well and the other to simulate the functioning of the Large Diameter Well. Both these wells were located in the same aquifer in the Municipality of Jericó in Northwest Semi-Arid Paraíba. The results of pumping tests conducted by the State Organ - Mineral Resources Development Company (CDRM) were utilized in this study.

The results obtained by way of simulations effected on both the computer models were quite satisfactory. These are found to be very near the field observations and therefore were extended further to other situations which were described in the dissertation. The adjustment factors that were necessary to calibrate the draw-down curve, from a point far away at the radius of influence till sections very near the production well, served excellently to show the reality. These factors can safely be used to extrapolate the diameters of wells, discharges and drawdowns so that the agriculturist may adopt the right type of well under a given soil condition of the aquifer to obtain the optimum yield from the aquifer under study.

## Capítulo I

### INTRODUÇÃO

Segundo dados históricos, há três séculos a região Nordeste do Brasil convive com o problema da seca, mas embora cíclica e previsível seus efeitos não são amenizados, por falta de uma política que principalmente vise o aproveitamento racional dos recursos hídricos disponíveis.

A má distribuição das chuvas, do ponto de vista espacial e temporal, o uso indiscriminado e sem um devido planejamento que possa garantir um melhor aproveitamento dos mananciais, vem contribuindo de forma intensa para a deterioração da qualidade da água, no que diz respeito ao problema de salinização, poluição e contaminação destes recursos. Outro agravante na ampliação do feito da seca é a particularidade do semi-árido nordestino ser o mais populoso do mundo ao contrário das outras regiões secas.

No contexto do aproveitamento e gerenciamento dos recursos hídricos o Estado deve exercer um papel importante e competente, pois tais recursos são fundamentais não só para o abastecimento da população bem como para o desenvolvimento agro-industrial de uma determinada região. Devido a fácil degradação dos mananciais de superfícies e o alto índice de evapotranspiração o aproveitamento das reservas subterrânea aparece como uma medida estratégica dentro desta política de planejamento e gerenciamento dos nossos recursos hídricos.

Em particular, buscamos chamar a atenção para o potencial dos aquíferos e proporcionar de forma modesta aos órgãos de tomada de decisão, uma melhor compreensão

do comportamento de poços tubulares rasos e poços amazonas nos aquíferos aluviais rasos, por reconhecer a importância deste tipo de aquífero para o desenvolvimento principalmente de pequenas propriedades rurais e conseqüentemente na melhoria das condições de vida dos pequenos agricultores paraibanos.

O estudo partiu da necessidade de observar o comportamento de dois poços distintos, construídos em uma mesma área aquífera, bem como o comportamento deste aquífero em resposta ao bombeamento nestes poços, afim de definir um tipo de obra de captação subterrânea com características construtivas que promova maior eficiência no aproveitamento destes recursos. A justificativa da linha de pesquisa surge diante da aleatoriedade e sem critérios técnicos, na escolha do diâmetro, do material usado na construção e na definição da vazão de exploração de poços tubulares rasos e principalmente os poços amazonas. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido, além desta pequena introdução, da bibliografia e anexos, em mais sete capítulos distribuídos na forma apresentada a seguir:

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, onde além da teoria básica do fluxo em meio poroso, foi também citados trabalhos anteriores na mesma linha de pesquisa.

No capítulo 3, tivemos a oportunidade de fazer uma breve descrição da área em estudo, mostrando sua localização e suas principais características.

A hidráulica de poços no que diz respeito aos fatores que interferem de forma direta ou indireta na eficiência de um sistema aquífero-poço, bem como as formas de determinação da eficiência são apresentadas no capítulo 4.

Já os dados fornecidos pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba – CDRM e utilizados na pesquisa foram dispostos no capítulo 5.

O capítulo 6 é composto das informações de como a modelagem foi concebida, através da apresentação da equação matemática utilizada para representar o fluxo subterrâneo, as condições de contorno, a discretização da área e por fim o processo de calibragem.

No capítulo 7, são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas.

As conclusões a partir dos resultados encontrados e as recomendações para novas pesquisas são apresentadas no capítulo 8.

## Capítulo II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Histórico

Muito antes da compreensão da sua origem, ocorrência e movimento as Águas Subterrâneas eram aproveitadas através de Túneis e Poços construídos na Pérsia e no Egito, por volta de 800 a.c..

Desde então, vários passos importantes foram dados afim de entender a origem das Águas Subterrâneas, partindo de hipóteses de antigos filósofos gregos, como Homero, Tales e Platão, os quais admitiam que as nascentes eram formadas por água do mar canalizadas através de canais subterrâneos para baixo das montanhas, de onde ascendiam até à superfície depois de purificadas, até o total entendimento do Ciclo Hidrológico.

A compreensão da ocorrência e do movimento das Águas Subterrâneas surgiu no século XVIII com o estabelecimento dos fundamentos geológicos. O século XIX foi marcado pelo interesse no conhecimento da hidráulica do aproveitamento das Águas Subterrâneas, sendo iniciado pelo engenheiro francês Henry Darcy (1803-1858), tendo como principais sucessores Dupuit (1863), Thiem (1870) e Forchheimer (1886). Dupuit (1863) destacou-se como sendo o primeiro pesquisador a desenvolver uma fórmula para o fluxo radial estacionário, para poços em bombeamento.



Na primeira metade do século XX, A. Thiem (1906), desenvolveu um método de campo para determinar a condutividade hidráulica de uma formação aquífera para uma determinada taxa de fluxo, usando poço de bombeamento e as resultantes dos rebaixamentos em poços de observação. Theis (1935), foi responsável por uma das principais contribuições, neste século, para o desenvolvimento da hidráulica de poços e das estimativas dos recursos disponíveis em uma formação aquífera confinada (não drenante), com o método de solução analítica da equação do fluxo transiente.

Kano (1939), Jacob (1947) e Rorabaugh (1953), foram responsáveis pelos métodos de determinação das perdas no caminho do fluxo no poço. Devemos também destacar, na segunda metade do século XX, a utilização dos modelos reduzidos de fluxo para poço (tanques de areia), os modelos analógicos elétricos (malhas de resistências e capacitores), e dos modelos digitais, graças ao desenvolvimento da microeletrônica e software.

Hantush (1962), estudou os efeitos do rebaixamento sobre a vazão explorável de poços parcialmente e totalmente penetrantes em aquífero confinado, através de expressões em forma de séries finitas. Outras importantes contribuições de Hantush para a hidráulica de poços foi em 1964 com o trabalho "Hydraulic of Wells", onde foi tratado assuntos como poço artesianos, interferência entre poços, efeito de barreiras impermeáveis e aquífero semi-permeável.

Infelizmente as maiorias das pesquisas referentes a hidráulica de poços são desenvolvidas com a utilização de poços tubulares e em aquífero confinado, mas podemos destacar vários pesquisadores que contribuíram para uma melhor compreensão da hidráulica dos poços de grandes diâmetros como Rushton e Holt (1981), que usaram métodos numéricos para analisar o fluxo nesse tipo poço, Patel & Mishra (1983), Mishra & Chachadi (1986) e Mishra & Chachadi (1992) com seus artigos sobre poços amazonas.

## **2.2 Tipos de Aquíferos**

O aquífero é uma formação geológica que armazena e permite que quantidade significativa de água movimente-se no seu interior em condições naturais. Os aquíferos são classificados de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limitantes.

- Aquífero confinado – é um aquífero no qual a pressão no topo é maior do que a pressão atmosférica, e compreende dois tipos: confinado drenante e não drenante.
- Drenante – é um aquífero no qual pelo menos uma das superfícies limitantes é semipermeável, permitindo assim, a entrada ou saída de água por drenança, pelo topo e/ou base do mesmo.
- Não drenante – é um aquífero cuja as camadas limitantes superior e inferior são impermeáveis. São geralmente formações aquíferas de grandes extensões.
- Aquífero livres – também chamados freático ou não confinados, é aquele no qual o limite do topo encontra-se submetida a pressão atmosférica, formando assim, uma superfície freática.

### 2.3 Parâmetros que Definem o Meio Poroso

Geralmente chamados de Parâmetros Hidrodinâmicos, a permeabilidade hidráulica ( $K$ ) e o coeficiente de armazenamento ( $S$ ), são responsáveis pelas características que possui o meio poroso de transmitir e armazenar água, respectivamente.

O coeficiente de armazenamento ( $S$ ) de um aquífero saturado é definido como o volume ( $\Delta V$ )[L<sup>3</sup>] de água liberado ou adquirido por unidade de área superficial do aquífero ( $A$ )[L<sup>2</sup>], submetido a um decréscimo ou acréscimo unitário de carga hidráulica ( $\Delta h$ )[L].

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad (2.1)$$

A permeabilidade hidráulica é a medida da capacidade que o meio poroso tem de transmitir o fluxo de um determinado fluido. O tensor da permeabilidade hidráulica  $\mathbf{K}$  é função dos parâmetros do meio poroso (permeabilidade intrínseca  $\mathbf{k}$ , peso específico  $\rho g$ ) e das características do fluido (viscosidade  $\mu$ ), como mostra a expressão abaixo:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{k} \cdot \rho \cdot g}{\mu}, [\text{LT}^{-1}] \quad (2.2)$$

A variação da permeabilidade nas direções dos eixos das coordenadas, define se o meio é dito isotrópico ou anisotrópico, ou seja, quando a permeabilidade  $K_{xx} \neq K_{yy}$ , o meio é chamado anisotrópico, e caso contrário  $K_{xx} = K_{yy}$ , o meio é dito isotrópico. Caso a permeabilidade permaneça com a mesma variação em todos os pontos do aquífero, o domínio do meio é dito ser homogêneo, e caso isso não ocorra, o meio é dito heterogêneo. Assim o domínio do meio poroso pode ser classificado em: isotrópico e homogêneo, anisotrópico e homogêneo, isotrópico e heterogêneo, e por fim, anisotrópico e heterogêneo (Figura 2.1).

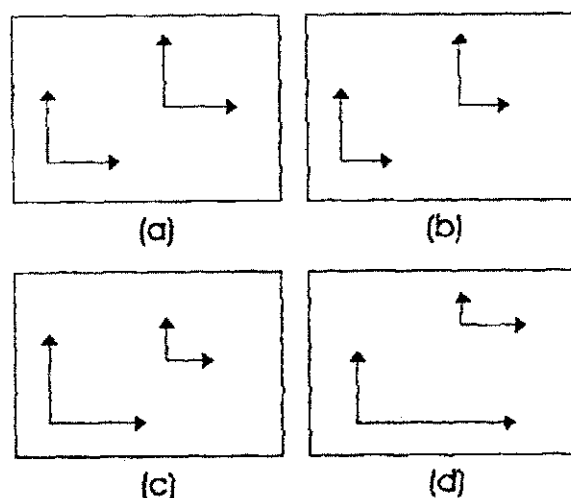


Figura 2.1 – Representação da permeabilidade hidráulica nos meios homogêneos, heterogêneos, isotrópico e anisotrópico (Fonte: Adaptado de Morese, 1998)

## 2.4 Teorias Fundamentais do Fluxo Subterrâneo

Muitos pesquisadores, como foi citado no histórico, contribuíram para o desenvolvimento das teorias ligadas a percolação em meios porosos.

A equação diferencial que descreve o movimento do fluxo subterrâneo foi determinada pela combinação da equação de Darcy com a equação da continuidade, onde Darcy mostra que o fluxo no meio poroso é proporcional ao gradiente do potencial hidráulico (equação 2.3) e a equação da continuidade envolve entradas, saídas e taxas de variação do armazenamento em um volume elementar.

$$q_i = -K_{ij} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j}, [LT^{-1}] \quad (2.3)$$

onde  $q_i$  é a vazão específica,  $K_{ij}$  é a permeabilidade hidráulica,  $\partial h / \partial x_j$  é o gradiente hidráulico e  $i, j$  são as direções de fluxo.

Assim, aplicado-se tal combinação e o conceito de armazenamento específico, tem-se:

$$-\text{div}(K \cdot \text{grad } h) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde  $R_v$  corresponde à taxa de recarga por unidade de volume.

Considerando um meio poroso no qual as direções preferenciais do fluxo coincidem com as direções do sistema de coordenadas  $x, y, z$ . Daí:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5)$$

#### 2.4.1 Aquífero Confinado

Como em muitas aplicações de hidrogeologia, o aquífero confinado pode ser considerado como horizontal e de espessura constante  $b$ , a análise do escoamento deve ser feita apenas no plano do mesmo, isto significa que a carga hidráulica é independente de  $z$ , logo  $h=h(x,y,t)$ . Assim a equação 2.5 é reescrita:

$$\frac{\partial}{\partial x} (b \cdot K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (b \cdot K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + R = S_s \cdot b \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.6)$$

Aplicando as definições de transmissividade ( $T = Kb$ ) e do coeficiente de armazenamento ( $S=S_s b$ ), e considerando o meio poroso homogêneo e isotrópico, chega-se à equação abaixo que defini o movimento do fluxo em um aquífero confinado.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{R}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.7)$$

## 2.4.2 Aquífero Livre

No aquífero livre ou não confinado não existe camada limitante impermeável na fase superior, sendo assim, para simplificar a cálculo admiti-se uma interface de separação entre a zona de saturação e uma região acima, considerada completamente seca.

Dupuit observou que na maioria dos fluxos de água em aquíferos livres a declividade da linha freática ( $\theta$ ) é muito pequena (Figura 2.2), logo, sugeriu que o valor do  $\sin(\theta)$  substituísse o valor da declividade  $\tan(\theta) = dh/dx$ . Sendo assim, implica dizer que as linhas equipotenciais são verticais e, conseqüentemente, o fluxo subterrâneo será horizontal e  $h$  como sendo a espessura do aquífero.

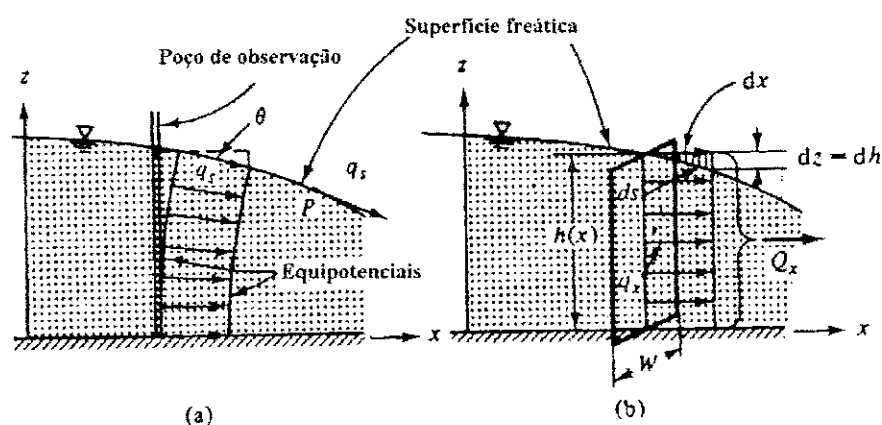


Figura 2.2 - Representação da aproximação de Dupuit (Fonte: Adaptado de Bear, 1990).

Levando-se em conta as considerações anteriores e que o meio poroso é homogêneo e isotrópico, a equação 2.5 foi reescrita por Dupuit- Forchheimer, da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.8)$$

Como a equação 2.8 não é linear em  $h$ , por causa dos termos  $h \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$  e  $h \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$ , assim para facilitar o processo de solução, a devida linearização pode ser realizada, declarando uma transmissividade constante ( $K \cdot h = T = \text{constante}$ ), quando a variação de  $h$  é muito pequena em relação a espessura saturada do aquífero ( $\Delta h \ll h$ ), conforme a suposição de Dupuit. Podendo assim a equação 2.8 ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.9)$$

## 2.5 Teorias de fluxo radial

### 2.5.1 Fluxo radial em um aquífero confinado

Nos aquíferos confinados, a água está submetida a uma pressão superior à atmosférica, com isso, ao perfurar um poço, quando se atravessa o topo do aquífero, observa-se uma ascensão rápida da água até a mesma estabilizar-se em uma determinada posição, sendo este fenômeno conhecido como artesianismo. A posição de estabilização de água nos poços indica uma superfície virtual que representa a pressão hidrostática do aquífero (Figura 2.3).

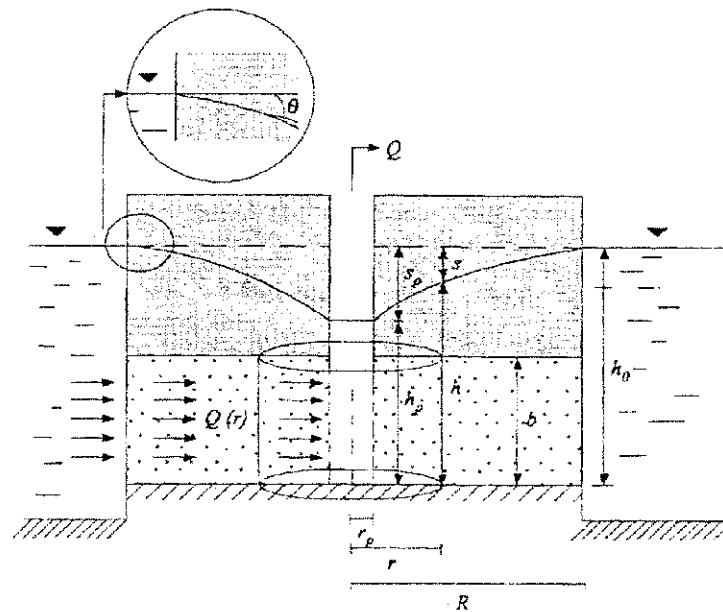


Figura 2.3 - Poço captando um aquífero confinado no centro de uma ilha circular. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)

onde:

$Q$  é a vazão de bombeamento [ $L^3/T$ ];

$h_0$  é o nível potenciométrico inicial [ $L$ ];

$h$  é o nível potenciométrico a uma distância  $r$  do poço bombeado [ $L$ ];

$h_p$  é o nível da água no poço [L];

$s$  é o rebaixamento num ponto qualquer a uma distância  $r$  do poço bombeado [L];

$s_p$  é o rebaixamento no poço bombeado [L];

$r_p$  é o raio do poço [L];

$R$  é o raio de influência; limite do cone de rebaixamento [L];

$b$  é a espessura do aquífero [L].

Assim, para um poço sendo bombeado no centro de uma ilha circular, com o raio de influência igual ao limite da própria ilha e coincidente com o nível da água superficial. Pelo princípio da continuidade a vazão extraída no poço é igual à vazão que passa pela superfície lateral do cilindro indicado na figura 2.3.

Segundo a lei de Darcy esta vazão é dada pela expressão:

$$Q = KAi \quad (2.10)$$

onde:

$Q$  é a vazão que passa pela área lateral do cilindro [ $L^3T^{-1}$ ];

$K$  é a permeabilidade hidráulica [ $LT^{-1}$ ];

$A = 2\pi rH$  é a área da superfície lateral do cilindro [ $L^2$ ];

$i$  ( $dh/dr$ ) é o gradiente hidráulico a uma distância  $r$ .

Logo:

$$Q = 2\pi r b K \cdot \frac{dh}{dr} = 2\pi r T \cdot \frac{dh}{dr} \therefore dh = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \frac{1}{r} dr$$

Integrando para os limites extremos, teremos:

No poço:  $h = h_p$  e  $r = r_p$

No extremo da ilha  $h = h_0$  e  $r = R$

$$h_0 - h_p = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R}{r_p} \quad (2.11)$$

Para um caso mais geral onde o aquífero tenha uma extensão muito grande, as condições de contorno passam a ser:

No poço:  $h_p$  e  $r_p$

Num ponto qualquer do aquífero:  $h$  e  $r$

Desta forma, a equação 2.11 torna-se:

$$h - h_p = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R}{r_p} \quad (2.12)$$

## 2.5.2 Fluxo radial em um aquífero livre

Na medida em que esta dissertação trata da hidráulica de poços em aquífero livre, este item tem como objetivo explicar em maiores detalhes sobre o funcionamento de poços tipo tubular e amazonas e as perdas totais do sistema aquífero-poço, em função da decomposição desta perda em perda de formação e do poço.

Ao perfurar-se poços, neste tipo de aquífero, o nível da água em cada poço representa uma superfície real coincidente com o limite superior de saturação, denominada de superfície freática. Como não existem limites geológicos (camadas confinantes) o cone de rebaixamento provoca uma redução da espessura de saturação do aquífero. Em consequência desta redução de espessura existem componentes de fluxo vertical que produz perdas de carga adicionais, cujo reflexo é verificado no poço em bombeamento por um acréscimo de rebaixamento do nível da água em comparação ao nível no aquífero. A superfície úmida ( $H'$ ) criada dentro do poço é denominada de superfície de ressurgência ou sudação (Figura 2.4).



