

Carlos Alberto de Carvalho Filho

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO CAMPUS DA UFMG,
BELO HORIZONTE / MINAS GERAIS.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro

Belo Horizonte
Escola de Engenharia
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
1997

**"CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE PARTE DO SISTEMA AQUÍFERO
DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CAMPUS - UFMG/BELO HORIZONTE, MINAS
GERAIS"**

Carlos Alberto de Carvalho Filho

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos -Área de Concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em 05 de dezembro de 1997.

Por:

Prof. Celso de Oliveira Loureiro



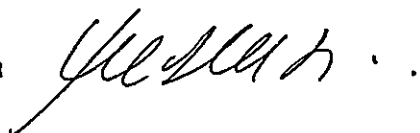
Prof. Luiz Rafael Palmier



Profª Leila Nunes Menegasse Velásquez



Prof. Ricardo Cesar Aoki Hirata



Pesq. Otávio Eurico de Aquino Branco



Aos meus pais Carlos Alberto e Nancy.

Aos meus amores Heliane e Mariana.

A Terra é a nossa escola.
A luta é o nosso caminho.
O trabalho é a nossa lição.
A experiência é o valor que
adquirimos.

André Luiz

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação, especialmente:

Ao Prof^o. Dr. Celso de Oliveira Loureiro, pela sapiência, dedicação e amizade que demonstrou durante a orientação deste trabalho.

Ao colega e amigo Otávio, grande entusiasta e incentivador deste trabalho, pelas inúmeras e sábias sugestões dadas e pela grande amizade que construímos nestes recentes anos, durante os quais nos unimos em prol do aumento da pesquisa, utilização e preservação dos mananciais subterrâneos. Muito obrigado !

Ao colega e amigo Peter, pela troca incessante de idéias e por sua inquietação produtiva que tanto me influenciou positivamente durante o desenvolvimento da dissertação.

À todos os colegas e amigos da Supervisão de Meio Ambiente do CDTN que, dentro do mais elevado espírito de equipe, colaboraram na realização deste trabalho.

Aos colegas Alberto e Pablo, pelo grande auxílio dado na digitalização dos mapas.

Ao Nayron, pela grande contribuição dada nos trabalhos de campo.

Aos colegas e amigos do curso de pós-graduação, pelo companheirismo demonstrado durante as tarefas discentes e pela saudável e saudosa convivência.

Ao Jorge “Colombiano”, pelas sugestões e discussões levantadas durante as várias etapas da realização do trabalho.

Aos colegas e amigos Claudio Camargos e Maria da Glória, pelo incentivo e pela contribuição dada nos assuntos hidrológicos tratados no trabalho.

Aos engenheiros Fausto Orlando de Parsia e Maria Donária Pereira, ambos do Departamento de Planejamento Físico de Obras da UFMG, pelo imprescindível apoio dado em várias fases do trabalho, principalmente durante a perfuração dos poços tubulares.

Ao Nilson Guiguer, pelas sugestões e orientações dadas durante a utilização do aplicativo *VisualMODFLOW*.

À direção do CDTN, por ter permitido e incentivado a minha participação no curso de pós-graduação.

Ao amigo Ronaldo Aguiar, sinônimo de dedicação, caráter e solidariedade, pela grande ajuda na resolução de problemas particulares, aspectos que indiretamente contribuíram para o desenvolvimento da dissertação.

À minha irmã Elizabeth e aos queridos sobrinhos Marcelo e Patrícia, pelas palavras de incentivo ao êxito da dissertação.

Aos meus pais, Carlos e Nancy, pela educação pretérita e pelo incentivo e carinho dado às minhas iniciativas.

À Heliane e Mariana, pelo amor compartilhado e pela compreensão às minhas ausências. Muito obrigado “meninas” !

**Caracterização Hidrogeológica da Bacia Hidrográfica do Campus da UFMG,
Belo Horizonte / Minas Gerais.**

Carlos Alberto de Carvalho Filho

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo a caracterização hidrogeológica e do fluxo da água subterrânea na bacia hidrográfica do córrego do Engenho Nogueira, particularmente na sua porção compreendida dentro dos limites da Cidade Universitária da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG e adjacências. A área de estudo, com cerca de 2,5 km², está localizada na região da Pampulha, Cidade de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, sendo atravessada no sentido sul-norte pelo córrego do Engenho Nogueira, o qual encontra-se em parte canalizado.