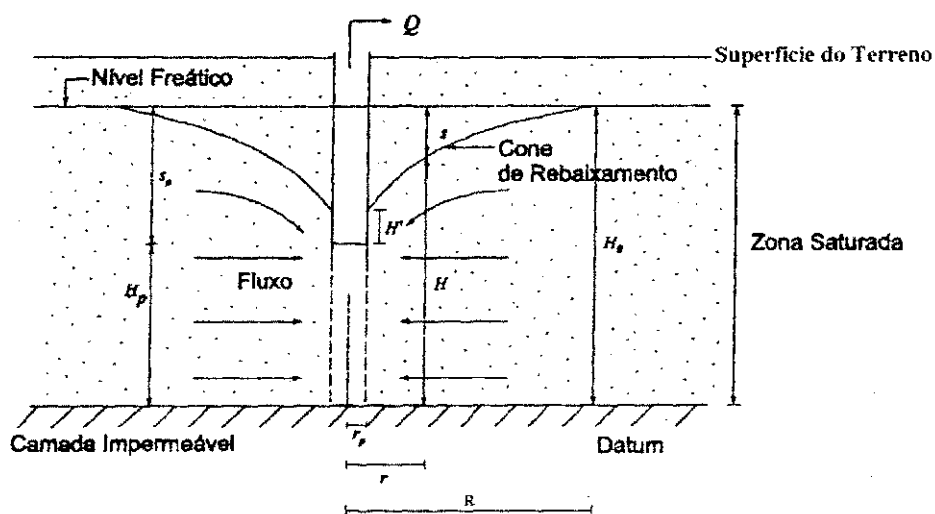


Figura 2.4 – Poço bombeado num aquífero livre, mostrando o efeito da redução na espessura saturada. (Fonte: Filho, João M. e Feitosa, Fernando A., 1997)

A equação para fluxo radial sob condições permanentes num poço colocado num aquífero não-confinado pode ser desenvolvida usando aproximações feita por Dupuit/Forchheimer em 1836 (in Custódio & Llamas, 1983). Como é mostrado na Figura 2.5, o poço penetra completamente no aquífero e na margem do raio de influência a carga hidráulica permanece constante.

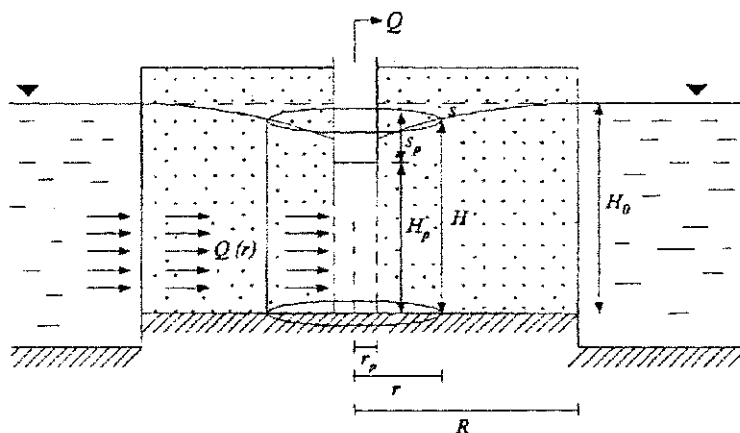


Figura 2.5 - Poço no centro de uma ilha circular em um aquífero livre ilustrando as condições para o regime permanente. (Fonte: Adaptado de Custodio & Llamas, 1983)

Nestas condições a vazão do poço é dada por:

$$Q = 2\pi KH \cdot \frac{dH}{dr} \quad (2.13)$$

onde :

Q é a vazão que passa pela área lateral do cilindro [ $L^3T^{-1}$ ];

K é a permeabilidade hidráulica [ $LT^{-1}$ ];

$2\pi rH$  é a área da superfície lateral do cilindro [ $L^2$ ];

$dh/dr$  é o gradiente hidráulico a uma distância r.

Isolando os termos em H, vem:

$$Hdh = \frac{Q}{2\pi K} \cdot \frac{1}{r} dr \quad (2.14)$$

Integrando para as condições de contorno:

No poço:  $r = r_p$  e  $H = H_p$

No extremo da ilha:  $r = R$  e  $H = H_0$

Chegamos à:

$$H_0^2 - H_p^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_p} \quad (2.15)$$

Generalizando para um ponto qualquer vem:

$$H^2 - H_p^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{r_p} \quad (2.16)$$

Essa equação porém, não é suficientemente precisa para descrever a curva de rebaixamento próximo ao poço uma vez que os componentes do fluxo contradizem as suposições de Dupuit. Porém, as estimativas de permeabilidade hidráulica para determinadas cargas são razoavelmente aceitáveis.

## Capítulo III

### LOCAL DE ESTUDO

#### 3.1 Localização da Bacia

O aquífero estudado é um aquífero livre pertencente a bacia hidrográfica do Médio Piranhas, na micro-região homogênea 89, em Catolé do Rocha, ocupando uma posição Noroeste do Estado da Paraíba, fronteira com o Rio Grande do Norte, inserida em pleno sertão semi-árido (Figura 3.1). Apresenta altitude de 215 m, longitude  $37^{\circ}30' - 38^{\circ}$ , e latitude  $6^{\circ}15' - 6^{\circ}45'$ , pluviometria total média anual de 874 mm, evapotranspiração potencial de 1497 mm e real de 815 mm, deficiência hídrica total de 682 mm.

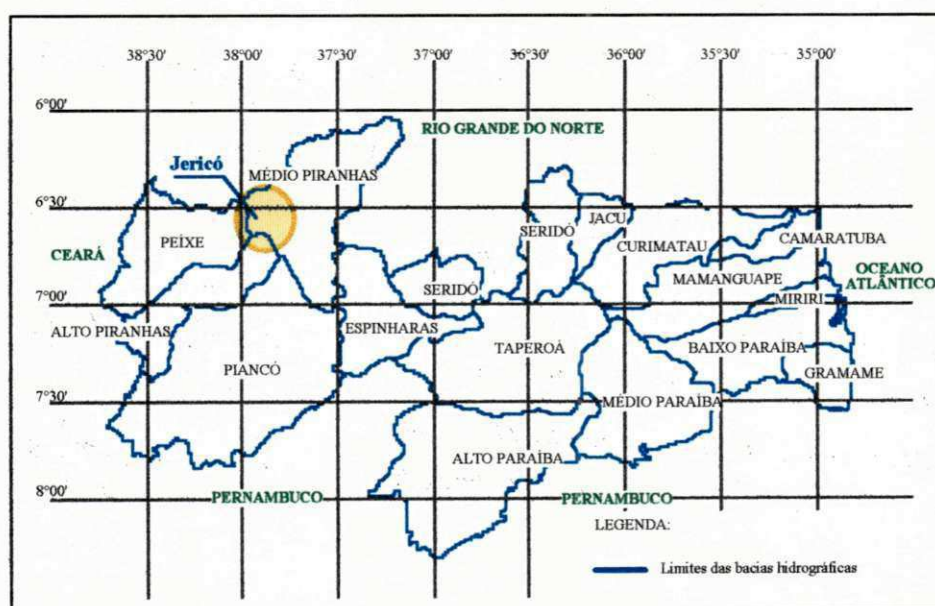


Figura 3.1 – Mapa das bacias hidrográficas do estado da Paraíba (FONTE: LMRS-PB)

### 3.2 Aluvião Estudado

As formações de terras podem ser agrupadas em três diferentes tipos:

- Velhos solos de terraço formados durante o Cretáceo;
- Formações de rochas cristalinas;
- Aluviões jovens ou recentes depósitos em virtude de recente sintrusões (RADAMBRASIL, 1981).

A área de estudo, no município de Jericó (Figura 3.2), trata-se de uma região geologicamente constituída por rochas do complexo Migmatítico-granítico pré-cambriano, sobre o qual, repousa depósitos aluviais constituídos de areias finas à grossas, ocasionalmente conglomeráticas, argilas, siltes e matéria orgânica.



Figura 3.2 – Localização do Município de Jericó (FONTE: LMRS-PB)

## Capítulo IV

### HIDRÁULICA DE POÇOS

#### 4.1 Tipos de Poços

Para a utilização de água subterrânea, faz-se necessário, desde que não exista fontes (de onde a água brota espontaneamente), a utilização de poços, podendo estes serem:

- Poços escavados – estes tipos de poços , geralmente são utilizados em aquíferos de baixa transmissividade, apresentam grandes diâmetro, profundidade não superior a 25 metros e revestidos de tijolos ou anéis de concreto armado.
- Poços tubulares – apresentam pequenos diâmetros e profundidades que variam de dezenas a centenas de metros, geralmente revestidos com tubos geomecânico intercalados com filtros, para permitir a entrada do fluxo.

Um poço é uma obra de oferta hídrico que, bem projetada e desenvolvida, permite a extração de água da formação saturada com eficiência e conseqüentemente com menor custo. No projeto deve-se aplicar adequadamente os princípios da hidráulica na análise do poço e do desempenho do aquífero, já no desenvolvimento deverá ter pericia na perfuração ou escavação, na escolha do material a ser empregado no poço e na construção do mesmo.

Na micro-região de Catolé do Rocha, na qual está incluído o município de Jericó, o tipo de captação usual da água subterrânea é o poço amazonas, conhecido também como “cacimbão”, com características construtiva, ou seja, diâmetro, profundidade e área livre da secção filtrante, muito variada e em menor número, poços tubulares raso com diâmetro de 6” ou 8”.

## 4.2 Eficiência Hidráulica

A eficiência do poço pode ser avaliada, em alguns casos pelo diagrama das distâncias e rebaixamento, prolongando-se a reta representativa do cone de rebaixamento (diagrama semilogaritmico) até a uma vertical correspondente um raio no qual inclui-se o raio do poço e a espessura da camada de transição, caso exista, obtendo-se assim, o rebaixamento teórico, ou seja, considerando o poço 100% eficiente (Figura 4.1). Daí, a relação entre o rebaixamento real e teórico, define quanto será a eficiência do poço.

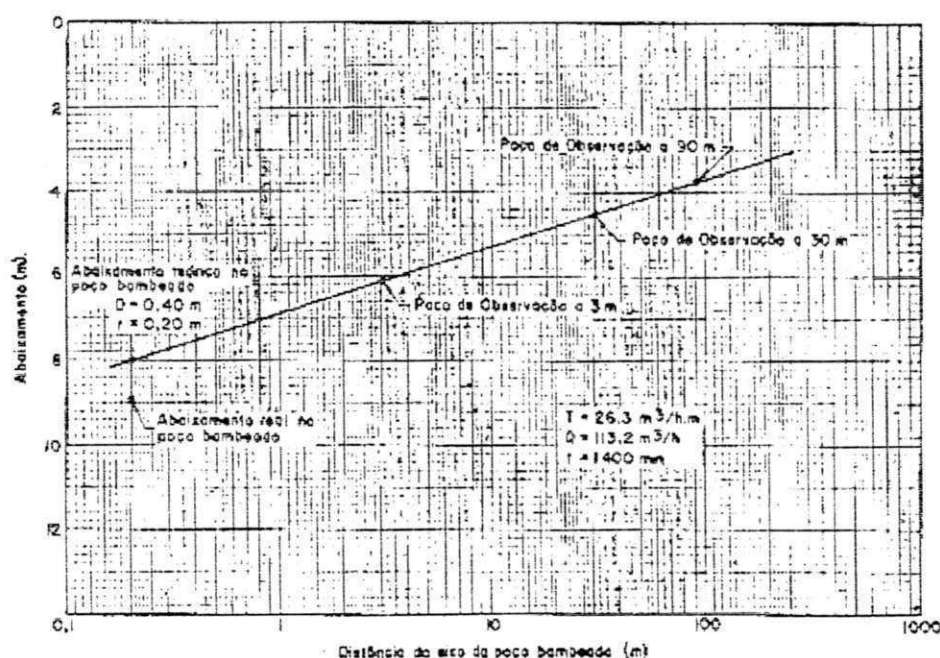


Figura 4.1 – Comparação do rebaixamento teórico com o real, através do prolongamento da reta do diagrama das distâncias rebaixamento até a abscissa correspondente ao raio do poço somado ao tamanho da zona de transição (Fonte: Exemplo, CETESB, 1978).

O resultado neste método, só é exato para aquífero confinado e quando o filtro abrange toda a camada saturada. No caso de aquífero livres, onde a operação do poço geralmente causa redução da espessura saturada, devemos lembrar que o rebaixamento adicional, devido a redução, não deve ser atribuído como uma perda no poço, isto é, quando do cálculo da eficiência do poço, não considerar esse rebaixamento adicional, podendo assim atribuir uma ineficiência ao poço, que não existe.

O desempenho de um poço tubular é analisado em função de dois fatores: o primeiro inerentes ao projeto, como escolha de filtro com abertura de área insuficiente, comprimento inadequados, e a má distribuição das aberturas, e o segundo o fator construtivo, onde podemos citar a locação do filtro, o tipo de fluido utilizado na perfuração e o desenvolvimento do pré-filtro. No caso de poço amazonas, a eficiência esta diretamente ligada a existência ou não de uma secção filtrante, da dimensão da área livre dessa secção, e da existência ou não de pré-filtro e seu dimensionamento. Outro componente que melhora o desempenho de poços amazonas é o uso de ponteiros radiais, técnica essa muito utilizado pela Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba (CDRM).

Outro critério bem conhecido para a avaliação da eficiência hidráulica é o descrito e bem explicado por Bouwer (1978), e consiste em decompor o rebaixamento total  $s_t$  em rebaixamento produzido pela formação do aquífero  $s_f$  e o produzido pelas características construtivas do poço  $s_p$  (Figura 4.2).

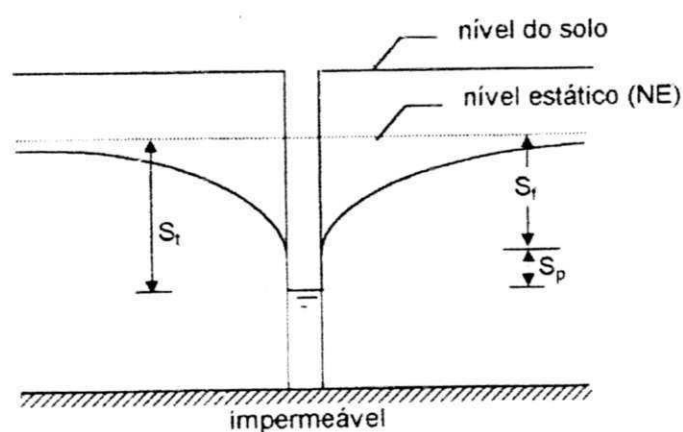


Figura 4.2 Decomposição do rebaixamento total  $s_t$  em rebaixamento de formação  $s_f$  e rebaixamento do poço  $s_p$ .

A grande dificuldade deste método é a necessidade de um teste de bombeamento com vazões escalonadas ou a simulação de rebaixamentos utilizando vazões diferentes da vazão de calibração para promover a determinação das constantes  $C_f$  e  $C_p$  chamadas de constante de formação e constante de poço, respectivamente, pois  $s_f = C_f \cdot Q$  e  $s_p = C_p \cdot Q^n$  e a eficiência é descrita como:

$$E \text{ \%} = \frac{s_f}{s_f + s_p} \cdot 100 \quad (4.1)$$

### 4.3 Efeito da Redução de Espessura Saturada no Aquífero Livre Sobre o Cone de Rebaixamento

A redução de espessura saturada, produz uma diminuição da secção de passagem da água em direção ao poço, sendo assim, será necessário um gradiente hidráulico maior e conseqüentemente maior velocidade do fluxo, para que a equação de continuidade seja atendida. A atuação das componentes verticais da velocidade ocasionam perdas adicionais, cujo reflexo é verificado no poço em bombeamento através do rebaixamento adicional  $H'$  mostrado na Figura 2.4.

Portanto, para conseguir representar satisfatoriamente a superfície nas vizinhanças do poço bombeado, onde existem na prática componentes verticais de fluxo, independentemente da vazão, deve-se utilizar a equação 4.2 com a nomenclatura dos seus termos explicada na Figura 2.5, deduzida igualando-se as equações 2.15 e 2.16, e considerando um meio homogêneo, isotrópico e fluxo permanente.

$$(H^2 - H_p^2) = (H_0^2 - H_p^2) \cdot \frac{\ln(r/r_p)}{\ln(R/r_p)} \quad (4.2)$$

Na equação 4.2 deve ser feita uma correção que consiste em supor que a carga hidráulica no poço ( $H_p$ ) é acrescida do valor da superfície de ressurgência ( $H'$ ). Logo, a equação 4.2 passa a ser:

$$\left[ H^2 - (H_p + H')^2 \right] = \left[ H_0^2 - (H_p + H')^2 \right] \cdot \frac{\ln(r/r_p)}{\ln(R/r_p)} \quad (4.3)$$



Sendo o cálculo da superfície de ressurgência feito a partir de fórmulas empíricas ou semi-empíricas, das quais as mais conhecidas são:

- Fórmula de Ehrenberger

$$H' \approx 0,5 \cdot \frac{(H_0 - H_p)^2}{H_p} \quad (4.4)$$

- Fórmula de Boulton

$$H' \approx (H_0 - H_p) - c \cdot \frac{Q}{2\pi KH_0} \quad (4.5)$$

onde :

$$c = 3,75 \text{ para } r_p / H_0 \leq 0,1;$$

$$c = 3,5 \text{ para } r_p / H_0 \leq 0,25.$$

- Fórmula de Hall

$$H' \approx \left( \frac{H_0 - H_p}{1 + 5 \cdot (r_p / H)} \right) \cdot \left( \frac{1 - (H_p / H)^{2,4}}{1 + 0,02 \cdot \ln(r / r_p)} \right) \quad (4.6)$$

onde :

$H$  = espessura saturada para  $r > 1,5 H_0$ ;

$H = H_0$  se  $r = R$ .

Para a utilização das equações 4.2 e 4.3, devem ser observados os seguintes critérios:

- Para  $r > 4r_p$  a equação 4.3 é válida;
- Para  $1,5 H_0 < r < 4r_p$  é aconselhável considerar para  $H$  o valor médio dos  $H$ 's calculados pelas equações 4.2 e 4.3.
- Para  $r > 1,5 H_0$  é válida a equação 4.2.

#### 4.4 Fatores de Ajuste $f_1$ , $f_2$ e $f$

A estrutura construtiva de um poço, bem como a vazão de bombeamento realizada para o aproveitamento da água subterrânea ocasionam comportamento no fluxo do aquífero diferente do que ocorre no seu estado natural, como por exemplo um gradiente hidráulico mais acentuado em um aquífero não confinado, não sendo a equação de Dupuit suficientemente precisa para descrever a curva de rebaixamento ao longo de todo raio de influência.

Assim, o material usado na construção do poço produz uma perda adicional, pois tende a impedir a entrada do fluxo através de sua estrutura devido a sua permeabilidade ser diferente a permeabilidade da formação do aquífero, logo para a estimativa da carga hidráulica nas proximidades do poço de produção temos que considerar uma correção na transmissividade da equação que governa o escoamento subterrâneo através do fator de ajuste  $f_2$  para poços tubulares rasos e o fator de ajuste  $f$  para poços amazonas.

Caso a taxa bombeamento usada na poço ocasione uma redução da espessura saturada, produzindo assim, um elevado gradiente hidráulico devemos considerar uma correção na transmissividade usando o fator de ajuste  $f_1$ , devido a diminuição do termo  $b$  de  $T=h \cdot b$ .

Nas Figuras 4.3 e 4.4, mostramos esquematicamente as faixas de atuação dos fatores de ajustes para os poços tubular e amazonas, respectivamente.

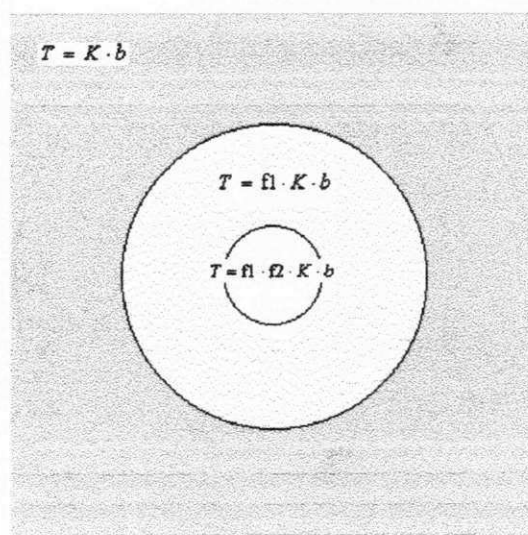


Figura 4.3 – Distribuição da mudança na transmissividade  $T$  dentro da área de influência do Poço Tubular Raso

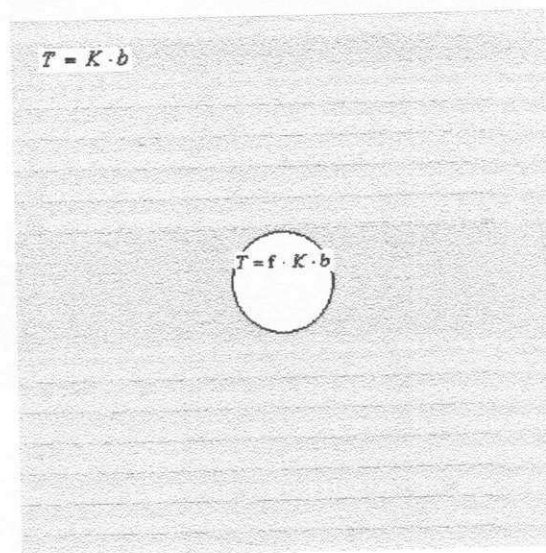


Figura 4.4 - Distribuição da mudança na transmissividade T dentro da área de influência do Poço Amazonas

## Capítulo V

### DADOS DA PESQUISA

#### 5.1 Origem dos Dados

A Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba - CDRM, através da divisão de hidrogeologia e sondagem, foi o órgão responsável pelas sondagens, a construção do poço tubular raso e o teste de bombeamento no mesmo, bem como no poço amazonas já existente. O objetivo da pesquisa, realizada em 1988, foi de identificar a capacidade de produção do aquífero as margens do Rio Jericó, vendo neste uma fonte para o abastecimento da cidade de Jericó até 2008, onde estima-se à necessidade de 60 m<sup>3</sup>/h, durante 24 horas por dia.

Para conhecimento das espessuras e litologias do aquífero, foram realizadas 26 sondagens, sendo 10 de reconhecimento e 16 de detalhamento. Assim, diante do apresentado na Tabela 5.1, apresentada em seguida, observa-se que o aquífero em estudo possui espessura média total de 7,70 metros e espessura média saturada de 5,30 metros. Muito embora, tenha sido considerado para o levantamento das características na área do poço tubular uma espessura saturada de 5,5 m e na parte abrangida pelo poço amazonas de 5,30 m.

Tabela 5.1 – Sondagens para reconhecimento e detalhamento do aquífero

| SONDAGENS      |                | METROS PERFURADOS |        | ESPESSURAS DO AQUIFERO |                 |
|----------------|----------------|-------------------|--------|------------------------|-----------------|
| Reconh.<br>(A) | Detalh.<br>(B) | (A)               | (B)    | Total<br>(m)           | Saturada<br>(m) |
| 01             | -              | 7,15              |        | 7,00                   | 4,5             |
| -              | 02             | -                 | 7,50   | 7,50                   | 3,6             |
| -              | 03             | -                 | 7,50   | 7,50                   | 3,8             |
| -              | 04             | -                 | 8,40   | 8,20                   | 6,00            |
| -              | 05             | -                 | 8,00   | 7,80                   | 5,35            |
| 06             | -              | 7,50              | -      | 7,30                   | 4,8             |
| -              | 07             | -                 | 8,00   | 7,90                   | 5,4             |
| -              | 08             | -                 | 7,00   | 7,00                   | 4,6             |
| -              | 09             | -                 | 7,80   | 7,60                   | 5,25            |
| -              | 10             | -                 | 7,90   | 7,00                   | 4,8             |
| 11             | -              | 7,50              | -      | 7,40                   | 4,9             |
| 12             | -              | 7,80              | -      | 7,70                   | 5,4             |
| 13             | -              | 8,25              | -      | 8,10                   | 5,95            |
| 14             | -              | 9,00              | -      | 9,00                   | 6,75            |
| 15             | -              | 7,00              | -      | 6,90                   | 4,5             |
| 16             | -              | 8,00              | -      | 8,00                   | 5,7             |
| 17             | -              | 8,20              | -      | 8,10                   | 5,6             |
| 18             | -              | 9,25              | -      | 9,10                   | 6,63            |
| -              | 19             | -                 | 8,20   | 8,00                   | 5,81            |
| -              | 20             | -                 | 7,70   | 7,60                   | 5,39            |
| -              | 21             | -                 | 7,60   | 7,50                   | 5,40            |
| -              | 22             | -                 | 7,80   | 7,70                   | 5,60            |
| -              | 23             | -                 | 7,40   | 7,40                   | 5,20            |
| -              | 24             | -                 | 7,60   | 7,60                   | 5,45            |
| -              | 25             | -                 | 7,80   | 7,70                   | 5,65            |
| -              | 26             | -                 | 7,90   | 7,70                   | 5,60            |
| 10             | 16             | 79,65             | 124,10 | Média = 7,70           | Média = 5,30    |

FONTE: CDRM (CAPTAÇÃO DE JERICÓ, Pesquisa de Manancial Subterrâneo – Relatório Final, 1988)

## 5.2 Teste de Aquífero

Para melhor identificar os valores dos parâmetros hidrodinâmicos, foram realizados testes de aquífero tanto no poço amazonas existente, como em um poço tubular raso construído. A disposição dos poços no aquífero, podem ser observados na ficha de locação (Figura 5.1).

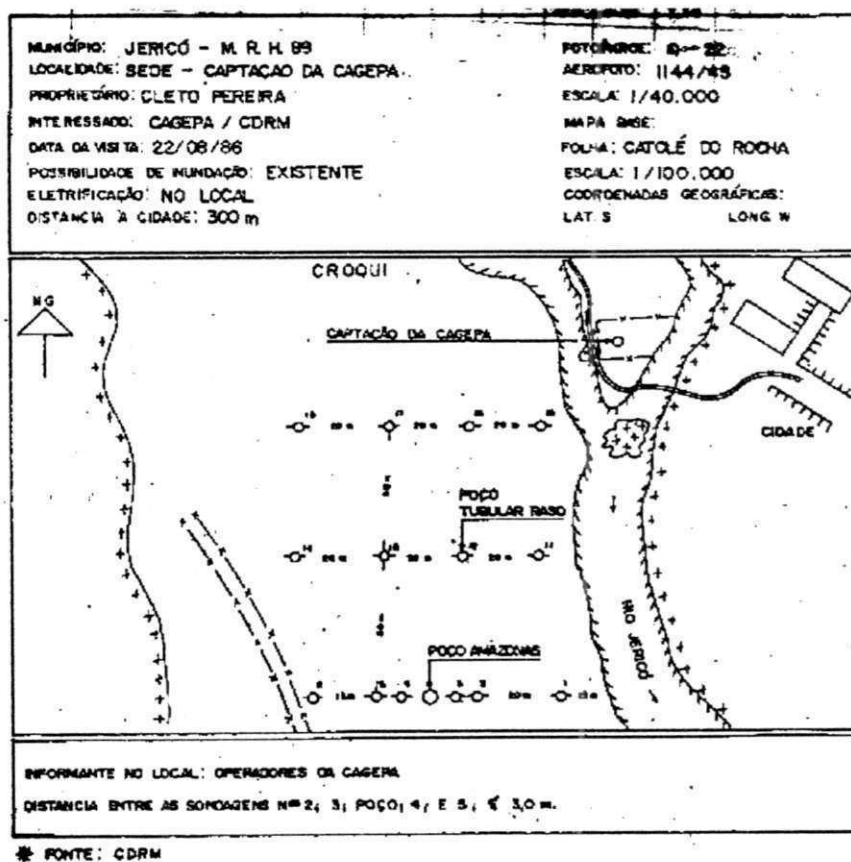


Figura 5.1 – Ficha de Localização

As características construtivas dos poços bombeados são:

- Poço Amazonas
 

|              |   |              |
|--------------|---|--------------|
| Profundidade | - | 8,20 metros; |
| Boca         | - | 0,85 metros; |
| D. Interno   | - | 3,80 metros. |
  
- Poço Tubular Raso
 

|                 |   |              |
|-----------------|---|--------------|
| Profundidade    | - | 7,80 metros; |
| D. Perfuração   | - | 0,85 metros; |
| D. Revestimento | - | 3,80 metros. |

Para a execução dos testes, foram instalados 5 (cinco) piezômetros, sendo 2 (dois) para o teste usando o poço Amazonas e 3 (três) para o teste realizado usando o poço tubular raso, permitindo assim, a obtenção dos resultados mostrados na Tabela 5.2, em seguida:

Tabela 5.2 – Resultados Gerais Obtidos nos Teste de Aquífero.

| P<br>O<br>Ç<br>O<br>S                | Poço Bombeando |       |                     |       |                       |     |       | Poço de Observação |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|----------------|-------|---------------------|-------|-----------------------|-----|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | $n_E$          | $n_D$ | Q                   | $s_p$ | Q/ $s_p$              | t   | $h_0$ | Piez.              | Dist. | $n_E$ | $n_D$ | $s_w$ | $H_0$ |
|                                      | (m)            | (m)   | (m <sup>3</sup> /h) | (m)   | (m <sup>3</sup> /h/m) | (h) | (m)   |                    | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   | (m)   |
| A<br>M<br>A<br>Z<br>O<br>N<br>A<br>S | 2.69           | 3.61  | 65.0                | 0.9   | 71.19                 | 20  | 5.30  | 01                 | 8.0   | 2.27  | 2.63  | 0.36  | 4.6   |
|                                      |                |       |                     |       |                       |     |       | 02                 | 16.0  | 2.50  | 2.72  | 0.22  | 4.6   |
| T<br>U<br>B.<br><br>R<br>A<br>S<br>O | 2.2            | 3.89  | 29.0                | 1.69  | 17                    | 24  | 5.50  | 01                 | 8.0   | 2.35  | 2.48  | 0.49  | 5.2   |
|                                      |                |       |                     |       |                       |     |       | 02                 | 16.0  | 2.48  | 2.64  | 0.16  | 5.1   |
|                                      |                |       |                     |       |                       |     |       | 03                 | 20.0  | 2.04  | 2.15  | 0.11  | 6.0   |

FONTE: CDRM (CAPTAÇÃO DE JERICÓ, Pesquisa de Manancial Subterrâneo – Relatório Final, 1988)

Assim, com os valores de vazões, os rebaixamentos observados nos poços bombeados e nos de observação e empregado-se os métodos de BOULTON/PRICKET e o de recuperação de JACOB, obteve-se os seguintes resultados:

- Poço Amazonas

BOULTON/PRICKET -  $K = 4,78 \times 10^{-3}$  m/s

JACOB -  $K = 4,78 \times 10^{-3}$  m/s

- Poço Tubular Raso

BOULTON/PRICKET -  $K = 1,33 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

JACOB -  $K = 6.76 \times 10^{-3} \text{ m/s}$

Podemos assim, verificar valores muito altos de permeabilidade encontrados pelos dois métodos citados, no entanto, observa-se que no relatório da CDRM-1988, foi considerado como valor característico  $K = 2,00 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ .



## Capítulo VI

### MODELO MATEMÁTICO E PROGRAMAS UTILIZADOS

#### 6.1 Introdução

Um modelo matemático é a representação simplificada de uma situação real, através de equações matemáticas, onde para os casos de hidrogeologia, são utilizadas as equações que regem o fluxo subterrâneo. Os modelos computacionais na hidrogeologia tiveram um avanço considerável a partir da década de 60 com o também avanço da tecnologia da informática.

O modelo usado nesta pesquisa, já vem sendo utilizado nas pesquisas desenvolvidas por alunos do mestrado orientados pelo Dr. Sarma Seemanapalli. A primeira versão ainda na Linguagem Basic, foi utilizado por Egito (1989), e na versão em Pascal por Sá (1998). Varias foram as modificações feitas no modelo anterior para que fossem atendidos os objetivos desta pesquisa, sendo a principal delas, o reconhecimento de uma discretização de área mais refinada, bem como, a variação nos valores de  $\Delta x$  e  $\Delta y$  em toda malha.

Para a solução da equação de Poisson em um domínio de fluxo bidimensional vertical, o modelo utiliza o método numérico de volume finito, o método iterativo de Gauss-Seidel como critério de convergência para as iterações, as condições de contorno descritas por Dirichlet e Neumann e como dados de entrada as características hidráulicas do aquífero aluvial as margens do Rio Jericó (citadas no capítulo V).

Os dois programas, PTJE-64.PAS e PGDJE-65.PAS (ANEXO I), foram usados para prever o comportamento do aquífero em resposta a ação do bombeamento no poço tubular raso e no poço Amazonas, respectivamente.

## 6.2 Equação de Fluxo dos Poços no Eixo Cartesiano (x,y)

A recarga oriunda das precipitações e a descarga dos poços são exemplos de fontes distribuídas e pontos de sumidouros de água subterrânea, respectivamente. A adição ou o rebaixamento da água subterrânea em um dado sistema, indica que a taxa do volume de saída de fluxo por unidade de volume do aquífero, não é nula, e portanto a equação governante do fluxo em um aquífero homogêneo e isotrópico, é expressa de forma analítica como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) - q = 0 \quad (6.1)$$

ou, em termos de volume finito, método descrito no ANEXO II, como:

$$T_{i-1,j} \frac{h_{i-1,j} - h_{i,j}}{\Delta x^2} + T_{i,j-1} \frac{h_{i,j-1} - h_{i,j}}{\Delta y^2} + T_{i+1,j} \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x^2} + T_{i,j+1} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta y^2} - q_{i,j} = 0 \quad (6.2)$$

onde  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os espaçoes entre os nós,  $q_{i,j}$  = volume de água adicionado ou retirado do aquífero, por unidade de tempo por unidade de área do aquífero para um volume infinitesimal em torno do ponto (i,j) e  $T_{i,m,n}$  e  $T_{j,m,n}$  são as transmissividades do aquífero na direção i e j.

Como as cargas iniciais e as condições de fluxo foram especificados, definimos assim, as condições de contorno do nosso problema.

## 6.3 Discretização da Área no Modelo para Simulação do Poço Tubular Raso

A forma da discretização de uma área, exerce um papel fundamental nos objetivos a serem alcançados, bem como nos resultados a serem obtidos em uma determinada pesquisa. A necessidade de avaliar o comportamento do fluxo subterrâneo nas proximidades de um poço e buscar informações de o tanto quanto as características desta obra de captação pode interferir no funcionamento do sistema aquífero-poço, impõe um maior refinamento da malha de discretização que representa o seu raio de influência (Figura 6.3).

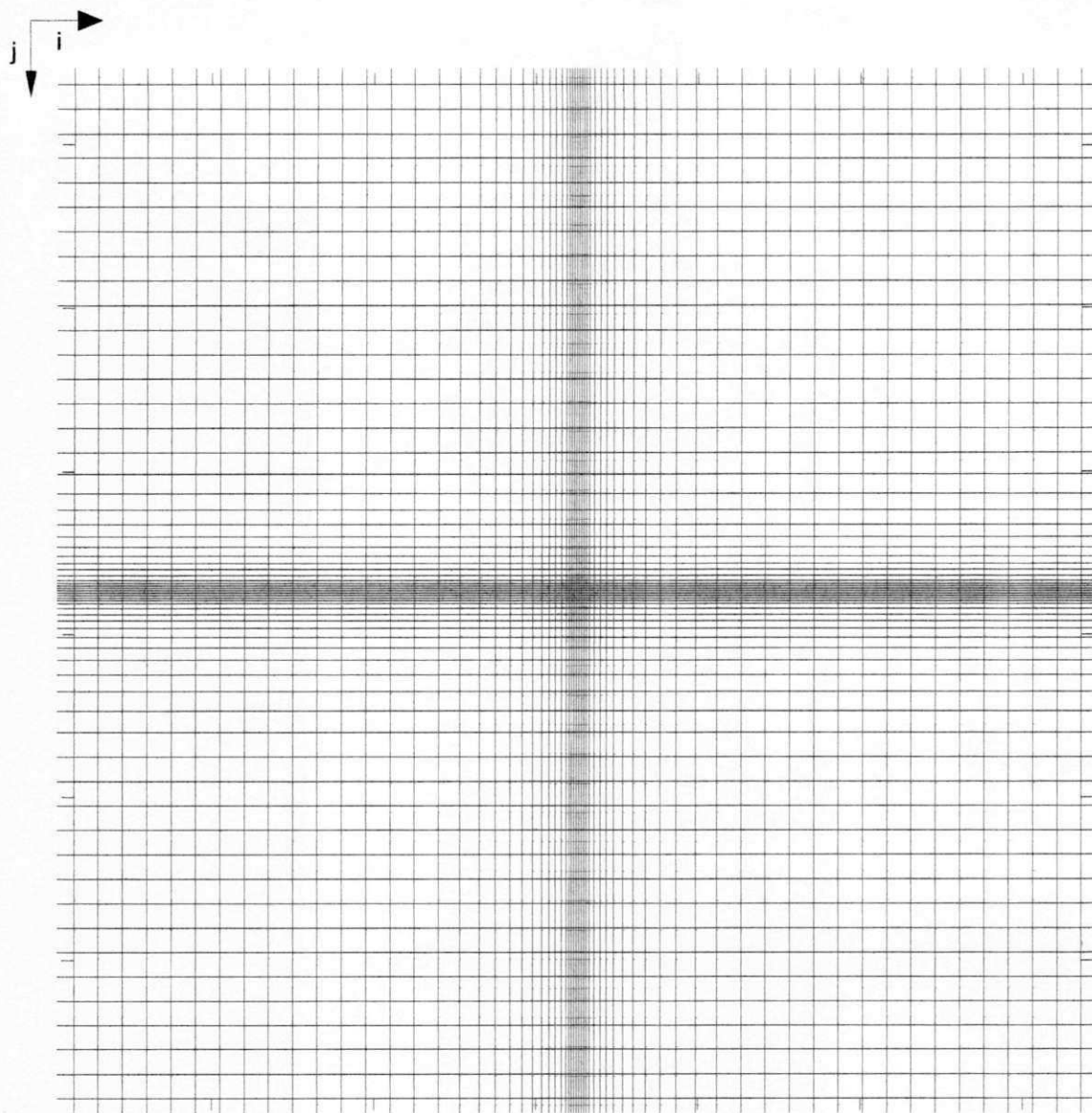


Figura 6.1 - Discretização da Área para Simulação do Poço Tubular Raso – Malha (62 x 64)

Para a simulação do poço tubular raso, foi utilizada uma malha (62 x 64), sendo 62 nós reais e 64 no total, incluindo 2 fictícios para representar a condição de contorno de não fluxo nos limites do aquífero, com uma variação do  $\Delta x$  e  $\Delta y$  de 0,15 à 1,5 m, simulando assim, um raio de influência de 31,08 m. O quadrado central, com dimensões  $\Delta x = 0,15$  e  $\Delta y = 0,15$ , da malha (62x64) foi usado para melhor simular o contorno poço de pequeno diâmetro, sendo a vazão de bombeamento distribuída nos quatro vertes deste quadrado. Com isso, o poço tubular raso deixa de ser considerado como pontual, técnica usada nas versões anteriores do modelo, passando a ser representado por quatro pontos centrais, como mostra a Figura 6.2.

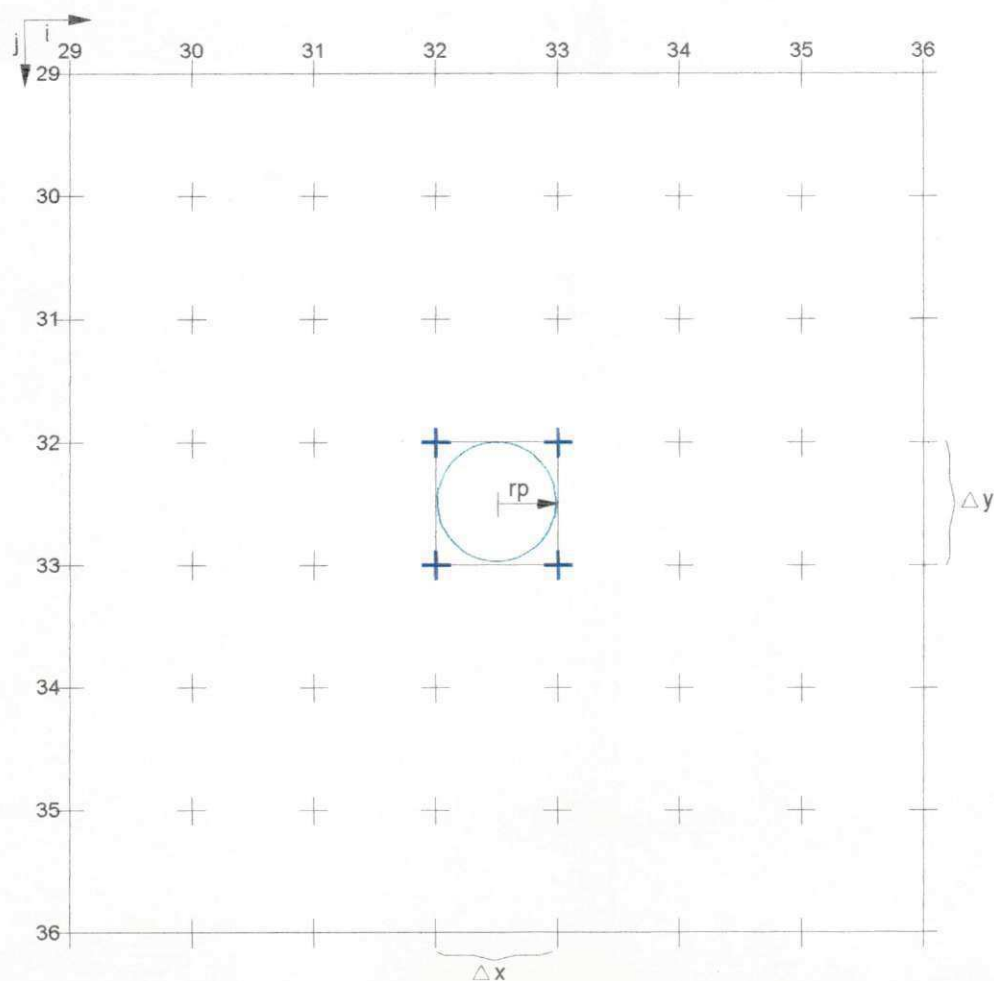


Figura 6.2 - Parte Central da Malha ( 62 X 64 ), Mostrando o Contorno do Poço Tubular Raso Simulado –  $\Delta x = \Delta y = 0,15$  m.

Esta configuração central da malha nos permite obter cargas calculadas, pela equação que governa o fluxo subterrâneo, próximo ao poço, bem como implementar fatores de ajustes que caracterizam a interferência dos componentes de um poço (filtro e pré-filtro) e a diminuição da espessura saturada no sistema aquífero-poço.

#### 6.4 Discretização da Área no Modelo para Simulação do Poço Amazonas

O modelo na versão anterior como Sá (1998), simulava o poço amazonas da mesma forma com que a atual versão simula o poço tubular, onde  $\Delta x = \Delta y$  igual ao diâmetro do poço amazonas. Como os poços amazonas possuem grandes diâmetros e espessura de revestimento em torno de 25 cm, para revestimento de alvenaria, vimos como importância fundamental uma discretização que simule o poço na forma mais circular possível e que considere o

contorno do revestimento. Assim a malha de discretização empregada para a simulação do poço de grande diâmetro tem  $\Delta x$  e  $\Delta y$  variando de 0,25 à 1,5 m, dimensões (63 x 65) e um raio de influência simulado de 24,5 m (Figura 6.3).