O plano de ação elaborado para se alcançar o objetivo proposto contemplou a formulação de um modelo conceitual do sistema aquífero e de seus aspectos físicos correlatos, além da respectiva implementação de um modelo numérico de simulação do fluxo da água subterrânea, através do código computacional *MODFLOW (VisualMODFLOW)*. Foram inventariados 26 pontos de água, sendo 14 furos de sondagem e 12 poços tubulares, os quais serviram como principal fonte de dados para o trabalho. Estes poços tubulares possuem uma profundidade final média de 80 m e os testes de bombeamento realizados apresentaram uma vazão média de 12,5 m³/h e uma vazão específica média de 0,19 l/s/m. ⑥

O cenário hidrogeológico local é constituído por um aquífero poroso granular sobreposto e em íntima comunicação hidráulica com um aquífero fissural, os quais compõem um único sistema aquífero, do tipo livre e misto, heterogêneo e anisotrópico, e com superfície freática média anual situada a 5 m de profundidade. O aquífero poroso granular possui uma espessura média de 44 m na região da várzea do córrego do Engenho Nogueira, sendo composto pelos produtos da decomposição das rochas cristalinas do embasamento e pelos sedimentos alúvio-coluviais das Formações Superficiais, apresentando uma textura arenosa a argilo-arenosa, localmente com intercalações de argila. Constituem o aquífero fissural as rochas gnáissicas fraturadas do Complexo Belo Horizonte, sendo inferido a este aquífero a espessura média de 39 m.

O modelo numérico foi implantado numa malha retangular de 3,8 km² de área, contendo duas camadas em profundidade (aquíferos poroso granular e fissural). Para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos empregou-se os métodos de Neuman e da Recuperação de Theis, obtendo-se para a condutividade hidráulica horizontal (Kh) e para a produção específica (Sy), respectivamente, os valores de 5×10^{-6} m/s (média) e de 0,09. Para os dois poços atualmente em produção, P3 e P6, estabeleceu-se vazões de 48 e 76 m³/dia, respectivamente.

Com relação às condições de contorno, foi definida uma condição de primeiro tipo (carga constante) na região localizada mais a montante da área e uma condição de segundo tipo, com fluxo zero, nas fronteiras da bacia. A partir da realização de balanço hídrico, baseado no método empírico de Thornthwaite, e na calibração do modelo numérico, estimou-se uma recarga pluvial anual de 600 mm, correspondendo a 31% da precipitação total do período analisado (dezembro/95 a novembro/96). O sistema hidrogeológico local é fortemente influenciado por um complexo sistema de drenos e pelo córrego do Engenho Nogueira, os quais foram modelados a partir tanto de observações de campo como de dados definidos pela calibração do modelo numérico.

Após a realização de alguns ajustes (calibração) no conjunto de valores inicialmente definidos para os parâmetros do modelo numérico, este foi capaz de reproduzir as profundidades médias do nível freático medidas nos poços de observação para o período analisado, com um desvio padrão de 1,65 m e um coeficiente de correlação de 0,94. De forma geral, o modelo numérico confirmou que a água subterrânea escoava preferencialmente das colinas para a região de várzea e de sul para norte, movimentando-se de forma sub-horizontal à descendente sob as colinas e nas proximidades do córrego, sofrendo forte inflexão ascendente na região da várzea onde situam-se os drenos.

Os objetivos do trabalho foram atingidos, pois foi estabelecido um modelo hidrogeológico conceitual para a área de estudo e implementado um modelo numérico, calibrado, capaz de simular o fluxo da água subterrânea no sistema aquífero local, em um regime estacionário. A carência de dados de campo, principalmente sobre as propriedades hidrodinâmicas do aquífero fissural, modelado como um “meio poroso equivalente”, e de algumas condições de contorno, são os fatores que impõem as incertezas mais significativas quanto ao uso do modelo numérico.