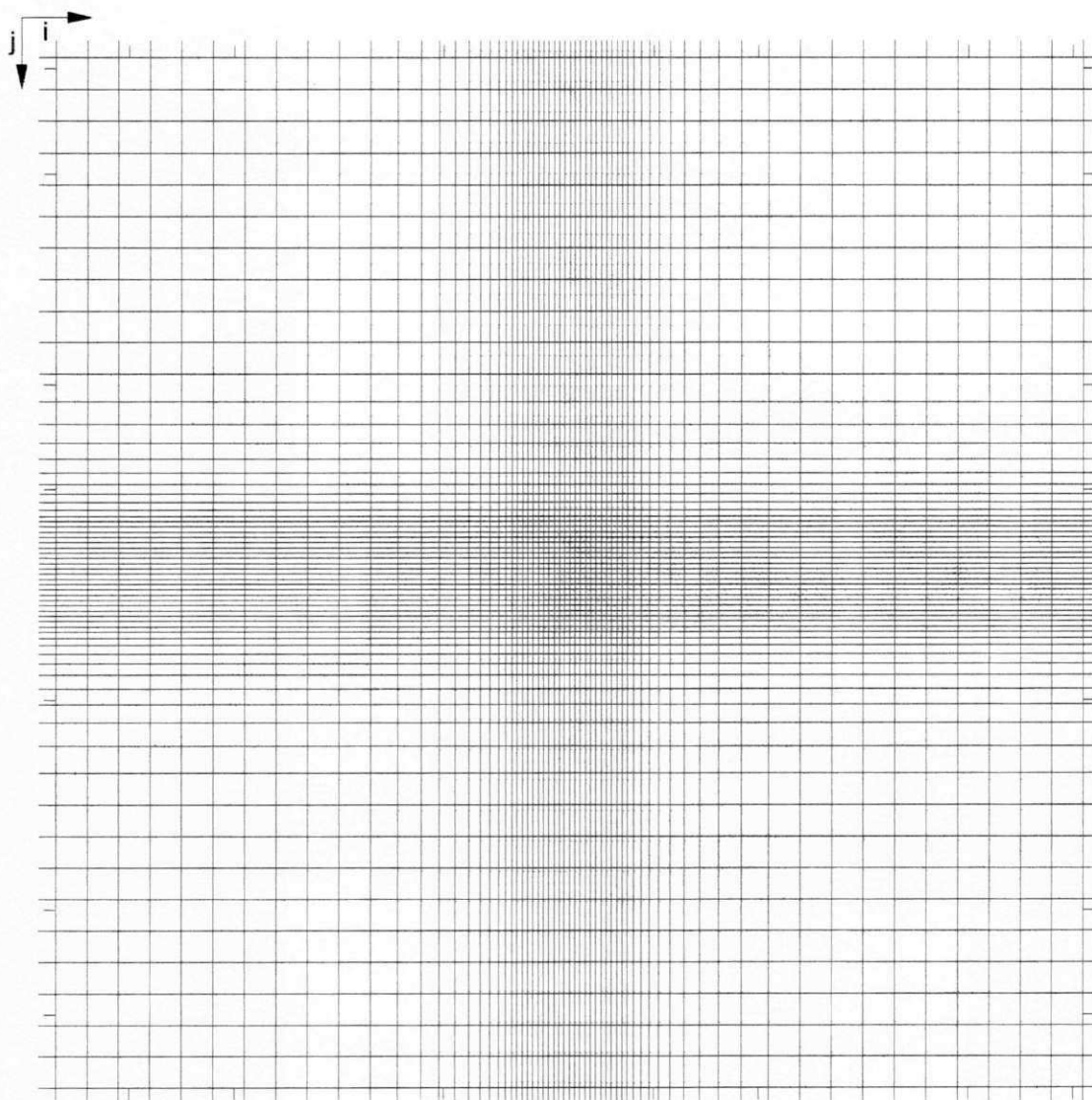


Figura 6.3 - Discretização da Área para Simulação do Poço Amazonas - Malha (63 x 65).

O poço amazonas foi representado, na parte central da malha (63 x 65), por uma gama de pontos, reproduzindo o diâmetro interno e externo do mesmo, conforme a Figura 6.4, onde a vazão de bombeamento é distribuída nos nós do contorno do diâmetro interno. Esta discretização permite implementar fatores de ajustes que atua na consideração das características construtivas do poço em questão, bem como do comportamento do fluxo nas proximidades do mesmo.

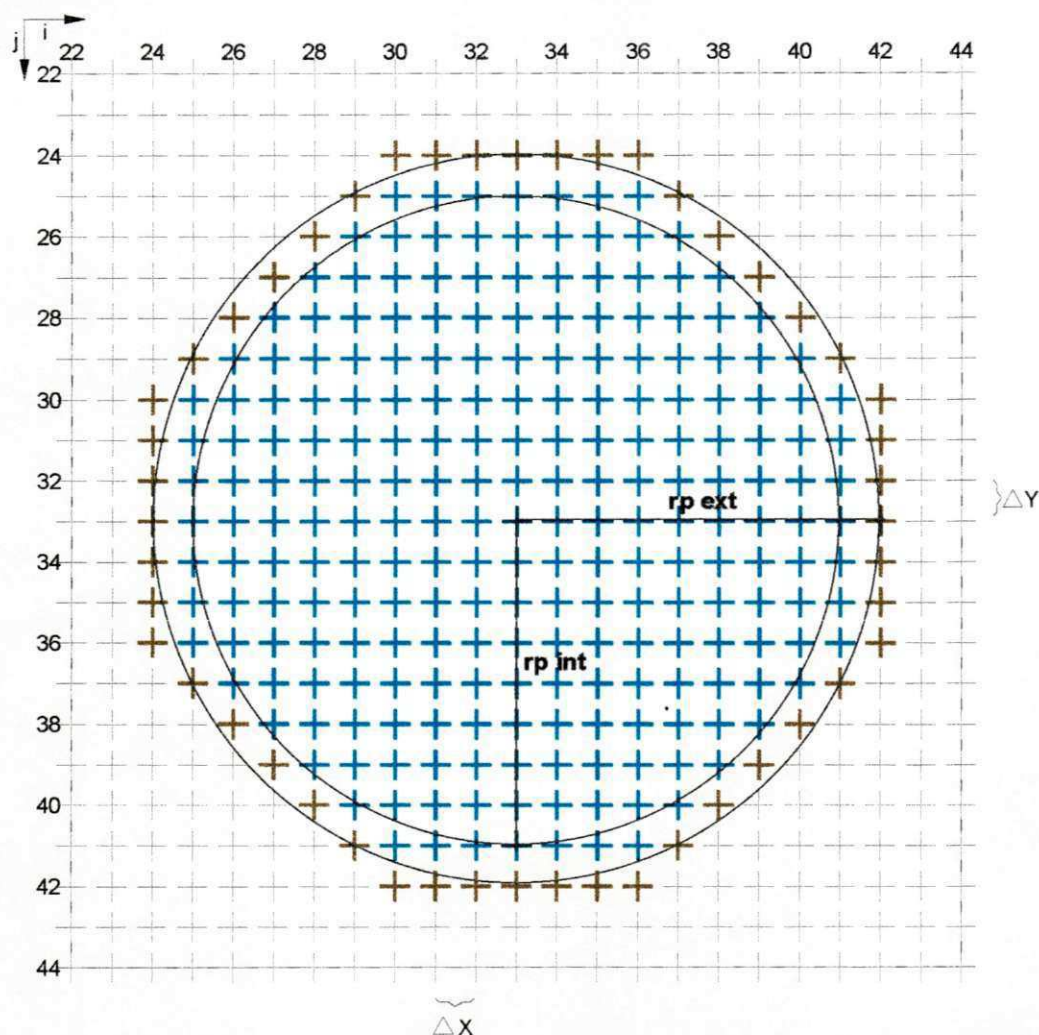


Figura 6.4 - Parte Central da Malha ( 63 X 65 ), Mostrando o Contorno do Poço Amazonas Simulado –  $\Delta x = \Delta y = 0,25$  m.

O refinamento das malhas de discretização obedeceu, para evitar distorções, duas regras práticas, uma de que cada célula não deve ser maior 1,5 (uma vez e meia) a célula vizinha, e a outra é que o comprimento da célula não seja maior que 10 vezes a largura, evitando assim retângulos muito longos.

## 6.5 Processo de Calibração

O processo de calibração para o nosso caso, consiste em reproduzir a piezometria observada e apresentada no relatório da pesquisa de mananciais subterrâneos para abastecer a cidade de Jericó da CDRM, tendo como base os parâmetros mencionados no Capítulo V e a discretização da área através de malhas com suas dimensões e respectivos raios de influências pré-determinados.

Dupuit, em 1863, verificou que nos escoamentos de água subterrânea a declividade da superfície freática é geralmente muito pequena e o escoamento pode ser considerado como praticamente horizontal, assim a carga hidráulica torna-se função apenas das coordenadas horizontais do meio poroso. A validade desta aproximação tem sido analisada por muitos autores, ficando comprovado que a aproximação é aceitável para pequenas declividades da superfície freática e para aquíferos não muito profundos (Wang & Anderson, 1982).

Diante do exposto anteriormente, notamos que a estimativa do raio de influência (Figura 6.5) para a simulação do poço tubular raso, poderia ser feita através da fórmula de Dupuit utilizando as cargas observadas nos piezômetros 2 e 3, distantes do poço de bombeamento 16 e 20 metros respectivamente, e a carga total igual a espessura saturada que implica rebaixamento zero.

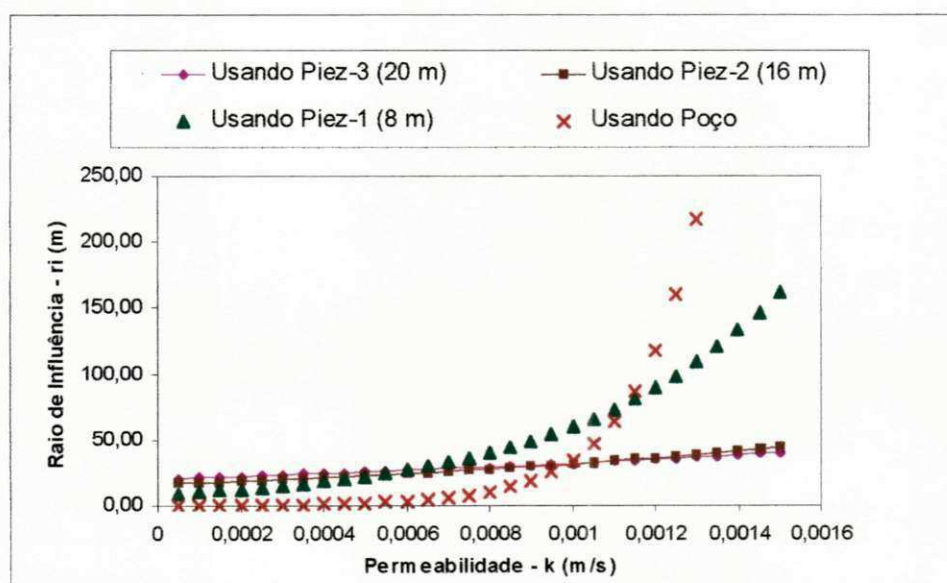


Figura 6.5 – Observação da Variação do Raio de Influência ( $r_i$ ), Usando Dupuit, em função da Permeabilidade do Meio ( $K$ ) e Considerando as Diferentes Cargas Observadas.

Observe na Figura 6.5, que se na fórmula de Dupuit, fossem usadas as cargas observadas no poço de bombeamento e no piezômetro 1 à 8 metros, a variação no cálculo do raio de influência é aproximadamente pequena para valores de permeabilidade até em torno de  $k = 0,0008$  m/s e a partir deste, com pequenos acréscimos de  $k$  teremos variações altas no valor do raio de influência. No entanto, utilizando-se das cargas observadas no piezômetro 2 e 3 podemos observar uma variação, gradual e muito próximas uma da outra, no raio de influência estimado para cada valor de permeabilidade  $k$ , justificando assim, a utilização da equação de Dupuit para a estimativa do raio de influência.

Lançando mão desta observação, verificamos a existência de uma permeabilidade  $k$ , que usada na fórmula de Dupuit juntamente com a carga do piezômetro 2 e posteriormente com a carga do piezômetro 3, teremos a mesma estimativa do raio de influência, ou seja, encontraremos um mesmo valor de  $r_i$ . Sendo assim, este valor de permeabilidade e raio de influência associado a esta, foram usados como valores iniciais de calibração para o poço tubular raso.

O ajuste foi obtido por tentativa, fazendo variar o valor da permeabilidade nos dados de entrada do modelo mantendo o raio de influência inicial e conseqüentemente a malha fixa, até que as cargas no piezômetros 2 e 3 fossem calibradas. A observação que deve ser feita para a validação desta etapa é que se o valor da permeabilidade, necessário para ajustar os valores encontrados com o modelo aos de campo, não diferir muito do valor inicial estimado a condição de malha fixa não implica em erro na calibração, pois como foi citado anteriormente a variação na estimativa do raio de influência, usando os piezômetros 2 e 3, mostrou-se pouco sensível a pequena variação no valor da permeabilidade, justificando assim, a condição de malha e raio de influência fixos.

Calibrado os piezômetros 2 e 3, foi necessário implementar um fator de ajuste para corrigir o efeito da redução da espessura saturada na estimativa de cargas nas proximidades do poço até o piezômetro 1, com carga observada conhecida e conseqüentemente que temos que calibrar. O fator de ajuste ( $f_1$ ) no processo de calibração foi alterado tanto no seu valor como a abrangência de atuação, partindo de um raio próximo ao poço até em torno do piezômetro 1, estando assim, de acordo com os valores dos raios que regulamentam o uso das equações 4.2 e 4.3 usadas, juntamente com fórmulas empíricas, para melhor representar a superfície freática nas proximidades do poço.

Outro fator de ajuste usado para que todos os parâmetros observados no teste de bombeamento no poço tubular raso fossem calibrados foi o  $f_2$ , tendo este a função de considerar o efeito da estrutura do poço e o comportamento do fluxo de entrada no mesmo, na estimativa da carga no poço. O fator  $f_2$  abrange um raio de 0,3 m em torno do poço.

A representação dos parâmetros observados no teste de bombeamento usando o poço amazonas tornou-se mais simples devido a consideração de que, como os poços estão na mesma área aquífera e distantes apenas 80 metros um do outro, a permeabilidade que caracteriza a formação do aquífero definida após calibrado os parâmetros do poço tubular foi



usada como o valor de permeabilidade da formação também no modelo do poço amazonas. Logo o raio de influência e conseqüentemente a malha usada na simulação do poço amazonas foram estimados através da fórmula de Dupuit, com a permeabilidade citada e os parâmetros do piezômetro 2, que neste caso encontra-se a 16 metros do poço amazonas.

Nesta etapa de calibração do modelo de poço amazonas, foi ajustado as cargas no piezômetros 1 e 2, sendo necessário apenas implementar um fator de ajuste  $f$  que considera o efeito das características construtivas do poço amazonas na carga hidráulica do próprio poço. O fator  $f$  foi considerado com abrangência do raio interno do poço até uma distância em torno de 0,5 m do raio externo, para que fossem encontrados valores de carga no poço próximos ao valor de campo.

## Capítulo VII

### ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 7.1 Calibragem do Modelo usando Poço Tubular raso

No processo de calibragem do modelo, usando o teste de bombeamento no poço tubular raso descrito no item 6.6 do capítulo anterior, foi considerado uma malha fixa (62x64), que representa um raio de influência  $r_i = 31,08$  m, definida a partir da estimativa inicial de uma permeabilidade  $k = 1,07 \times 10^{-3}$  m/s, vazão  $Q = 29,00$  m<sup>3</sup>/h e os resultados de cargas hidráulicas observadas no piezômetros 2 e 3, apresentados no relatório da CDRM. Assim a piezometria observada foi aproximadamente reproduzida (Tabela 7.1), por tentativa e erro, alterando o valor da permeabilidade e dos fatores de ajustes em suas magnitudes e áreas de atuação.

Tabela 7.1 – Comparação entre os rebaixamentos de campo e calibrados (em metros)

|        | Poço | Piez. 01 | Piez. 02 | Piez. 03 |
|--------|------|----------|----------|----------|
| Campo  | 1,69 | 0,49     | 0,16     | 0,11     |
| Modelo | 1,69 | 0,48     | 0,17     | 0,12     |

Observa-se uma reprodução satisfatória dos rebaixamentos nos quatro pontos de observação em campo, sendo assim, ficou estabelecido como valores dos parâmetros que caracterizam o funcionamento do sistema aquífero-poço tubular raso com taxa de bombeamento  $Q = 29,00 \text{ m}^3/\text{h}$ , os seguintes:

- Raio de Influência  $r_i$ :

$r_i = 31,08 \text{ m}$  – encontrado usando a equação de Dupuit

- Permeabilidade  $k$ :

$k = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  - atuando em toda a malha, pois caracteriza o aquífero.

- Fator Ajuste  $f1$ :

$f1 = 0,2$  (adimensional) – responsável pela correção da espessura saturado, atuando para  $r_{\text{poço}} < r < 9,0 \text{ m}$ .

- Fator de Ajuste  $f2$ :

$f2 = 0,085$  (adimensional) – responsável pela correção da permeabilidade no pré-filtro e filtro do poço, atuando para  $r_{\text{poço}} < r < 0,3 \text{ m}$ .

- Vazão de Bombeamento:

$Q = 29,00 \text{ m}^3/\text{h}$  – distribuída nos quatro pontos centrais da malha.

## 7.2 Calibragem do Modelo usando Poço Amazonas

A calibragem do modelo usando o teste de bombeamento do poço Amazonas, tornou-se mais simples devido a consideração de que a permeabilidade  $k = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  calibrado no modelo do poço tubular raso, também caracteriza o aquífero próximo ao poço Amazonas, devido a distância ser de apenas 80 metros entre os dois poços. Com a permeabilidade já definida utilizou-se da equação de Dupuit para estimar um raio de influência  $r_i = 24,5 \text{ m}$ , simulado através de uma malha (63x65), vazão  $Q = 65 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Assim, usando tais parâmetros e o fator de ajuste estabelecido para corrigir a permeabilidade nas proximidades do poço em bombeamento, foi aproximadamente reproduzido a piezometria observado no poço amazonas e piezômetros 1 e 2 instalados pela CDRM, conforme mostra a Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Comparação entre os rebaixamentos de campo e calibrados (em metros)

|        | Poço | Piez. 01 | Piez. 02 |
|--------|------|----------|----------|
| Campo  | 0,91 | 0,36     | 0,22     |
| Modelo | 0,9  | 0,40     | 0,20     |

Observa-se que também para o modelo usando poço amazonas ocorreu uma reprodução satisfatória dos rebaixamentos nos três pontos de observação em campo, com isso, ficou estabelecido como valores dos parâmetros que caracterizam o funcionamento do sistema aquífero-poço amazonas com taxa de bombeamento  $Q = 65,00 \text{ m}^3/\text{h}$ , os seguintes:

- Raio de Influência  $r_i$ :

$$r_i = 24,50 \text{ m} - \text{encontrado usando a equação de Dupuit}$$

- Permeabilidade  $k$ :

$$k = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s} - \text{atuando em toda a malha, pois caracteriza o aquífero.}$$

- Fator Ajuste  $f$ :

$$f = 0,018 \text{ (adimensional)} - \text{responsável pela correção da permeabilidade no pré-filtro e filtro do poço, atuando para } r_{\text{poço}} < r < 0,5 \text{ m.}$$

- Vazão de Bombeamento:

$$Q = 65,00 \text{ m}^3/\text{h} - \text{distribuída nos pontos que representa o contorno do raio interno do poço.}$$

### 7.3 Simulações Realizadas usando o Modelo para Poço Tubular

Após a calibragem, foram introduzidas características diferentes ao modelo que representa o sistema aquífero-poço tubular raso, com a finalidade de promover através de simulações um melhor entendimento do comportamento do mesmo em resposta a tais alterações.

#### 7.3.1 Mudança nos Fatores de Ajustes

Houve a necessidade de introduzir dois fatores de ajuste ao longo do raio de influência para encontrar os rebaixamentos nos respectivos poços de produção e observação. A consideração de fatores de ajustes diferentes dos de calibração, implica simular uma ocorrência em maior ou em menor grau da redução na espessura saturada quando for alterado o fator de ajuste  $f_1$  e a ocorrência em maior ou em menor grau da resistência que a estrutura construtiva do poço (filtro e pré-filtro) promova na entrada do fluxo quando alterado a fator de ajuste  $f_2$ .

As Tabelas 7.3a e 7.3b mostram os resultados de rebaixamentos obtidos no poço bombeado considerando diferentes valores dos fatores de ajustes  $f_1$  e  $f_2$ , respectivamente.

Tabela 7.3a – Resultados das simulações considerando  $f_2 = 1$  e alterando o valor de  $f_1$

| Fator $f_1$<br>(adimensional) | 0,09 | <b>0,2</b> | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  |
|-------------------------------|------|------------|------|------|------|------|
| Rebaixamento<br>$s_p$ (m)     | 2,7  | 1,23       | 0,75 | 0,58 | 0,49 | 0,42 |

Tabela 7.3b – Resultados das simulações considerando  $f_1 = 1$  e alterando o valor de  $f_2$

| Fator $f_2$<br>(adimensional) | 0,05 | <b>0,085</b> | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,0  |
|-------------------------------|------|--------------|------|------|------|------|------|
| Rebaixamento<br>$s_p$ (m)     | 0,58 | 0,51         | 0,46 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,42 |

Ao considerar  $f_2 = 1$ , implica dizer que o poço é 100% eficiente, logo não oferece nenhuma resistência a entrada do fluxo através de sua estrutura construtiva, sendo assim, a simulação apresentada na Tabela 7.3a permite uma avaliação da influência da redução na espessura saturada, fato este comum em aquífero livre, no rebaixamento previsto para o poço em bombeamento.

Na segunda simulação apresentada na Tabela 7.3b onde  $f_1 = 1$  e o valor de  $f_2$  foi alterado, temos uma situação em que o aquífero livre está se comportando como um aquífero confinado, ou seja, não ocorre redução da espessura saturada, logo neste caso observa-se apenas a influência do material usado no desenvolvimento do pré-filtro e filtro no rebaixamento a ser encontrado no poço.

A partir das Tabelas 7.3a e 7.3b foram construídos os gráficos apresentados em seguida, objetivando possibilitar um melhor entendimento do efeito da mudança dos fatores de ajustes no rebaixamento a ser obtido no poço de bombeamento.

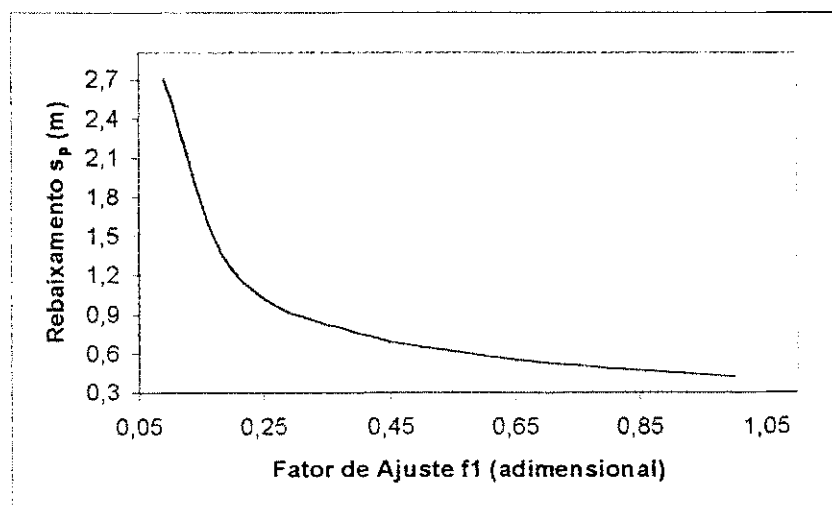


Figura 7.1 - Resultados das simulações considerando  $f_2 = 1$  (fator de ajuste do poço) e fazendo variar  $f_1$  (fator de ajuste da espessura saturada).

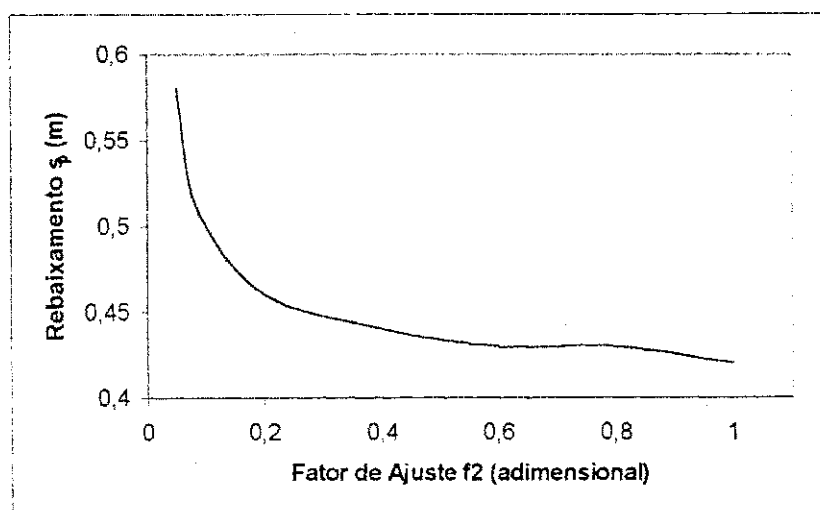


Figura 7.2 - Resultados das simulações considerando  $f_1 = 1$  (fator de ajuste da espessura saturada) e fazendo variar  $f_2$  (fator de ajuste do poço).

### 7.3.2 Mudança na Vazão de Bombeamento

A vazão de bombeamento desenvolve um papel importante na eficiência e vida útil de um sistema de captação de água subterrânea, pois um dos sérios problemas deste tipo de captação é a superexploração. Sendo assim, através da simulação do modelo usando valores diferentes para a vazão, diferindo para maior e menor do valor da vazão de calibragem, podemos analisar o comportamento do rebaixamento em resposta a diferentes vazões, conforme mostra a Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Rebaixamento Observado no Poço com Aplicações Diferentes de Vazões.

|                                    |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vazões Q<br>(m <sup>3</sup> /h)    | 14,00 | 19,00 | 24,00 | 29,00 | 34,00 | 39,00 | 44,00 |
| Rebaixamento<br>s <sub>p</sub> (m) | 0,71  | 1,01  | 1,34  | 1,69  | 2,06  | 2,50  | 3,02  |

A partir da Tabela 7.4, foi confeccionado a Figura 7.3 para uma melhor visualização da influência do vazão no rebaixamento esperado para o poço em bombeamento.

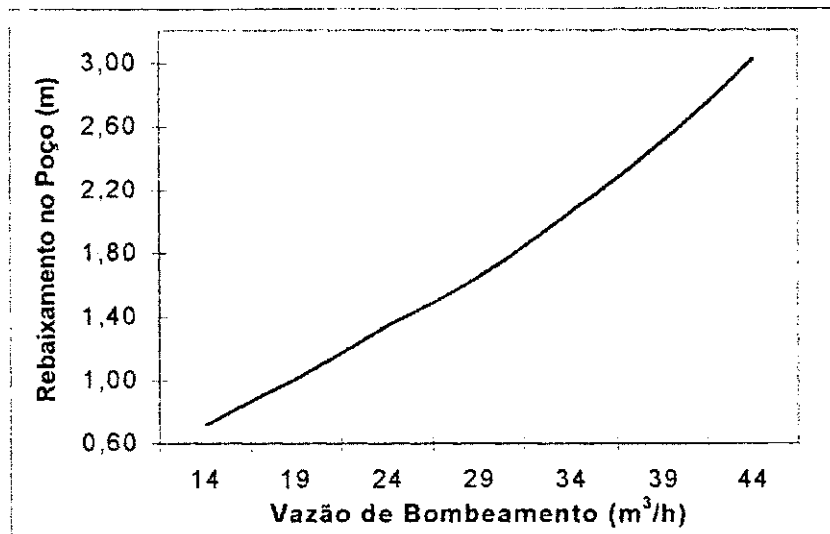


Figura 7.3 - Resultados das simulações considerando Vazões de bombeamento diferente da explorada.

No instante em que temos simulações que relacionam os rebaixamentos no poço de produção com suas respectivas vazões (Tabela 7.4), podemos então avaliar a eficiência do poço usando a comparação do rebaixamento teórico com o real, que também é usada no método do diagrama das distâncias e rebaixamento, sendo que para o nosso caso foi considerado o rebaixamento teórico aquele obtido quando da simulação promovida para  $f1 = 0,2$  (da calibragem) e  $f2 = 1$ , isto é o poço não oferece nenhuma resistência a entrada do fluxo, logo é 100% eficiente, mas foi considerado o efeito da redução da espessura saturada.

Assim a Tabela 7.5a mostra o comportamento da eficiência do poço em resposta a variação da vazão de bombeamento. No entanto a Tabela 7.5b mostra o comportamento da eficiência do sistema aquífero-poço, quando da utilização de simulações que considera o  $f1 = f2 = 1$ , isto é, não existe perdas com a redução da espessura saturada e nem no poço, e assim o sistema seria 100% eficiente, logo da mesma forma que foi avaliada a eficiência do poço para diferentes vazões também avaliamos a eficiência do sistema aquífero-poço.



Tabela 7.5a – Cálculo da Eficiência do Poço devido a mudança na vazão de Bombeamento

| Vazões<br>Q (m <sup>3</sup> /h)                        | 14,00 | 19,00 | 24,00 | <b>29,00</b> | 34,00 | 39,00 | 44,00 |
|--|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| (1) Rebaixamento<br>(m), para f1 = 0.2 e<br>f2 = 0.085 | 0,71  | 1,01  | 1,34  | <b>1,69</b>  | 2,06  | 2,50  | 3,02  |
| (2) Rebaixamento<br>(m), para f1 = 0,2 e<br>f2 = 1     | 0,55  | 0,77  | 0,99  | <b>1,23</b>  | 1,48  | 1,75  | 2,04  |
| Eficiência<br>E (%) = (2) / (1)                        | 77    | 76    | 74    | <b>73</b>    | 72    | 70    | 67    |

Tabela 7.5b – Cálculo da Eficiência do Sistema Aquífero-Poço devido a mudança na vazão de Bombeamento

| Vazões<br>Q (m <sup>3</sup> /h)                        | 14,00 | 19,00 | 24,00 | <b>29,00</b> | 34,00 | 39,00 | 44,00 |
|--|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| (1) Rebaixamento<br>(m), para f1 = 0.2 e<br>f2 = 0.085 | 0,71  | 1,01  | 1,34  | <b>1,69</b>  | 2,06  | 2,50  | 3,02  |
| (2) Rebaixamento<br>(m), para f1 = 1 e<br>f2 = 1       | 0,19  | 0,27  | 0,34  | <b>0,42</b>  | 0,50  | 0,59  | 0,69  |
| Eficiência<br>E (%) = (2) / (1)                        | 27    | 27    | 25    | <b>25</b>    | 24    | 24    | 22    |

A partir das Tabelas 7.5a e 7.5b, foram geradas as Figuras 7.4a e 7.4b, para uma melhor visualização do comportamento da eficiência do poço e do sistema aquífero-poço, respectivamente, em resposta a variação da vazão de bombeamento em um poço Amazonas.

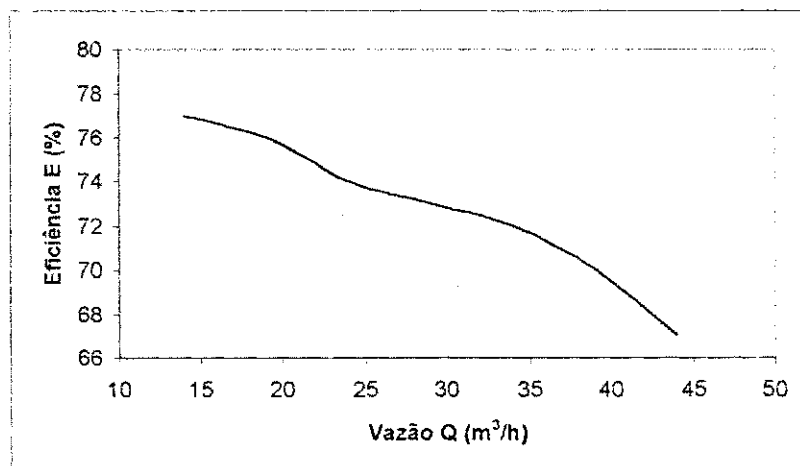


Figura 7.4a - Variação da Eficiência do Poço Tubular Raso para Valores Diferentes na Vazão de Bombeamento.

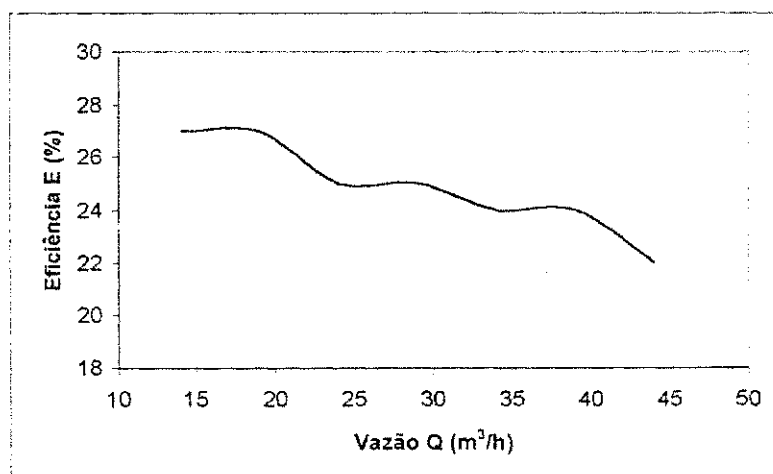


Figura 7.4b - Variação da Eficiência do do Sistema Aquífero-Poço Tubular para Valores Diferentes na Vazão de Bombeamento.

Verifica-se nas Figuras 7.4a e 7.4b uma oscilação nos valores de eficiência em relação as vazões simuladas, devido a não consideração de que para menores valores de vazões teríamos que considerar também uma menor efeito dos fatores de ajustes, e para vazões acima da vazão utilizada para a calibração do modelo teríamos que considerar um efeito maior principalmente do fator de ajuste  $f_1$ , que trata do efeito da redução da espessura saturada no rebaixamento do poço.

## 7.4 Simulações Realizadas usando o Modelo para Poço Amazonas

O procedimento para as simulações no modelo de poço amazonas são os mesmos adotados no modelo de poço tubular, onde foram introduzidas características diferentes ao modelo que representa o sistema aquífero-poço amazonas, com a finalidade de promover um melhor entendimento do seu comportamento em resposta a essas modificações. Uma outra simulação necessária diz respeito a consideração de diâmetros diferentes para o poço amazonas em questão, tendo como objetivo verificar a existência de um diâmetro mais econômico e conseqüentemente mais eficiente.

### 7.4.1 Mudança no Fator de Ajuste

Neste modelo para poço amazonas foi necessário apenas uma fator de ajuste  $f$  que atua na calibragem da carga a ser encontrada no poço de produção, logo nesta etapa de simulação foram estimados valores de rebaixamento utilizando valores diferentes do fator de ajuste  $f$ , conforme mostra a Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Rebaixamento Observado no Poço com Diferentes do Fator de Ajuste  $f$ .

|                             |       |       |       |       |      |      |      |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| Fator $f$<br>(adimensional) | 0,004 | 0,006 | 0,008 | 0,018 | 0,06 | 0,2  | 1,0  |
| Rebaixamento<br>$s_p$ (m)   | 2,76  | 1,84  | 1,46  | 0,9   | 0,62 | 0,53 | 0,49 |

Assim, ao considerar  $f = 1$  implica dizer que o poço amazonas é 100% eficiente, logo não oferece nenhuma resistência a entrada do fluxo através de sua estrutura construtiva, e a simulação apresentado na Tabela 7.6 com a utilização de fatores  $f$  que variam de 0,0018 até 1,0 permite uma avaliação da influência desta resistência a entrada do fluxo no rebaixamento previsto para o poço amazonas. A variação do rebaixamento devido a consideração de valores diferentes para  $f$ , pode ser melhor visualizada na Figura 7.5.

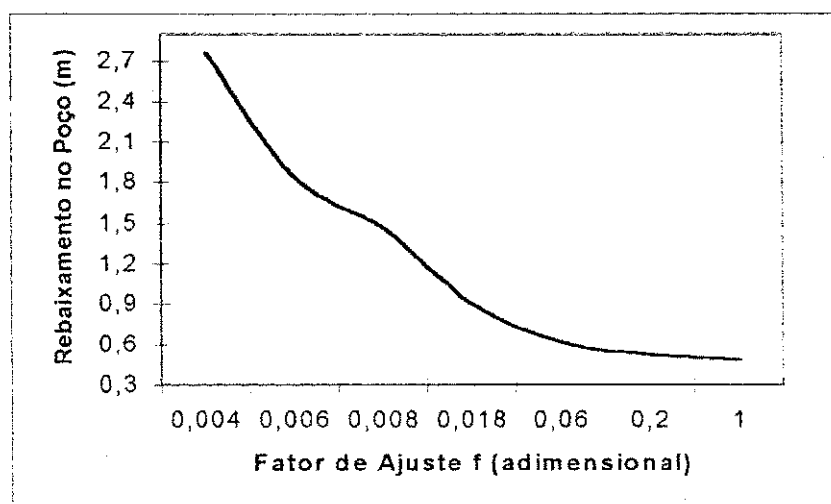


Figura 7.5 - Resultados das simulações fazendo variar  $f$  (fator de ajuste do poço amazonas).

### 7.4.2 Mudança na Vazão de Bombeamento

A vazão escolhida como vazão de exploração de um determinado poço, deve ser bem definida para que sejam evitados prejuízos futuro no rendimento do poço e do aquífero, sendo assim, a simulação do rebaixamento no poço amazonas utilizando diferentes valores de vazões de bombeamento visa identificar o comportamento do sistema caso fossem retiradas quantidades maiores ou menores de água do que a prevista no teste de bombeamento.

A Tabela 7.7 mostra a variação do rebaixamento observado no poço de produção caso a vazão de bombeamento estivesse acima ou abaixo do valor de calibragem.

Tabela 7.7 - Rebaixamento Observado no Poço com Aplicações Diferentes de Vazões.

| Vazões Q<br>(m <sup>3</sup> /h) | 35,00 | 45,00 | 55,00 | <b>65,00</b> | 75,00 | 85,00 | 95,00 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| Rebaixamento<br>$s_p$ (m)       | 0,45  | 0,60  | 0,75  | <b>0,9</b>   | 1,06  | 1,43  | 1,60  |

O comportamento do rebaixamento esperado no poço amazonas devido as varias vazões simulados, pode ser melhor visualizado no Figura 7.6, confeccionado a partir dos resultados da Tabela 7.7

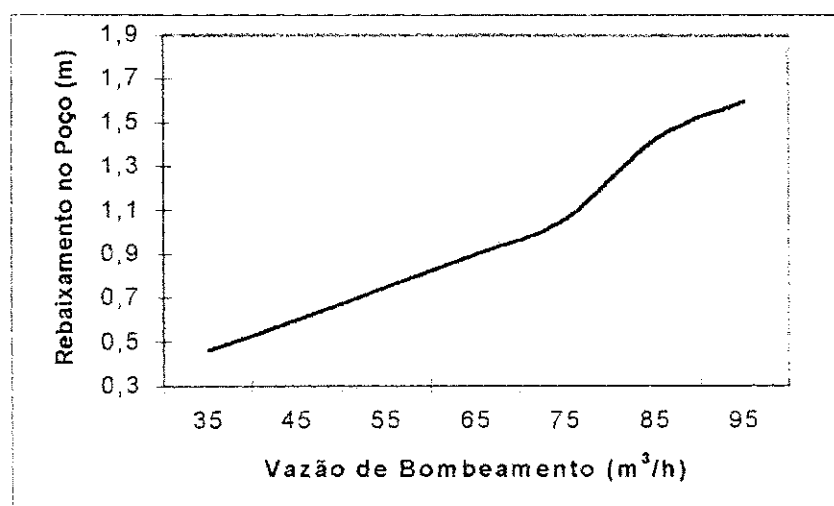


Figura 7.6 - Resultados das simulações considerando Vazões de bombeamento diferente da explorada.

De posse dos resultados expostos na Tabela 7.7 e promovendo simulações com a mesma variação de vazão e considerando o fator de ajuste  $f = 1$ , logo o poço 100% eficiente, podemos assim, avaliar o comportamento da eficiência do poço com relação a vazão de bombeamento, conforme a Tabela 7.8 e para um melhor entendimento a Figura 7.7.

Tabela 7.8 – Cálculo da Eficiência do Poço Amazonas devido a mudança na vazão de Bombeamento

| Vazões<br>Q (m³/h)                        | 35,00 | 45,00 | 55,00 | 65,00 | 75,00 | 85,00 | 95,00 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (1) Rebaixamento<br>(m), para $f = 0.018$ | 0,45  | 0,60  | 0,75  | 0,9   | 1,06  | 1,43  | 1,60  |
| (2) Rebaixamento<br>(m), para $f = 1$     | 0,25  | 0,33  | 0,41  | 0,49  | 0,57  | 0,66  | 0,73  |
| Eficiência<br>$E (\%) = (2) / (1)$        | 55    | 55    | 55    | 54    | 54    | 46    | 46    |

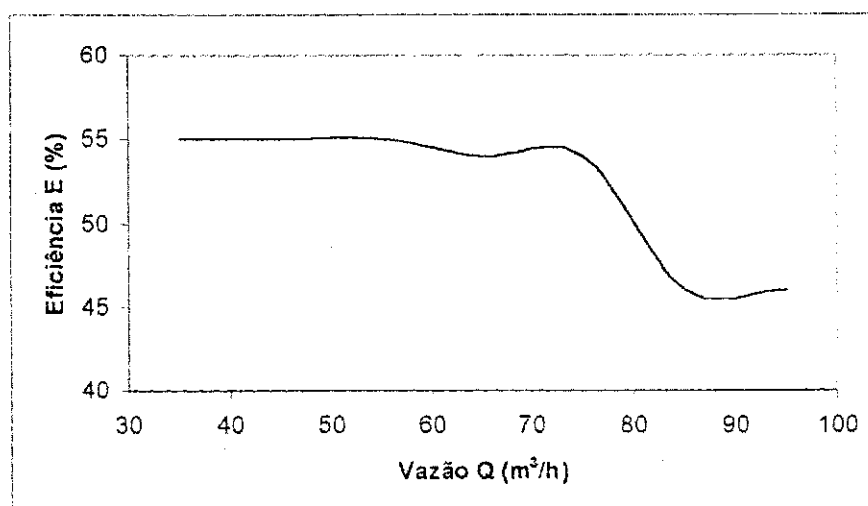


Figura 7.7 - Variação da Eficiência do Poço Amazonas para Valores Diferentes na Vazão de Bombeamento.

Observado o comportamento das curvas nas Figuras 7.5 e 7.6 vimos que existem ligeiras mudanças na curvatura destas, sejam nas relações rebaixamento versus fator de ajuste ou rebaixamento versus vazão de bombeamento fato este ocorrido sempre em torno do rebaixamento  $s_p$  de 1,1 à 1,5 metros. Isso embora possa parecer difícil de entender, porém pode ser facilmente explicado devido uma situação insipiente ou threshold, e até mesmo, o que deve ser mais provável, devido a necessidade da utilização de mais um fator de ajuste que passaria a atuar a partir dos rebaixamentos citados. Tal fator de ajuste seria calibrado caso fosse promovido um teste de bombeamento usando vazões superiores à 75 m<sup>3</sup>/h, podendo assim, melhor avaliar a eficiência para vazões superiores a vazão de calibração.