Além disso, são apresentadas sugestões para novos trabalhos na área de estudo visando minimizar as incertezas do modelo conceitual, possibilitando atualização no modelo numérico e ampliando os cenários possíveis de simulação prospectivas.

**Hydrogeological Characterization of The UFMG Campus Watershed,
Belo Horizonte / Minas Gerais.**

Carlos Alberto de Carvalho Filho

ABSTRACT

The main purpose of the present research work is the hydrogeological and groundwater flow characterization of the aquifer system of the Engenho Nogueira Creek watershed basin, particularly within the limits of the Central Campus of the Federal University of Minas Gerais and nearby. The site of study, with about 2.5 Km² of area, is located in the Pampulha region, City of Belo Horizonte, State of Minas Gerais, and is crossed in a south-north direction by the Engenho Nogueira Creek, which is in part channeled.

The action plan developed in support of the aforementioned goal consisted of development of a conceptual model containing the salient characteristics of the aquifer system and its related physical features, and by the subsequent implementation of the corresponding numerical model for simulation the groundwater flow, using the *MODFLOW* code (*VisualMODFLOW*). Fourteen shallow drilling holes and twelve wells were inventoried, and they were the main data sources for the work development. These wells have an average depth of 80 m and the pumping tests results show on average, 12.5 m³/h of pumping rate and a specific capacity of 0.19 l/s/m.

The local hydrogeology consists of a porous granular aquifer placed above and hydraulically connected to a fractured aquifer, constituting a unique aquifer system, mixed and phreatic type, heterogeneous and anisotropic, and with an annual average phreatic surface placed at 5 m of depth. The porous granular aquifer has an average thickness of 44 m in the lowland of the Engenho Nogueira Creek, and is composed of the weathered products of the basement rocks and by the alluvial and colluvial deposits. This aquifer presents a sandy to clay-sandy texture, locally with clay material intercalated. The fractured aquifer is composed mainly of fractured gneiss rocks of the Belo Horizonte Complex, and it has an inferred average depth of 39 m.

The numerical model was implemented in a rectangular grid with an area of 3.8 km² containing two layers (granular and fractured aquifers). The hydrodynamic parameters were estimated using Neuman and Theis Recovery methods, which result in values of horizontal hydraulic conductivity (Kh) and specific yield (Sy) of 5×10^{-6} m/s (average) and 0.09, respectively. The two production wells P3 and P6 were characterized as having discharges of 48 and 76 m³/day, respectively.

Regarding the boundary conditions, a type I condition (constant head) was defined in the region located upstream. A type II condition (no flux at the boundary of the watershed) was also imposed. From the water balance, based on the empiric method of Thornthwaite, and from the calibration of the numeric model, a pluvial recharge of 600 mm was estimated. This value corresponds to 31 % of the total precipitation occurred in the study period (December/95 through November/96). The local hydrogeological system is strongly influenced by a complex drain system and by the Engenho Nogueira Creek. Some characteristics of these subsystems were estimated from field data as well as from data defined during the calibration of the model.

After adjustments (calibration) of the parameters values initially adopted, it was possible to predict the average phreatic depth measured in the observation wells for the period in study with a standard deviation of 1.65 m and a correlation coefficient of 0.94. In general, the numeric model confirmed expectations that the direction of groundwater flow is from the hills to the lowland region and from south to north, and descending in all regions except those close to the drain.

The objectives of this work have been met, since a conceptual hydrogeological model was established for the study area and a numerical model for simulating groundwater fluxes in the local aquifer system was implemented and calibrated for a steady state situation. The scarcity of field data, specially about the fractured aquifer, and certain assumptions about boundary conditions were judged to be the major sources of uncertainties in the numerical model.

Furthermore, suggestions are presented for new studies that should minimize uncertainties in the conceptual model and increase the level of confidence associated with predictions of the numerical model.