Ainda a respeito do comportamento da eficiência em relação a vazão empregada, deveríamos considerar uma correção no fator de ajuste  $f$ , com a finalidade de diminuir o seu efeito no sistema aquífero-poço nas simulações de rebaixamento usando vazões menores do que a de calibração, enquanto para vazões de simulação maiores teríamos que corrigir o fator de ajuste  $f$  para representar uma maior atuação deste na simulação dos rebaixamentos, pois essa variação no valor do fator de ajuste  $f$  provavelmente ocorre no sistema real.

### 7.4.3 Mudança no Diâmetro do Poço

O poço amazonas por ser de grande diâmetro traz consigo a idéia de que quanto maior o seu diâmetro maior será a vazão fornecida pela captação da água subterrânea. Logo temos que ter muito cuidado, pois quanto maior for o diâmetro maior será também os custo de construção deste poço.

A particularidade deste tipo de poço é que ele funciona como um reservatório, assim no início do bombeamento a água retirada pertence ao armazenamento do poço e após um determinado tempo de bombeamento que segundo Papadopulos e Cooper (1967) este tempo  $t = 25 r_p^2/T$ , onde  $r_p$  é o raio do poço e T a transmissividade do aquífero, passa a ser retirado água do aquífero. Assim ao cessar o bombeamento o poço continua a retirar água do aquífero para retomar o ser armazenamento inicial necessitando de um tempo de recuperação muito grande dependendo da dimensão do seu diâmetro.

Assim, uma simulação de poços com diâmetros que possivelmente poderiam ser utilizados no aquífero em estudo torna-se importante para buscar um suporte maior na tomada de decisão na escolha de um diâmetro mais adequado. Para tal simulação tivemos o cuidado de corrigir o fator de ajuste  $f$ , relacionando este fator de ajuste com o comprimento da circunferência considerado para o poço, usando o seguinte critério:

- Como para  $D = 4,00$  metros, encontramos na calibração  $f = 0,018$ , temos:

$$f_{ref.} = \frac{0,018}{2\pi \cdot (r_{pcai.} + 0,5)}$$

onde  $f_{ref.}$  é o fator de ajuste de referência para definir os fatores de ajuste para poços com outros diâmetros,  $r_{pcai.}$  é o raio do poço calibrado ( $r_{pcai} = 2,0$  m) e 0,5 m é a distância até onde o fator de ajuste atua depois do raio do poço. Assim o fator de ajuste  $f_D$ , isto é, fator de ajuste para cada diâmetro será:

$$f_D = f_{ref.} \cdot 2\pi(r_p + 0,5) = \frac{0,018}{2\pi(r_{pcai.} + 0,5)} \cdot 2\pi(r_p + 0,5)$$

Como  $r_{\text{pca}} = 2,00$  m, o fator de ajuste  $f$  para cada diâmetro (Tabela 7.9) foi definido pela expressão a seguir:

$$f_D = 0,00721 \cdot (r_p + 0,5)$$

Tabela 7.9 – Valores Corrigidos de  $f$  para cada Diâmetro Simulado

| Diâmetro $D_p$<br>(m)       | 2,5     | 3,0     | 3,5     | 4,0          | 4,5     | 5,0     |
|-----------------------------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| Fator $f$<br>(adimensional) | 0,01262 | 0,01442 | 0,01622 | <b>0,018</b> | 0,01983 | 0,02163 |

O comportamento do rebaixamento no poço para diferentes diâmetro de poço (Tabela 7.10), tem papel importante na definição de um diâmetro que proporcione o menor custo de bombeamento associado a menor custo de construção.

Tabela 7.10 - Rebaixamento Observado com Aplicações de Diferentes Diâmetros do Poço

| Diâmetro<br>$D_p$ (m)     | 2,5  | 3,0  | 3,5  | 4,0 | 4,5  | 5,0  |
|---------------------------|------|------|------|-----|------|------|
| Rebaixamento<br>$s_p$ (m) | 1,47 | 1,12 | 0,99 | 0,9 | 0,79 | 0,78 |

A eficiência do poço em resposta a variação no seu diâmetro, mostrado na Tabela 7.11, pode ser enfim avaliada após a simulação do rebaixamento esperado considerando o fator de ajuste de calibração, apresentados na Tabela 7.10 e a simulação para encontrar o rebaixamento teórico considerando o fator de ajuste  $f = 1$ .



Tabela 7.11 – Comportamento da Eficiência do Poço Amazonas com Relação a Variação do seu Diâmetro

| Diâmetro<br>$D_p$ (m)  | 2,5  | 3,0  | 3,5  | <b>4,0</b>  | 4,5  | 5,0  |
|--|------|------|------|-------------|------|------|
| <b>(1)</b> Rebaixamento<br>(m), para f de acordo<br>com a Tabela 7.9 | 1,47 | 1,12 | 0,99 | <b>0,9</b>  | 0,79 | 0,79 |
| <b>(2)</b> Rebaixamento<br>(m), para $f = 1$                         | 0,53 | 0,49 | 0,49 | <b>0,49</b> | 0,46 | 0,46 |
| Eficiência<br>$E (\%) = (2) / (1)$                                   | 36   | 44   | 49   | <b>54</b>   | 61   | 61   |

A Figura 7.8, confeccionada a partir da Tabela 7.11, mostra a representação gráfica do comportamento da eficiência para diversos valores de diâmetro considerado para o Poço Amazonas em estudo.

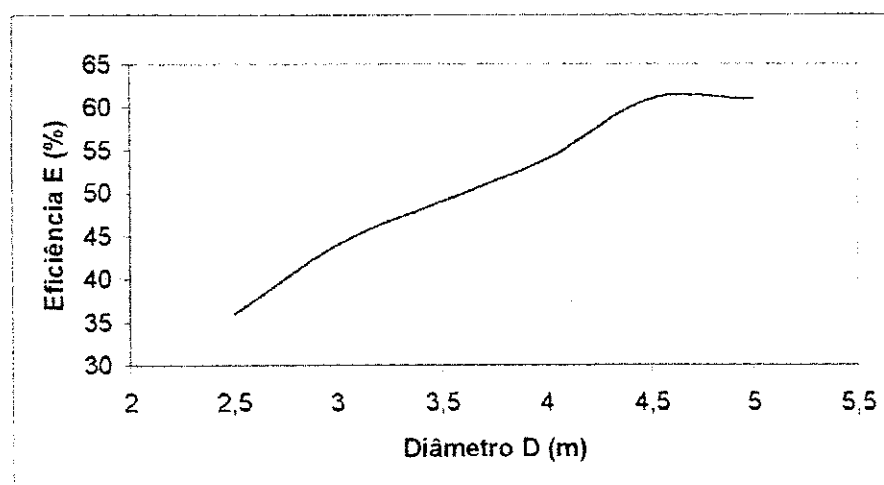


Figura 7.8 – Variação da Eficiência do Poço Amazonas em Resposta variação do seu Diâmetro.

## Capítulo VIII

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 8.1 Conclusões

Este trabalho aparece como mais um estudo sobre a linha de pesquisa que foi iniciada na nossa área, mas enfatiza a necessidade de dar continuação por reconhecer o importância de tal estudo no sertão paraibano voltado na busca de um melhor aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos dentro de um conceito de desenvolvimento sustentável, no instante em que estimula a construção de poços amazonas. Algumas conclusões importantes foram encontradas e enumeradas a seguir:

- O refinamento na discretização da área abrangida pelo raio de influência dos poços, nos permite uma melhor estimativa da permeabilidade da formação do aquífero ( $K= 1 \times 10^{-3}$  m/s), pois consideramos o efeito da redução da espessura saturada e a presença do poço;
- Os fatores de ajuste permite uma representação mais adequada da superfície piezométrica desenvolvida;
- A utilização e as abrangências dos fatores de ajuste apresentam-se de comum acordo com a necessidade de corrigir a equação 4.2, bem como os critérios de utilização das equações 4.2 e 4.3 para uma melhor representação do contorno da superfície freática;

- A utilização do poço tubular raso como poço de exploração torna-se pouco recomendado para aquíferos aluviais, no instante em que sua eficiência é penalizada pela redução da espessura saturada;
- O aumento no diâmetro do poço amazonas nem sempre implica em acréscimos consideráveis na vazão de captação, como observa-se na Figura 7.8 o poço em estudo simulado com diâmetro acima de 4,50 m não tem nenhum acréscimo na eficiência;
- As distorções apresentadas nas Figuras 7.4a, 7.4b e 7.7, ocorreram devido a falta de um teste de bombeamento com vazões escalonadas, afim de definir a necessidade ou não de implementar um fator para corrigir o efeito físico da redução da espessura satura sobre o rebaixamento observado também do poço amazonas.
- O poço tubular raso deve ser considerado útil na determinação dos parâmetros do aquífero, isto possibilita a definição, através do modelo para poço amazonas, de qual seria o diâmetro e o material mais adequados do poço amazonas a ser construído neste aquífero.

## 8.2 Recomendações

Partindo de algumas situações difíceis encontradas ao longo desta pesquisa, buscamos fazer algumas recomendações necessárias, afim de facilitar a obtenção de resultados mais precisos nas pesquisas de hidrodinâmica de poços tubulares rasos e principalmente amazonas.

- Obter dados mais detalhados, com cargas observadas em maior número de piezômetros, preferencialmente próximos do poço de produção onde a curva de rebaixamento é mais acentuada;
- Utilizar dados de um teste de vazão escalonado e uma boa caracterização da construção e material empregado no poço. Com isso, poderíamos então relacionar o fator de ajuste com o diâmetro e o material do poço, passando assim, a ser chamados de fator de filtro.

## Capítulo IX

### BIBLIOGRAFIA

- Bouwer, H.: Groundwater Hydrology. Student Edition, New York, McGraw-Hill, p. 83-85. 1978.
- Bear, J.: Hydraulics of Groundwater. USA, McGraw, Hill Book Company, 1979.
- CDRM: Relatório final – abastecimento d'água e captações concluídas, Jericó, PB, Divisão de Hidrogeologia e Sondagens, Campina Grande, 1988.
- CETESB: Água Subterrânea e Poços Tubulares, 3ed. rev. São Paulo, 1978.
- Cirilo, J. A.; Cabral, J. P.: Modelos de Água Subterrânea. in: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, Luís Carlos Wrobel et alii. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Rio de Janeiro, Cap. 5 vol. 1, p. 302-377. 1987.
- Chachadi, A. G.; Mishra G. C.: Analysis of Unsteady Flow to a Large-Diameter Well Experiencing Well Loss. Ground Water, vol. 30, n. 3, p. 369-375, 1992.
- Custodio, E.; Llamas, M. R.: Hidrologia Subterranea, 2ed., Barcelona: Ediciones Omega, 1983.
- Dupuit, J.: Studes Théoriques et Pratiques sur le Mouvement de Euax Dans Les Canaux Decouvert et a Travers les Terrains Permeables Dunod, 2ed , Paris, 1896.

- Egito, E. P.: Aspectos Técnicos dos Poços do Semi-árido Paraibano. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestre em Ciências – Recursos Hídricos) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1989.
- Filho, J. M.; Feitosa, F. A. C.: Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações, Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 412p, 1997.
- Hantush, M. S.: Aquifer Testes on Partially Penetrating Wells. Am. Soc. Civil Eng. Trans, vol. 127, part I, p. 284-308, 1962.
- Herbert, R.; Kitching, R.: Determination of Aquifer Parameters from Large Diameter During Well Pumping Tests. Ground Water, vol. 19, n. 6, p. 593-599, 1981.
- Kinzelbach, W.: Groundwater Modelling: An Introduction with Simple Programs in Basic. Development in Water Science, Amsterdam, Elsevier, 1986.
- Monteiro, N. B.: Modelamento Matemático para Simulação do Fluxo no Aquífero Aluvial no Semi-Árido de Santa Luzia – PB. Laboratório de Hidráulica – DEC / CCT / UFPB (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos), Campina Grande, 1997.
- Mishra, G.C.; Chachadi, A.G.: Analysis of a Flow to a Large Diameter Well during the Recovery Period. Ground Water, vol 23, n. 5 , p. 646-651, 1986.
- Papadopoulos, I. S.; Cooper, H. H.: Drawdown in a Well of Large Diameter. Water Resources Research, vol. 3, p. 241-244, 1967.
- Patel, S. C.; Mishra, G. C.: Analysis of Flow to a Large-Diameter Well by a Discrete Kernel Approach. Ground Water, vol. 21, n. 5, p. 573-576, 1983.
- RADAMBRASIL: Folha SB. 26/27, Jaguaribe/Natal. Vol. 23 – Levantamento de reservas naturais, pp 574-576, 1981.
- Rhuston, K. R.; Holt, S. M.: Estimating Aquifer Parameters for Large Diameter Well. Ground Water, vol. 19, pp 505-509, 1981.
- Rushton, K. R.; Singh V. S.: Drawdowns in Large Diameter Wells Due to Decreasing Abstraction Rates. Ground Water, vol. 21, n. 6, p. 670-677, 1983.

- Rushton, K. R.; Holt, S. M.: Estimating Aquifer Parameters for Large-Diameter Wells. *Ground Water*, vol. 19, n. 5, pp. 505-509, 1981.
- Sá, S. P. C.: Confecções das Curvas Características Hidrodinâmicas para Poços de Grandes Diâmetros (Tipo Amazonas) em Três Áreas do Sertão Paraibano. Laboratório de Hidráulica – DEC / CCT / UFPB (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos), Campina Grande, 1998.
- Sarma, S. V. K.; Figueiredo, J. W. G.: Investigação de Águas Subterrâneas no Semi-Árido Paraibano na Microrregião Homogênea do Catolé do Rocha. Simpósio Internacional sobre Métodos e Instrumentos para uso em Água Subterrânea. Haia, Holanda, pp. 232-242, 1983.
- Sarma, S. V. K.; Silva, T. C.: Respostas hidráulicas do aquífero ao bombeamento, *ABAS*, nº 11, p 26-32, 1987.
- Todd, D. K. F.: *Ground Water Hydrology*. New York: John Wiley. 332p. 1967.
- Wang, H. F.; Anderson, M. P.: *Introduction to Groundwater Modeling*, San Francisco, W. H. Freeman, 1982.

# ANEXOS



## Anexo I

Descrição das principais procedures e functions dos programas PTJE-64.PAS e PGDJE-65.PAS, apresentados em seguida.

- **procedure le\_variaveis:** Ler dados
- **procedure Le\_Q\_T\_H:** Calcula a transmissividade em cada nó da malha, definindo a abrangência dos fatores de ajuste e a condição contorno de carga inicial conhecida.
- **procedure executa\_valores:** Define o critério de convergência; Conta as iterações; Executa a função calcula\_T\_ir\_h e mostra resultados de parciais de cada iteração.
- **procedure calcula\_T\_ir\_h:** Ler os valores das transmissividades dos nós a serem calculadas as transmissividade harmônica. Define o método iterativo.
- **function le\_ir:** Define o contorno do raio de influência
- **function calcula\_t:** Calcula a transmissividade harmônica
- **procedure calcula\_hh\_irr:** Condição de contorno do fluxo especificado
- **function calcula\_hnn:** Cálculo da carga hidráulica.
- **function Dxx:** Reconhece a discretização
- **function formata\_Q:** Implemento de vazão de exploração ou recarga, definindo o contorno do poço.
- **procedure gera\_arquivo\_vetor:** Gera arquivo com extensão dat com as cargas hidráulica calculadas em toda malha real.

## PROGRAMA PTJE-64.PAS (POÇO TUBULAR RASO)

**Program Silvestre-PT; {Malha (62 x 64)}**

```
{ $m 65000,0,65000 }
uses crt;
type
cad_real = array[-1..70,-1..70] of real;
arquivo = text;
var
Del, iii, jjj, pco, im, jm, jjmm, iimm, b, c : integer;
raio, om, tll, rw, qq, valor, kf, fator, fp, mm, qn : real;
h, t : cad_real;
cc : char;
bolea : boolean;
arqui : arquivo;
```

**function Dxx(xx1:integer):real;**

```
begin
if ((xx1 > -1) and (xx1 <= (10+1+1+Del)))
then Dxx := 1.5
else if ((xx1 > (Del + 12)) and (xx1 <= (Del+12+1)))
then Dxx := 1.3
else if ((xx1 > (Del + 13)) and (xx1 <= (Del+13+1)))
then Dxx := 1.2
else if ((xx1 > (Del + 14)) and (xx1 <= (Del+14+1)))
then Dxx := 1.0
else if ((xx1 > (Del + 15)) and (xx1 <= (Del+15+1)))
then Dxx := 0.9
else if ((xx1 > (Del + 16)) and (xx1 <= (Del+16+1)))
then Dxx := 0.75
else if ((xx1 > (Del + 17)) and (xx1 <= (Del+17+1)))
then Dxx := 0.65
else if ((xx1 > (Del + 18)) and (xx1 <= (Del+18+1)))
then Dxx := 0.55
else if ((xx1 > (Del + 19)) and (xx1 <= (Del+19+1)))
then Dxx := 0.45
else if ((xx1 > (Del + 20)) and (xx1 <= (Del+20+1)))
then Dxx := 0.40
else if ((xx1 > (Del + 21)) and (xx1 <= (Del+21+1)))
then Dxx := 0.35
```

```

else if ((xx1 > (Del + 22)) and (xx1 <= (Del+22+1)))
  then Dxx := 0.30
else if ((xx1 > (Del + 23)) and (xx1 <= (Del+23+1)))
  then Dxx := 0.20
else if ((xx1 > (Del + 24)) and (xx1 <= (Del+24+7)))
  then Dxx := 0.15
else if ((xx1 > (Del + 31)) and (xx1 <= (Del+31+1)))
  then Dxx := 0.20
else if ((xx1 > (Del + 32)) and (xx1 <= (Del+32+1)))
  then Dxx := 0.30
else if ((xx1 > (Del + 33)) and (xx1 <= (Del+33+1)))
  then Dxx := 0.35
else if ((xx1 > (Del + 34)) and (xx1 <= (Del+34+1)))
  then Dxx := 0.40
else if ((xx1 > (Del + 35)) and (xx1 <= (Del+35+1)))
  then Dxx := 0.45
else if ((xx1 > (Del + 36)) and (xx1 <= (Del+36+1)))
  then Dxx := 0.55
else if ((xx1 > (Del + 37)) and (xx1 <= (Del+37+1)))
  then Dxx := 0.65
else if ((xx1 > (Del + 38)) and (xx1 <= (Del+38+1)))
  then Dxx := 0.75
else if ((xx1 > (Del + 39)) and (xx1 <= (Del+39+1)))
  then Dxx := 0.9
else if ((xx1 > (Del + 40)) and (xx1 <= (Del+40+1)))
  then Dxx := 1.0
else if ((xx1 > (Del + 41)) and (xx1 <= (Del+41+1)))
  then Dxx := 1.2
else if ((xx1 > (Del + 42)) and (xx1 <= (Del+42+1)))
  then Dxx := 1.3

else if ((xx1 > (Del + 43)) and (xx1 <= (43+10+1+2+Del+Del)))
then Dxx := 1.5;
end;

```

**function le\_ir(ii,jj,imm, jmm : integer):real;**

```

begin
if ( abs(ii-jj) >= (imm)div(2)+17-3+1) or ( (ii+jj) <= (imm)div(2)-17+3 ) or
( (ii+jj) >= (imm)div(2)+17+imm-1 ) or (ii=2) or (jj=2) or (ii=imm-1) or (jj=jmm-1)
  then le_ir := 4
  else le_ir := 1;
end;

```

**procedure Le\_Q\_T\_H(var hh,tt:cad\_real; imm,jmm:integer; qnn, kff, ffor, mm : real);**

var ii, jj : integer;

begin

for jj := 1 to jmm do

for ii := 1 to imm do

begin

if ( abs(ii-jj) > 36) or ( (ii+jj) < 29) or ( (ii+jj) > 94 ) or

(ii=15) or (ii=14) or (ii=13) or (ii=12) or (ii=10) or (ii=11) or (ii=10) or (ii=9) or (ii=8) or

(ii=7) or (ii=6) or (ii=5) or (ii=4) or (ii=3) or (ii=2) or (ii=1) or (ii=50) or (ii=51) or

(ii=52) or (ii=53) or (ii=54) or (ii=55) or (ii=56) or (ii=57) or (ii=58) or (ii=59) or (ii=60) or

(ii=61) or (ii=62) or (ii=63) or (ii=64) or (jj=15) or (jj=14) or (jj=13) or (jj=12) or (jj=10) or

(jj=11) or (jj=10) or (jj=9) or (jj=8) or (jj=7) or (jj=6) or (jj=5) or (jj=4) or (jj=3) or (jj=2) or

(jj=1) or (jj=50) or (jj=51) or (jj=52) or (jj=53) or (jj=54) or (jj=55) or (jj=56) or (jj=57) or

(jj=58) or (jj=59) or (jj=60) or (jj=61) or (jj=62) or (jj=63) or (jj=64)

then tt[ii,jj] := kff\*mm

else tt[ii,jj] := fator\*kff\*mm;

hb[ii,jj] := {sqr(5.3)/2} 15.125;

if (ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)-2) or (ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)-2) or

(ii=(imm)div(2)-1) and (jj=(imm)div(2)-1) or (ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)-1) or

(ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)-1) or (ii=(imm)div(2)+2) and (jj=(imm)div(2)-1) or

(ii=(imm)div(2)-2) and (jj=(imm)div(2)) or (ii=(imm)div(2)-1) and (jj=(imm)div(2)) or

(ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)) or (ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)) or

(ii=(imm)div(2)+2) and (jj=(imm)div(2)) or (ii=(imm)div(2)+3) and (jj=(imm)div(2)) or

(ii=(imm)div(2)-2) and (jj=(imm)div(2)+1) or (ii=(imm)div(2)-1) and (jj=(imm)div(2)+1) or

(ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)+1) or (ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)+1) or

(ii=(imm)div(2)+2) and (jj=(imm)div(2)+1) or (ii=(imm)div(2)+3) and (jj=(imm)div(2)+1) or

(ii=(imm)div(2)-1) and (jj=(imm)div(2)+2) or (ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)+2) or

(ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)+2) or (ii=(imm)div(2)+2) and (jj=(imm)div(2)+2) or

(ii=(imm)div(2)) and (jj=(imm)div(2)+3) or (ii=(imm)div(2)+1) and (jj=(imm)div(2)+3)

then tt[ii,jj] := fp\*fator\*kff\*mm

end;

end;

**function formata\_Q(iip,jjp:integer):real;**

var imm : integer;

q1, xx, vlr : real;

begin

imm := 64;

if ((iip=(imm)div(2)) and (jjp=(imm)div(2))) or ((iip=(imm)div(2)+1) and (jjp=(imm)div(2))) or

((iip=(imm)div(2)) and (jjp=(imm)div(2)+1)) or ((iip=(imm)div(2)+1) and (jjp=(imm)div(2)+1))

then formata\_Q := 0.008055556 {29/3600 - vazão em m<sup>3</sup>/s}

```

        else formata_Q := 0;
    end;

procedure plota_ir_h(irr : cad_real; jmm,imm, jmm1, imm1 : integer; flag : boolean);
    var jj, ii : integer;

begin
    for jj := jmm-1 downto jmm1 do
        for ii := imm1 to imm-1 do
            begin
                if flag
                    then write(irr[ii,jj]:2:1, ' ')
                    else write(sqrt(irr[ii,jj]*2):3:2, ' ');
                if (ii = (imm-1)) then writeln;
            end;
        end;
    end;

function calcula_t(tt: cad_real;ii1, jj1, ii, jj : integer; ttt : real):real; var cha : char;
    begin
        calcula_t := tt*t[ii1,jj1]/(t[ii,jj]+t[ii1,jj1]);
    end;

procedure calcula_hh_irr(var hh : cad_real; ii1, jj1, ii2, jj2,imm,jmm : integer; var ttt :
    real; flag : boolean);

    begin
        if (le_ir(ii1,jj1,imm,jmm) = 0) then
            if (flag = TRUE)
                then hh[ii1,jj1] := hh[ii2,jj2]
                else hh[ii2,jj2] := hh[ii1,jj1]
            else ttt := 0;
        end;

function calcula_hnn(hh : cad_real; ii, jj, imm, jmm: integer; tt1, tt2, tt3, tt4 : real):real;
    begin
        calcula_hnn :=((tt1/sqr(Dxx(ii))*hh[ii-1,jj] + (tt2/sqr(Dxx(ii+1)))*hh[ii+1,jj]
            + (tt3/sqr(Dxx(jj)))*hh[ii,jj-1] + (tt4/sqr(Dxx(jj+1)))*hh[ii,jj+1]
            - (formata_Q(ii,jj))/4)/(tt1/sqr(Dxx(ii)) + tt2/sqr(Dxx(ii+1))
            + tt3/sqr(Dxx(jj)) + tt4/sqr(Dxx(jj+1)));
    end;

procedure calcula_T_ir_h(var hh, tt:cad_real; ovv : real; var fl,dv :real; imm, jmm :
    integer; var nn : integer);

    var
        jj, ii : integer;
        tt1, tt2, tt3, tt4, ftt, hnn, dee, ikk : real;

```

```

begin
  for jj := 1 to jmm do
    for ii := 1 to imm do
      begin
        ikk := le_ir(ii,jj,imm,jmm);
        if (ikk <> 0) and (ikk <> 4) then
          begin
            tt := 2*tt[ii,jj];    tt1 := calcula_t(tt,ii-1,jj,ii,jj,tt);
            tt2 := calcula_t(tt,ii+1,jj,ii,jj,tt);    tt3 := calcula_t(tt,ii,jj-1,ii,jj,tt);
            tt4 := calcula_t(tt,ii,jj+1,ii,jj,tt);
            if (ikk <> 1) then
              begin
                calcula_hh_irr(hh,ii-1,jj,ii+1,jj,imm,jmm,tt1,TRUE);
                calcula_hh_irr(hh,ii+1,jj,ii-1,jj,imm,jmm,tt2,TRUE);
                calcula_hh_irr(hh,ii,jj-1,ii,jj+1,imm,jmm,tt3,FALSE);
                calcula_hh_irr(hh,ii,jj+1,ii,jj-1,imm,jmm,tt4,FALSE);
              end;
            hnn := calcula_hnn(hh,ii,jj,jmm,imm,tt1,tt2,tt3,tt4);
            dee := hnn-hh[ii,jj];    hh[ii,jj] := hh[ii,jj] + osv*dee;
            dee := abs(dee);    fl1 := fl1*dee; inc(nn);
            if (dee > dvv) then dvv := dee;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```
procedure executa_valores(var hh, tt : cad_real; omm,vlr : real; imm,jmm : integer);
```

```
var
    temp1, temp2, itt, kk, nn : integer;
    fl, dvv, ovv : real;
    test_hh : byte;
begin
    kk := 0; itt := 0;
    clrscr;
    repeat
        inc(kk);inc(itt);inc(itt);
        fl := 0; dvv := 0; nn := 0; ovv := 1 + 0.003*itt;
        if (ovv > omm)
            then ovv := omm;
        calcula_T_ir_h(hh,tt,ovv,fl,dvv,imm,jmm,nn);
        test_hh := 0;
        if (dvv <= tll) or (hh[(trunc((imm)/2)),trunc((imm)/2)] < 0) then
            begin
                fl := fl/nn; test_hh := 1;
            end;
        temp1 := (imm)div(2);
        writeln(kk:2,'###', hh[,temp1,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1,temp1]):4:2,
            '### hh[,temp1+1,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1+1,temp1]):4:2);
        writeln(kk:2,'###', hh[,temp1,',',temp1+1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1,temp1+1]):4:2,
            '### hh[,temp1+1,',',temp1+1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1+1,temp1+1]):4:2);
        writeln(kk:2,'###', hh[,temp1-15,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1-15,temp1]):4:2,
            '### hh[,temp1+1+15,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1+1+15,temp1]):4:2);
        writeln(kk:2,'###', hh[,temp1-20,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1-20,temp1]):4:2,
            '### hh[,temp1+1+20,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1+1+20,temp1]):4:2);
        writeln(kk:2,'###', hh[,temp1-23,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1-23,temp1]):4:2,
            '### hh[,temp1+1+23,',',temp1,'] = ', sqrt(2*hh[temp1+1+23,temp1]):4:2);
    until (test_hh=1);
end;
```

```
procedure zera_vetor(var vetor : cad_real; imm, jmm : integer);
```

```
var ii, jj : integer;
begin
    for ii := -1 to imm do
        for jj := -1 to jmm do
            vetor[ii,jj] := 0;
        end;
    end;
```

```
procedure le_variaveis(var pc,imm,jmm:integer; var r,omm,tll, qnn, kff, ftor, fp, mm,
vlr : real; var arq:arquivo);
```

```
begin
  if pc <> 2 then
    begin
      clrscr;
      write('Permeabilidade do solo, m/s, kff ( 0.00055 ) : ');
      readln(kff);
      write('Determine o fator no meio : ');
      readln(ftor);
      write('Determine o fator no poço : ');
      readln(fp);
      imm := 64; Del := 5; rv := 0.075; jmm:=imm; omm := 1.85; tll := 0.0005; mm:=1;
      if pc = 1 then
        begin
          writeln(arq,r); writeln(arq,imm); writeln(arq,jmm); writeln(arq,kff);
          writeln(arq,ftor); readln(arq,fp); writeln(arq,vlr); writeln(arq,omm);
          writeln(arq,tll); writeln(arq,qnn); writeln(arq,mm);
        end
      end
    else begin
      readln(arq,r); readln(arq,imm); readln(arq,jmm); readln(arq,kff);
      readln(arq,ftor); readln(arq,fp); readln(arq,vlr); readln(arq,omm);
      readln(arq,tll); readln(arq,qnn); readln(arq,mm);
    end;
  if pc <> 3 then close(arq);
end;
```

```
procedure define_poco(var pc : integer);
```

```
begin
  writeln(' Determine o tipo de poco');
  writeln(' ( 1 ) Poco Amazonas');
  writeln(' ( 2 ) Poco Tubular');
  write(' R = ');readln(pc);
end;
```

```
procedure mostra_dados(imm :integer; r,omm,tll,qnn,kff,ftor,fp,mm, vlr : real);
```

```
begin
  clrscr;
  writeln('          MOSTRA DADOS INICIAIS');
  writeln('Raio de influencia : ',r:6:2,' metros');
```



```

writeln('Rede escolhida : ',imm-2,'/',imm);
writeln('Valor Omm : ',omm:4:3);
writeln('Valor tll : ',tll:4:4);
writeln('Valor de qnn : ', qnn:4:3);
writeln('A permeabilidade do solo em m/s: ', kff:8:7);
writeln('Fator do meio : ', ffor:5:5);
writeln('Fator do poço : ', fp:5:5);
writeln('O valor de mm : ', mm:4:3);
writeln('Vazao do poço em m3/h : ', vlr:8:6);
end;

```

**procedure escolhe\_funcao(var pc : integer);**

```

begin
  clrscr;
  writeln(' Determine a funcao a ser realizada : ');
  writeln(' ( 1 ) Mostra dados iniciais ');
  writeln(' ( 2 ) Mostra vetor h (valores centrais da matriz) ');
  writeln(' ( 3 ) Mostra cargas ao longo do diametro');
  write(' R = '); readln(pc);
end;

```

**procedure plota\_vazao\_central (qq : cad\_real; imm : integer);**

```

var
  aux_imm : integer;
begin
  aux_imm := (imm)div(2);
  writeln(' qq[',aux_imm,',',aux_imm,'] = ', qq[aux_imm,aux_imm]);
  writeln(' qq[',aux_imm+1,',',aux_imm,'] = ', qq[aux_imm+1,aux_imm]);
  writeln(' qq[',aux_imm,',',aux_imm+1,'] = ', qq[aux_imm,aux_imm+1]);
  writeln(' qq[',aux_imm+1,',',aux_imm+1,'] = ', qq[aux_imm+1,aux_imm+1]);
end;

```

**procedure abre\_arquivo(var ar : integer; var arq : arquivo);**

```

var
  terminacao : string[12];
  carat : char;
  i : integer;
begin
  repeat
  clrscr;
  writeln(' Faca a opcao ? ');writeln;
  writeln(' ( 1 ) Criar arquivo ');

```

```

writeln(' ( 2 ) Abrir arquivo existente');
writeln(' ( 3 ) Nao usar arquivo ');writeln;
write(' R = ');
readln(ar);
if (ar <> 1) and (ar <> 2) and (ar <> 3)
then begin
  clrscr;writeln;
  writeln (' Opcao invalida. digite uma tecla');
  write(' e tente novamente ');
  carat := readkey;
  clrscr;
end;
until (ar = 1) or (ar = 2) or (ar = 3);
if ( ar = 1 ) or ( ar = 2 )
then begin
  writeln(' Entre com o nome do arquivo, sem a terminacao,');
  writeln(' que por default eh ".dat");writeln;
  write(' Arquivo = ');
  readln(terminacao);
  terminacao := terminacao + '.dat';
  assign(arq,terminacao);
  if (ar = 2)
  then reset(arq)
  else rewrite(arq);
end;
end;

```

**procedure interroga(var bol : boolean; cade : string);**

```

var cc : char;
begin
  bol := FALSE;
  write(cade.' ');
  cc := readkey; cc:= upcase(cc);
  if (cc= 'S')
  then bol := TRUE;
end;

```

```
procedure cargas_diametro(hh : cad_real; imm : integer);
```

```
var
  ii, linha : integer;
  boloe : boolean;
begin
  repeat
    clrscr;
    write('  Determine a linha desejada : ');readln(linha);
    clrscr;
    writeln('          CARGAS AO LONGO DA LINHA');
    for ii := 2 to imm-1 do
      write(sqrt(2*hh[ii,linha]):4:2);
    writeln;
    interroga(boloe,'Deseja mais alguma linha (S/N)');
  until (not boloe)
end;
```

```
procedure record_file (f:cad_real; m,n:integer; ddx,mmax,mmin : real);
```

```
var
  psipas:text;
  name_output_file:string [14];
  ii,jj:integer;
begin
  {nao ha necessidade de inserir a terminacao .dat, pois o computador ja o insere}
  write('digite o nome do arquivo : ');
  readln (name_output_file);
  name_output_file := name_output_file + '.dat';
  assign (psipas,name_output_file);
  rewrite (psipas);
  writeln (psipas,m-2,' ');
  writeln (psipas,n-2,' ');
  writeln (psipas,sqrt(2*mmax),' ');
  writeln (psipas,sqrt(2*mmin),' ');
  writeln (psipas,ddx,' ');
  writeln (psipas,ddx,' ');
  for ii:=2 to m-1 do
    for jj:=2 to n-1 do
      writeln (psipas,sqrt(2*f[jj,ii]):10:6,' ');
  close (psipas)
end;
```

**procedure central(hh:cad\_real; jmm,imm:integer);**

```
var
  cc : char;
  jjmm, iimm : integer;
  bolea : boolean;
begin
  clrscr;gotoxy(5,2);
  interroga(bolea,'Deseja valores centrais (S/N) ');
  if bolea
  then begin
    clrscr;
    writeln('          VETOR H');
    jjmm := (jmm)div(2);    iimm := (imm)div(2);
    plota_ir_h(hh,jjmm+4,iimm+4,jjmm-4,iimm-4,FALSE);
  end
  else begin
    clrscr;
    writeln('          VETOR H');
    plota_ir_h(hh,jmm,imm,2,2,FALSE);
  end;
  cc := readkey;
end;
```

**procedure encontra\_max\_min(hh:cad\_real; jmm,imm:integer; var max1,min1:real);**

```
var ii, jj :integer;
begin
  min1:=hh[2,1];
  max1:=hh[2,1];
  for jj:=1 to (jmm-1) do
    for ii:=2 to (imm-1) do
      begin
        if hh[ii,jj] < min1 then min1 := hh[ii,jj];
        if hh[ii,jj] > max1 then max1 := hh[ii,jj];
      end
    end;
end;
```

**procedure gera\_arquivo\_vetor(hh:cad\_real;imm,jmm:integer; ddx : real);**

```
var
  bolea : boolean;
  mmaxx, mminn : real;
begin
```

```

clrscr,gotoxy(5,1);
interroga(bolea,'Criar um arquivo de dados (S/N) ');writeln,gotoxy(5,2);
if bolea
  then begin
    encontra_max_min(hh,jmm,imm,mmaxx,mminn);
    record_file(hh,jmm,imm,ddxx,mmaxx,mminn);
  end;
clrscr;
end;
begin
clrscr;
  abre_arquivo(pco,arqui);
  le_variaveis(pco,im,jm,raio,om,tll,qn,kf,fator,fp,mm,valor, arqui);
  zera_vetor(h,im+2,jm+2);zera_vetor(t,im+2,jm+2);
  Le_Q_T_H(h,t,im,jm,qn,kf,fator,mm);
  executa_valores(h,t,om,valor,im,jm);
  repeat
    clrscr;
    escolhe_funcao(pco);
    case pco of
      1 : mostra_dados(im,raio,om,tll,qn,kf,fator,fp,mm,valor);
      2 : begin
        clrscr;
        jm := 64; im := 64; jjmm := (jm)div(2); iimm := (im)div(2);
        for jjj := 64 downto 1 do
          for iii := 1 to 64 do
            begin
              write(sqrt(h[iii,jjj]*2):3:2, ' ');
              if (iii = (64)) then writeln;
            end;
          end;
        end;
      3 : begin
        cargas_diametro(h,im);
        gera_arquivo_vetor(h,im,jm,3);
      end;
    end;
  until(bolea);
end.

```

# PROGRAMA PGDJE-65.PAS (POÇO AMAZONAS)

```
Program Silvestre-PGD;           {malha 63x65}
  {$m 65000,0,65000}
  uses crt;
  type
    cad_real = array[-1..67,-1..67] of real;
    arquivo = text;
  var
    Del, iii, jjj, pco, im, jm, jimm, iimm, b, c : integer;
    raio, om, tll, rw, qq, valor, kf, fator, mm, qn : real;
    h, t : cad_real;
    cc : char;
    bolea : boolean;
    arqui : arquivo;

function Dxx(xx1:integer):real;
  begin
    if ((xx1 > -1) and (xx1 <= (Del + 11+1+1)))
      then Dxx := 1.5
    else if ((xx1 > (Del + 13)) and (xx1 <= (Del+13+1)))
      then Dxx := 1.3
    else if ((xx1 > (Del + 14)) and (xx1 <= (Del+14+1)))
      then Dxx := 1.1
    else if ((xx1 > (Del + 15)) and (xx1 <= (Del+15+2)))
      then Dxx := 0.9
    else if ((xx1 > (Del + 16)) and (xx1 <= (Del+16+1)))
      then Dxx := 0.75
    else if ((xx1 > (Del + 17)) and (xx1 <= (Del+17+1)))
      then Dxx := 0.65
    else if ((xx1 > (Del + 18)) and (xx1 <= (Del+18+1)))
      then Dxx := 0.55
    else if ((xx1 > (Del + 19)) and (xx1 <= (Del+19+1)))
      then Dxx := 0.45
    else if ((xx1 > (Del + 20)) and (xx1 <= (Del+20+1)))
      then Dxx := 0.40
    else if ((xx1 > (Del + 21)) and (xx1 <= (Del+21+1)))
      then Dxx := 0.35
    else if ((xx1 > (Del + 22)) and (xx1 <= (Del+22+1)))
      then Dxx := 0.30
```

```

else if ((xx1 > (Del + 23)) and (xx1 <= (Del+23+22)))
  then Dxx := 0.25
else if ((xx1 > (Del + 45)) and (xx1 <= (Del+45+1)))
  then Dxx := 0.30
else if ((xx1 > (Del + 46)) and (xx1 <= (Del+46+1)))
  then Dxx := 0.35
else if ((xx1 > (Del + 47)) and (xx1 <= (Del+47+1)))
  then Dxx := 0.40
else if ((xx1 > (Del + 48)) and (xx1 <= (Del+48+1)))
  then Dxx := 0.45
else if ((xx1 > (Del + 49)) and (xx1 <= (Del+49+1)))
  then Dxx := 0.55
else if ((xx1 > (Del + 50)) and (xx1 <= (Del+50+1)))
  then Dxx := 0.65
else if ((xx1 > (Del + 51)) and (xx1 <= (Del+51+1)))
  then Dxx := 0.75
else if ((xx1 > (Del + 52)) and (xx1 <= (Del+52+1)))
  then Dxx := 0.90
else if ((xx1 > (Del + 53)) and (xx1 <= (Del+53+1)))
  then Dxx := 1.1
else if ((xx1 > (Del + 54)) and (xx1 <= (Del+54+1)))
  then Dxx := 1.3
else if ((xx1 > (Del + 55)) and (xx1 <= (55+11+1+2+Del+Del)))
  then Dxx := 1.5;
end;

```

**function le\_ir(ii,jj,imm, jmm : integer):real;**

```

begin
  if ( abs(ii-jj) >= ((imm+1)div(2)+22-3)) or ((ii+jj) <= ((im+1)div(2)-22+3))
  or ( (ii+jj) >= ((imm+1)div(2)+22+imm-3+1) )
  then le_ir := 4
  else le_ir := 1;
  if (ii=2) or (jj=2) or (ii=imm-1) or (jj=jmm-1)
  then le_ir :=4;
end;

```

**procedure Le\_Q\_T\_H(var hh,tt:cad\_real; imm,jmm:integer; qnn, kff, fator, mm : real);**

```

var ii, jj, b, c: integer;
begin
  for jj := 1 to jmm do
    for ii := 1 to imm do

```

```

begin
  if ((ii+jj) < 53) or (abs(ii-jj) > 13) or ((ii+jj) > 79) or
    (ii=22) or (ii=21) or (ii=20) or (ii=19) or (ii=18) or (ii=17) or (ii=16) or (ii=44) or (ii=45) or
    (ii=46) or (ii=47) or (ii=48) or (ii=49) or (ii=50) or (jj=22) or (jj=21) or (jj=20) or (jj=19) or
    (jj=18) or (jj=17) or (jj=16) or (jj=44) or (jj=45) or (jj=46) or (jj=47) or (jj=48) or (jj=49) or
    (jj=50)
  then tt[ii,jj] := kff*mm
  else tt[ii,jj] := fator*kff*mm;
  hh[ii,jj] := {(srq(5.3))/2} 14.045;
end;
end;

```

**function formata\_Q(iip,jjp:integer):real;**

```

begin
  IF ( ( (IIP=30) AND (JJP=25)) or ( (IIP=31) AND (JJP=25)) or ( (IIP=32) AND (JJP=25)) or
    ( (IIP=33) AND (JJP=25)) or ( (IIP=34) AND (JJP=25)) or ( (IIP=35) AND (JJP=25)) or
    ( (IIP=36) AND (JJP=25)) or ( (IIP=26) AND (JJP=29)) or ( (IIP=26) AND (JJP=37)) or
    ( (IIP=27) AND (JJP=28)) or ( (IIP=27) AND (JJP=38)) or ( (IIP=28) AND (JJP=27)) or
    ( (IIP=28) AND (JJP=39)) or ( (IIP=29) AND (JJP=26)) or ( (IIP=29) AND (JJP=40)) or
    ( (IIP=25) AND (JJP=30)) or ( (IIP=25) AND (JJP=31)) or ( (IIP=25) AND (JJP=32)) or
    ( (IIP=25) AND (JJP=33)) or ( (IIP=25) AND (JJP=34)) or ( (IIP=25) AND (JJP=35)) or
    ( (IIP=25) AND (JJP=36)) or ( (IIP=41) AND (JJP=30)) or ( (IIP=41) AND (JJP=31)) or
    ( (IIP=41) AND (JJP=32)) or ( (IIP=41) AND (JJP=33)) or ( (IIP=41) AND (JJP=34)) or
    ( (IIP=41) AND (JJP=35)) or ( (IIP=41) AND (JJP=36)) or ( (IIP=37) AND (JJP=26)) or
    ( (IIP=37) AND (JJP=40)) or ( (IIP=38) AND (JJP=27)) or ( (IIP=38) AND (JJP=39)) or
    ( (IIP=39) AND (JJP=28)) or ( (IIP=39) AND (JJP=38)) or ( (IIP=40) AND (JJP=29)) or
    ( (IIP=40) AND (JJP=37)) or ( (IIP=30) AND (JJP=41)) or ( (IIP=31) AND (JJP=41)) or
    ( (IIP=32) AND (JJP=41)) or ( (IIP=33) AND (JJP=41)) or ( (IIP=34) AND (JJP=41)) or
    ( (IIP=35) AND (JJP=41)) or ( (IIP=36) AND (JJP=41)) )
  THEN formata_Q := 0.01805555556 {65/3600-vazão em m³/s}
  ELSE formata_Q := 0;
end;

```

**procedure plota\_ir\_h(irr : cad\_real; jmm,imm, jmm1, imm1 : integer; flag : boolean);**

```

var jj, ii : integer;
begin
  for jj := jmm-1 downto jmm1 do
    for ii := imm1 to imm-1 do
      begin
        if flag
          then write(irr[ii,jj]:2:1,'')

```



```

        else write(sqrt(irr[ii,jj]*2):3:2. ' ');
    if (ii = (imm-1)) then writeln;
end;
end.