**Caracterização Hidrogeológica da Bacia Hidrográfica do Campus da UFMG,
Belo Horizonte / Minas Gerais.**

SUMÁRIO

Lista de Figurasiv

Lista de Tabelasviii

Lista de Símbolosxi

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS 7

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA/PLANO DE AÇÃO 9

3.1 - FASE I - Trabalhos Preparatórios 9

3.1.1 - Pesquisa Bibliográfica 10

3.1.2 - Definição da Base Cartográfica e Localização da Área de Estudo..... 10

3.1.3 - Inventário de Pontos de Água 10

3.1.4 - Estudos Preliminares e de Reconhecimento 11

3.2 - FASE II - Trabalhos de Caracterização da Área de Estudo 11

3.2.1 - Estudos Geológicos e Geomorfológicos 11

3.2.2 - Balanço Hídrico e Estimativa de Recarga do Aquífero 12

3.2.3 - Estudos de Hidrologia de Superfície 14

3.2.4 - Estudos Hidrogeológicos Propriamente Ditos 15

3.3 - FASE III - Modelagem Numérica do Sistema Aquífero 23

3.3.1 - Introdução 23

3.3.2 - Definição do Objetivo do Modelo Numérico 27

3.3.3 - Modelo Conceitual..... 28

3.3.4 - Escolha do Código de Computador 29

3.3.5 - Projeto do Modelo Numérico 30

3.3.6 - Execução, Calibração e Resultados Obtidos	31
3.3.7 - Considerações Sobre a Modelagem	33
3.4 - FASE IV - Conclusões, Recomendações e Redação final	33
CAPÍTULO 4 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	35
CAPÍTULO 5 - TRABALHOS PREPARATÓRIOS	39
5.1 - Definição da Base Cartográfica	39
5.2 - Inventário de Pontos de Água	39
CAPÍTULO 6 - TRABALHOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	43
6.1 - Geologia	43
6.1.1 - Contexto Regional	43
6.1.2 - Contexto Local	45
6.2 - Geomorfologia	53
6.3 - Balanço Hídrico e Estimativa de Recarga do Aquífero	56
6.4 - Hidrologia de Superfície	60
6.5 - Estudos Hidrogeológicos	63
6.5.1 - Hidrogeologia no Contexto Regional	63
6.5.2 - Hidrogeologia Local	64
6.5.3 - Características dos Poços Tubulares	67
6.5.4 - Parâmetros Hidrodinâmicos	69
6.5.5 - Programa de Medição dos Níveis da Água Subterrânea / Mapa Potenciométrico	88
6.5.6 - Sistema de Drenos	95
6.5.7 - Estimativa de Reservas da Água Subterrânea	97
CAPÍTULO 7 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA SATURADA.....	98
7.1 - Introdução e Objetivos	98
7.2 - Modelo Conceitual	99
7.2.1 - Unidades Hidrogeológicas	99

7.2.2 - Propriedades Hidrodinâmicas	105
7.2.3 - Dados de Contorno	106
7.3 - Código de Computador - <i>MODFLOW</i>	108
7.4 - Projeto do Modelo Propriamente Dito ou Modelo de Local	109
7.4.1 - Definição da Malha	110
7.4.2 - Parâmetros Hidrodinâmicos	113
7.4.3 - Poços em Operação	113
7.4.4 - Dados de Contorno	115
7.4.4.1 - Rio	115
7.4.4.2 - Drenos	116
7.4.4.3 - Carga Constante	117
7.4.4.4 - Recarga	118
7.5 - Calibração e Resultados Obtidos com Execução do Modelo em um Regime Estacionário.....	118
7.5.1 - Objetivos da Simulação em Regime Estacionário	118
7.5.2 - Parâmetros Empregados na Execução do Modelo em Regime Estacionário	119
7.5.3 - Calibração e Resultados Obtidos	120
7.5.4 - Considerações sobre a Simulação em Regime Estacionário	128
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134 ©
APÊNDICE A - Fatores de Conversão da Evapotranspiração Potencial Mensal	140
APÊNDICE B - Definição de Alguns Parâmetros Hidrodinâmicos	141
APÊNDICE C - Dados Construtivos dos Poços Tubulares P4, P5, P8, P9, P10 e P11	145
APÊNDICE D - Descrição Sinóptica das Principais Opções de Execução do <i>MODFLOW</i> Disponibilizadas pelo <i>VisualMODFLOW</i>	150
APÊNDICE E - Fotografias	153

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1:** Ilustração das curvas de rebaixamento e recuperação versus o tempo.:18
- Figura 3.2:** Variação do rebaixamento durante o bombeamento de um poço em um aquífero livre. A unidade do rebaixamento é pés e do tempo é minutos. Baseado em Domenico & Schwartz (1990).:20
- Figura 3.3:** Curvas teóricas de $W(u_A, u_B, \eta)$ versus $1/u_A$ e $1/u_B$ para um aquífero livre (Neuman, 1975).:21
- Figura 3.4:** Fluxograma para elaboração e aplicação de um modelo numérico. Fonte: Anderson & Woessner (1992).:27
- Figura 4.1:** Localização da área de estudo.....:35
- Figura 4.2:** Mapa de situação da área de estudo. Em cinza estão os terrenos da UFMG, em verde os do Ministério do Exército, em amarelo os do CDTN e em branco outras ocupações urbanas.....:36
- Figura 5.1:** Mapa de localização dos pontos de água. Os poços tubulares estão representados por círculos vermelhos e os furos de sondagem por quadrados pretos.:41
- Figura 6.1:** Localização da área de estudo no contexto da geologia regional. Simplificado de Silva et al. (1995).:44
- Figura 6.2:** Perfil geológico vertical esquemático na várzea do córrego do Engenho Nogueira.:46 ©
- Figura 6.3:** Mapa geológico simplificado.:48
- Figura 6.4:** Seção geológica vertical A-A longitudinal à calha do córrego do Engenho Nogueira. Todos os contatos são inferidos. Apenas estão representadas as lentes de argila mapeáveis na escala do desenho. Os poços foram projetados na seção. Em alguns poços não se forneceu dados de fraturas.:50
- Figura 6.5:** Mapa de distribuição das unidades geomorfológicas. Limites aproximados.:54
- Figura 6.6:** Perfil esquemático Típico da área. 1) solo residual; 2) solo coluvial (depósito de tálus) ; 3) depósito aluvial; 4) saprólito ou rocha decomposta; 5) rocha sã do Complexo Belo Horizonte, principalmente gnaíse. Não se guardou as proporções entre as

espessuras de cada unidade.	56
Figura 6.7: Croqui de localização da área de estudo no contexto hidrológico municipal.	61
Figura 6.8: Mapa de drenagem da área de estudo.	62
Figura 6.9: Contexto hidrogeológico do Município de Belo Horizonte. Adaptado de Silva et al. (1995).	64
Figura 6.10: Perfil hidrogeológico vertical, característico do sistema aquífero do Complexo Belo Horizonte na área de estudo, especificamente na várzea do córrego do Engenho Nogueira.	65
Figura 6.11: Seção geológica/hidrogeológica longitudinal ao córrego do Engenho Nogueira.	66
Figura 6.12: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P3.	80
Figura 6.13: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P4.	80
Figura 6.14: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P5.	81
Figura 6.15: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Bombeamento no poço P4 e medições de rebaixamento no poço P5.	81
Figura 6.16: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P8.	82
Figura 6.17: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P9.	82
Figura 6.18: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P10.	83
Figura 6.19: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P11.	83
Figura 6.20: Resultado gráfico da aplicação do método de Neuman, mostrando a sobreposição dos pontos obtidos no campo, representados pelas cruzes em vermelho, com uma das curvas do tipo A ₂ para tempos	