```

**function calcula\_t(tt: cad\_real; ii1, jj1, ii, jj : integer; ttt : real):real;**

```

var cha : char;
begin
    calcula_t := ttt*tt[ii1,jj1]/(tt[ii,jj]+tt[ii1,jj1]);
end;

```

**procedure calcula\_hh\_irr(var hh : cad\_real; ii1, jj1, ii2, jj2,imm,jmm : integer; var ttt : real; flag : boolean);**

```

begin
    if (le_ir(ii1,jj1,imm,jmm) = 0) then
        if (flag = TRUE)
            then hh[ii1,jj1] := hh[ii2,jj2]
            else hh[ii2,jj2] := hh[ii1,jj1]
        else tt := 0;
end;

```

**function calcula\_hnn(hh : cad\_real; ii, jj, imm, jmm: integer; tt1, tt2, tt3, tt4 : real):real;**

```

begin
    calcula_hnn := ((tt1/sqr(Dxx(ii)))*hh[ii-1,jj] + (tt2/sqr(Dxx(ii+1)))*hh[ii+1,jj]
        + (tt3/sqr(Dxx(jj)))*hh[ii,jj-1] + (tt4/sqr(Dxx(jj+1)))*hh[ii,jj+1]
        - (formata_Q(ii,jj)/44)/(tt1/sqr(Dxx(ii))
        + tt2/sqr(Dxx(ii+1)) + tt3/sqr(Dxx(jj)) + tt4/sqr(Dxx(jj+1)));
end;

```

**procedure calcula\_T\_ir\_h(var hh, tt:cad\_real; ovr : real; var fl,dv :real; imm, jmm : integer; var nn : integer);**

```

var
    jj, ii, iip, jip : integer;
    tt, tt1, tt2, tt3, tt4 : real;
    ftt, hnn, dee, ikk : real;
begin
    for jj := 1 to jmm do
        for ii := 1 to imm do
            begin
                ikk := le_ir(ii,jj,imm,jmm);
                if (ikk < 0) and (ikk < 4) then
                    begin
                        tt := 2*tt[ii,jj];    tt1 := calcula_t(tt,ii-1,jj,ii,jj,ttt);
                    end;
            end;
        end;
    end;

```

```

tt2 := calcula_t(tt,ii+1,jj,ii,jj,ttt);  tt3 := calcula_t(tt,ii,jj-1,ii,jj,ttt);
tt4 := calcula_t(tt,ii,jj+1,ii,jj,ttt);
if (ikk < 1) then
  begin
    calcula_hh_irr(hh,ii-1,jj,ii+1,jj,imm,jmm,tt1,TRUE);
    calcula_hh_irr(hh,ii+1,jj,ii-1,jj,imm,jmm,tt2,TRUE);
    calcula_hh_irr(hh,ii,jj-1,ii,jj+1,imm,jmm,tt3,FALSE);
    calcula_hh_irr(hh,ii,jj+1,ii,jj-1,imm,jmm,tt4,FALSE);
  end;
if ((ii+jj) <= 55) or (abs(ii-jj) >= 11) or ((ii+jj) >= 77) or
(ii=25) or (ii=24) or (ii=23) or (ii=22) or (ii=21) or (ii=20) or (ii=19) or
(ii=18) or (ii=41) or (ii=42) or (ii=43) or (ii=44) or (ii=45) or (ii=46) or
(ii=47) or (ii=48) or (jj=41) or (jj=42) or (jj=43) or (jj=44) or (jj=45) or
(jj=46) or (jj=47) or (jj=48) or (jj=25) or (jj=24) or (jj=23) or (jj=22) or
(jj=21) or (jj=20) or (jj=19) or (jj=18)
then hnn := calcula_hnn(hh,ii,jj,jmm,imm,tt1,tt2,tt3,tt4)
else hnn := hh[30,25];
  dec := hnn-hh[ii,jj];  hh[ii,jj] := hh[ii,jj] + ovv*dec;  dec := abs(dec);
  fl1 := fl1*dec;  inc(nn);
  if (dec > dvv) then dvv := dec;
end;
end;
end;

```

**procedure executa\_valores(var hh, tt : cad\_real; omm,vlr : real; imm,jmm : integer);**

```

var
  temp1, temp2, itt, kk, nn : integer;
  fl1, dvv, ovv : real;
  test_hh : byte;
begin
  kk := 0; itt := 0;
  clrscr;
  repeat
    inc(kk);inc(itt);inc(itt); fl1 := 0; dvv := 0; nn := 0; ovv := 1+0.001*itt;
    if (ovv > omm)
      then ovv := omm;
    calcula_T_ir_h(hh,tt,ovv,fl1,dvv,imm,jmm,nn);
    test_hh := 0;
    if (dvv <= tl) or (hh{(trunc((imm+1)/2)},{trunc((imm+1)/2)}} < 0)
      then test_hh := 1;
  begin

```

```

    fl := fl/n;
end;
temp1 := (imm+1)div(2);
writeln(kk:2,'###,' hh[,temp1,',temp1,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1]):4:2);
writeln(kk:2,'###,' hh[,temp1-8,',temp1,'] = ',sqrt(2*hh[temp1-8,temp1]):4:2);
'### hh[,temp1+8,',temp1,'] = ',sqrt(2*hh[temp1+8,temp1]):4:2);
writeln(kk:2,'###,' hh[,temp1,',temp1-8,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1-8]):4:2);
'### hh[,temp1,',temp1+8,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1+8]):4:2);
writeln(kk:2,'###,' hh[,temp1,',temp1-20,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1-20]):4:2);
'### hh[,temp1,',temp1+20,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1+20]):4:2);
writeln(kk:2,'###,' hh[,temp1,',temp1-25,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1-25]):4:2);
'### hh[,temp1,',temp1+25,'] = ',sqrt(2*hh[temp1,temp1+25]):4:2);
until {(kk>=2000)} (test_hh=1);
end;

```

**procedure zera\_vetor(var vetor : cad\_real; imm, jmm : integer);**

```

var ii, jj : integer;
begin
  for ii := -1 to imm do
    for jj := -1 to jmm do
      vetor[ii,jj] := 0;
    end;
  end;
end;

```

**procedure le\_variaveis(var pc,imm,jmm:integer; var r,omm,tll, qnn, kff, ftor, mm, vlr : real; var arq:arquivo);**

```

begin
  if pc <> 2 then
    begin
      clrscr;
      write('Permeabilidade do solo, m/s, kff ( 0.001 ) : ');
      readln(kff);
      write('Determine o fator de filtro : ');
      readln(ftor);
      imm := 65; Del := -1; rw := 1.9; jmm:=imm; omm := 1.85;
      tll := 0.0001; qnn:=0; mm:=1; vlr := 65.00; r := 24.5;
      if pc = 1 then
        begin
          writeln(arq,kff);writeln(arq,ftor);writeln(arq,vlr); writeln(arq,omm);
          writeln(arq,tll);writeln(arq,qnn);writeln(arq,mm);
        end
      end
    else begin

```

```

        readln(arq,kff);readln(arq,ftor);readln(arq,vlr); readln(arq,omm);
        readln(arq,tll);readln(arq,qnn);readln(arq,mm);
    end;
    if pc <> 3 then close(arq);
end;

```

**procedure mostra\_dados(imm : integer; r,omm,tll,qnn,kff,ftor,mm, vlr : real);**

```

begin
    clrscr;
    writeln('          MOSTRA DADOS INICIAIS');
    writeln('Raio de influencia : ',r:6:2,' metros');
    writeln('Raio do Poço : ',rw:4:2,' metros');
    writeln('Rede escolhida : ',imm-2,'/',inum);
    writeln('Valor Omm : ',omm:4:3);
    writeln('Valor tll : ',tll:4:4);
    writeln('A permeabilidade do solo em m/s: ', kff:8:4);
    writeln('Fator de filtro : ', ftor:5:4);
    writeln('O valor de mm : ', mm:4:3);
    writeln('Vazao do poço em m3/h : ', vlr:8:2);
end;

```

**procedure escolhe\_funcao(var pc : integer);**

```

begin
    clrscr;
    writeln('  Determine a funcao a ser realizada : ');
    writeln('  ( 1 ) Mostra dados iniciais ');
    writeln('  ( 2 ) Mostra vetor h (valores centrais da matriz) ');
    writeln('  ( 3 ) Mostra cargas ao longo do diametro');
    write('  R = ');readln (pc);
end;

```

**procedure abre\_arquivo(var ar : integer; var arq : arquivo);**

```

var
    terminacao : string[12];
    carat : char;
    i : integer;
begin
    repeat
        clrscr;
        writeln('  Faca a opcao ? ');writeln;
        writeln('  ( 1 ) Criar arquivo ');
        writeln('  ( 2 ) Abrir arquivo existente');
    until ar = 1 or ar = 2;
end;

```

```

writeln(' ( 3 ) Nao usar arquivo ');writeln;
write('      R = ');
readln(ar);
if (ar <> 1) and (ar <> 2) and (ar <> 3)
  then begin
    clrscr;writeln;
    writeln (' Opcao invalida, digite uma tecla');
    write(' e tente novamente ');
    carat := readkey;
    clrscr;
  end;
until (ar = 1) or (ar = 2) or (ar = 3);
if ( ar = 1 ) or ( ar = 2 )
  then begin
    writeln(' Entre com o nome do arquivo, sem a terminacao,');
    writeln(' que por default eh "dat");writeln;
    write('      Arquivo = ');
    readln(terminacao);
    terminacao := terminacao + '.dat';
    assign(arq,terminacao);
    if (ar = 2)
      then reset(arq)
      else rewrite(arq);
  end;
end;

```

**procedure interroga(var bol : boolean; cade : string);**

```

var cc : char;
begin
  bol := FALSE;
  write(cade,' : ');
  cc := readkey; cc:= upcase(cc);
  if (cc= 'S')
    then bol := TRUE;
end;

```

**procedure cargas\_diametro(hh : cad\_real; imm : integer);**

```

var
  i, linha : integer;
  boloe : boolean;
begin

```

```

repeat
  clrscr;
  write('  Determine a linha desejada : ');readln(linha);
  clrscr;
  writeln('          CARGAS AO LONGO DA LINHA');
  for ii := 2 to imm-1 do
    write(sqrt(2*hh[ii,linha]):4:2);
  writeln;
  interroga(boloe,'Deseja mais alguma linha (S/N)');
until (not boloe)
end;

```

**procedure record\_file (f:cad\_real; m,n:integer; ddx,mmax,mmin : real);**

```

var
  psipas:text;
  name_output_file:string [14];
  ii,jj:integer;
begin
  {nao ha necessidade de inserir a terminacao .dat, pois o computador ja o inseri}
  write('digite o nome do arquivo : ');
  readln (name_output_file);
  name_output_file := name_output_file + '.dat';
  assign (psipas,name_output_file);
  rewrite (psipas);
  writeln (psipas,m-2,' ');
  writeln (psipas,n-2,' ');
  writeln (psipas,sqrt(2*mmax),' ');
  writeln (psipas,sqrt(2*mmin),' ');
  writeln (psipas,ddx,' ');
  writeln (psipas,ddx,' ');
  for ii:= 2 to m-1  do
    for jj:=2 to n-1  do
      writeln (psipas,sqrt(2*f[jj,ii]):10:6,' ');
  close (psipas)
end;

```

**procedure central(hh:cad\_real; jmm,imm:integer);**

```

var
  cc : char;
  jjmm, iimm : integer;
  bolea : boolean;

```

```

begin
  clrscr;gotoxy(5,2);
  interroga(bolea,'Deseja valores centrais (S/N) ');
  if bolea
    then begin
      clrscr;
      writeln('          VETOR H');
      jjmm := (jmm+1)div(2); iimm := (imm+1)div(2);
      plota_ir_h(hh,jjmm+4,iimm+4,jjmm-4,iimm-4,FALSE);
    end
  else begin
    clrscr;
    writeln('          VETOR H');
    plota_ir_h(hh,jmm,imm,2,2,FALSE);
  end;
  cc := readkey;
end;

```

**procedure encontra\_max\_min(hh:cad\_real; jmm,imm:integer; var max1,min1:real);**

```

var ii, jj :integer;
begin
  min1:=hh[2,1];   max1:=hh[2,1];
  for jj:=1 to (jmm-1) do
    for ii:=2 to (imm-1) do
      begin
        if hh[ii,jj] < min1 then min1 := hh[ii,jj];
        if hh[ii,jj] > max1 then max1 := hh[ii,jj];
      end
    end;
end;

```

**procedure gera\_arquivo\_vetor(hh:cad\_real;imm,jmm:integer; ddx : real);**

```

var
  bolea : boolean;
  mmaxx, mminn : real;
begin
  clrscr;gotoxy(5,1);
  interroga(bolea,'Criar um arquivo de dados (S/N) ');writeln;gotoxy(5,2);
  if bolea
    then begin
      encontra_max_min(hh,jmm,imm,mmaxx,mminn);
      record_file(hh,jmm,imm,ddx,mmaxx,mminn);
    end;

```

```

    end;
  clrscr;
end;
begin
  clrscr;
  abre_arquivo(pco.arqui);
  le_variaveis(pco.im,jm,raio,om,tll,qn,kf,fator,mm,valor.arqui);
  zera_vetor(h.im+2,jm+2);zera_vetor(t.im+2,jm+2);
  Le_Q_T_H(h,t,im,jm,qn,kf,fator,mm);
  executa_valores(h,t,om,valor,im,jm);
  repeat
    clrscr;
    escolhe_funcao(pco);
    case pco of
      1 : mostra_dados(im,raio,om,tll,qn,kf,fator,mm,valor);
      2 : begin
          clrscr;
          jm := 65;   im := 65;
          jjmm := (jm+1)div(2);   iimm := (im+1)div(2);
          for jjj := 65 downto 2 do
            for iii := 2 to 65 do
              begin
                {then write(h[iii,jjj]:2:1, ' ')}
                write(sqrt(h[iii,jjj]*2):3:2, ' ');
                if (iii = (65)) then writeln;
              end;
            end;
          end;
          3 : begin
              cargas_diametro(h,im);
              gera_arquivo_vetor(h, im, jm, 3);
            end;
          end;
        cc := readkey;
        interroga(bolea,'Deseja finalizar o programa ( S/N ) ');
        until(bolea);
      end;
    end;
  end;
end.

```



## Anexo II

### MÉTODO DE VOLUMES FINITOS

Através de equações matemáticas que regem o fluxo subterrâneo, os modelos em água subterrânea passam a representar simplificada uma determinada situação real, para tanto, diante das condições anisotrópicas e não homogêneas tais equações não podem ser resolvidas analíticas, surgindo assim, a necessidade de utilizar métodos numéricos, os quais estão citados em seguida:

- Métodos de Diferenças Finitas;
- Métodos de Volumes Finitos;
- Métodos de Elementos Finitos.

O método de Volumes Finitos consiste em fazer o balanço hídrico em cada nó dentro de um volume finito, conforme Figura A2.1.

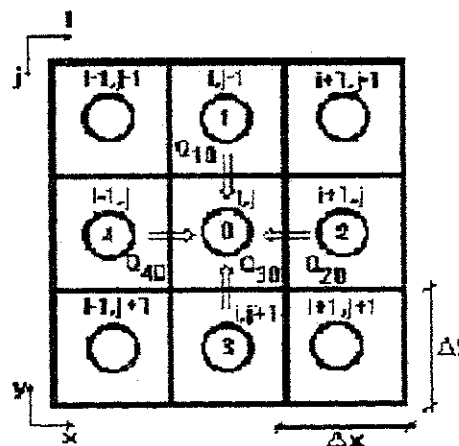


Figura A2.1 - Balanço hídrico para o elemento 0 com a indicação local (0, 1, 2...) e global (i, j) dos elementos adjacentes (Fonte : Montcero, 1997).

A partir deste balanço hidrico foram estabelecidas equações de fluxo para cada nó na malha de discretização da área, onde por exemplo para o nó  $(i,j)$  no elemento  $\theta$ , temos:

$$\sum Q_i = Q_{10} + Q_{20} + Q_{30} + Q_{40} - Q_E = 0 \quad (\text{A2.1})$$

Com o auxílio da lei de Darcy, os vários termos de fluxo se apresentam como em seguida:

$$Q_{10} = \frac{\Delta x \cdot T_{10} (h_1 - h_0)}{\Delta y},$$

$$Q_{20} = \frac{\Delta y \cdot T_{20} (h_2 - h_0)}{\Delta x},$$

$$Q_{30} = \frac{\Delta x \cdot T_{30} (h_3 - h_0)}{\Delta y},$$

$$Q_{40} = \frac{\Delta y \cdot T_{40} (h_4 - h_0)}{\Delta x},$$

$$Q_E = q_{0E} \cdot \Delta x \Delta y \quad - \text{ Bombeamento}$$

(A2.2)

onde a transmissividade calculada entre os respectivos nós vizinhos é dada por:

$$T_{10} = \frac{2 \cdot T_1 \cdot T_0}{(T_1 + T_0)} \quad (\text{A2.3})$$

Este valor de transmissividade é o valor médio harmônico, o qual tem uma vantagem prática para definir os contornos impermeáveis da área em relação ao valor médio aritmético (Kinzelbach, 1986):

$$T_{10} = \frac{(T_1 + T_0)}{2} \quad (\text{A2.4})$$

Colocando todos os termos da Equação A2.2 na expressão do balanço hídrico da Equação A2.1, reagrupando e dividindo todos os termos pela área ( $\Delta x \cdot \Delta y$ ), chegamos a equação do fluxo bidimensional, expressa pelo método de volume finito:

$$T_{10} \cdot \frac{h_1 - h_0}{\Delta y^2} + T_{20} \cdot \frac{h_2 - h_0}{\Delta x^2} + T_{30} \cdot \frac{h_3 - h_0}{\Delta y^2} + T_{40} \cdot \frac{h_4 - h_0}{\Delta x^2} + q_0 = 0 \quad (\text{A2.5})$$

Fazendo as devidas transformações de indicação local (0,1,2,... e 4) para a indicação global dentro de uma malha de discretização, onde:

| Local | Global   |
|-------|----------|
| 0     | (i, j)   |
| 1     | (i, j-1) |
| 2     | (i+1, j) |
| 3     | (i, j+1) |
| 4     | (i-1, j) |

chegamos então, a equação A2.6 que representa, em termo de volumes finitos, a equação do fluxo subterrâneo no aquífero livre, isotrópico, homogêneo e estacionário.

$$TJ_{i,j+1} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j}}{\Delta y^2} + TI_{i-1,j} \frac{h_{i-1,j} - h_{i,j}}{\Delta x^2} + TJ_{i,j-1} \frac{h_{i,j-1} - h_{i,j}}{\Delta y^2} + TI_{i+1,j} \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x^2} + q_{i,j} = 0 \quad (\text{A2.6})$$

O modelo utiliza o método iterativo de *Gauss-Seidel*, para a solução implícita do sistema de equações lineares de dimensão  $N \times N$ , que consiste em efetuar iterações nó por nó, o que significa que a transmissão de informação ao longo da malha é efetuada um nó por iteração, assim a *convergência* é normalmente lenta neste método:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta h_{i,j} \quad (\text{A2.7})$$

mesmo com a introdução de fatores de relaxação mostrado na Equação A2.8, para acelerar a taxa de *convergência*.

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + R\Delta h_{i,j} \quad (\text{A2.8})$$

onde, R é o fator de *relaxação* ( $1 < R < 2$ ),  $\Delta h_{i,j}$  a *correção* depois de  $n$ -ciclos e com critério de convergência  $\Delta h_{i,j} < 0.0001$  (tolerância).