- iniciais do ensaio. Bombeamento no poço P4 e medições no poço P5.85
- Figura 6.21:** Mapa com a configuração esperada para a superfície potenciométrica elaborado com os valores médios para o período de dezembro/95 a novembro/96. Isolinhas de 5 em 5 metros. Em vermelho estão os pontos medidos.93
- Figura 6.22:** Mapa com a expectativa de distribuição da profundidade média do nível freático, para o período de dezembro/95 a novembro/96. Isolinhas de 2 em 2 metros. Em vermelho estão os pontos medidos.94
- Figura 6.23:** Mapa de localização do sistema de drenos. SD1= subsistema de drenos no. 1, SD2=subsistema de drenos 2, SD3=subsistema de drenos 3, SD4=subsistema de drenos 4.96
- Figura 7.1:** Mapa de contorno do iso-altimétrico do fundo do aquífero poroso granular. A coloração mais escura indica maiores profundidade e espessura. Os valores estão em metros. Os poços em vermelho são os que têm dados medidos, enquanto os que estão em preto possuem dados inferidos (poços virtuais). Nota-se, em marrom, os limites da área.101
- Figura 7.2:** Mapa de contorno iso-altimétrico do fundo do aquífero fissural. As cotas altimétricas estão em metros. A coloração mais escura indica maiores profundidade e espessura. Os poços em vermelho são os que têm dados medidos, enquanto os que estão em preto os dados foram inferidos (poços virtuais). Nota-se, em marrom, os limites da área105
- Figura 7.3:** Representação do modelo conceitual, onde K_h = condutividade hidráulica horizontal, K_v = condutividade hidráulica vertical, F = fluxo da água subterrânea, S_y = produção específica, S_s = armazenamento específico, R = recarga, ES = escoamento superficial, E = evapotranspiração, P = precipitação e P3 e P6 são poços tubulares. Não se teve preocupação com a proporcionalidade das dimensões.108
- Figura 7.4:** Desenho da malha utilizada no modelo numérico. Imagem gerada pelo *VisualMODFLOW*. Nota-se o traçado do contorno da área de estudo.111
- Figura 7.5:** Configuração em planta da camada 2 - aquífero fissural. Nota-se a restrição imposta à área de ocorrência (em branco) desta camada, limitando-a à região sob as áreas de drenagem112
- Figura 7.6:** Seção vertical mostrando os limites das duas camadas aquíferas, o poço P1, uma célula contendo um dreno e outra o córrego do Engenho Nogueira.112

- Figura 7.7:** Mapa gerado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a localização dos principais parâmetros utilizados na modelagem numérica. A ilustração representa a camada 1- aquífero poroso granular.114
- Figura 7.8:** Gráfico elaborado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a correlação entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo, em regime estacionário, versus os valores médios observados para o período de Dez/95 a Nov/96, em cada um dos poços monitorados.121
- Figura 7.9:** Mapa com as linhas equipotenciais na camada 1, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam a direção de fluxo, sendo que as verdes retratam fluxo no plano, as vermelhas o fluxo ascendente (de baixo para cima) e as azuis o contrário.124
- Figura 7.10:** Mapa com as linhas equipotenciais na camada 2, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam o sentido do fluxo, sendo que as vermelhas representam o fluxo ascendente (de baixo para cima), e as azuis o contrário, fluxo descendente.125
- Figura 7.11:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte.126
- Figura 7.12:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P8 foi utilizado na calibração do modelo.126
- Figura 7.13:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P6 encontra-se em operação.: 76 m³/dia.127

- Figura 7.7:** Mapa gerado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a localização dos principais parâmetros utilizados na modelagem numérica. A ilustração representa a camada 1- aquífero poroso granular.114
- Figura 7.8:** Gráfico elaborado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a correlação entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo, em regime estacionário, versus os valores médios observados para o período de Dez/95 a Nov/96, em cada um dos poços monitorados.121
- Figura 7.9:** Mapa com as linhas equipotenciais na camada 1, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam a direção de fluxo, sendo que as verdes retratam fluxo no plano, as vermelhas o fluxo ascendente (de baixo para cima) e as azuis o contrário.124
- Figura 7.10:** Mapa com as linhas equipotenciais na camada 2, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam o sentido do fluxo, sendo que as vermelhas representam o fluxo ascendente (de baixo para cima), e as azuis o contrário, fluxo descendente.125
- Figura 7.11:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte.126
- Figura 7.12:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P8 foi utilizado na calibração do modelo.126
- Figura 7.13:** Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P6 encontra-se em operação.: 76 m³/dia.127

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: População máxima flutuante da área de estudo. Modificado de Peixoto & Pego (1996).	37
Tabela 5.1: Dados gerais dos pontos de água.	40
Tabela 6.1: Dados meteorológicos para período de dezembro/95 a novembro/96.	57
Tabela 6.2: Dados meteorológicos históricos (Período de 1961 a 1991).	58
Tabela 6.3: Balanço hídrico.	59
Tabela 6.4: Cálculo dos valores de recarga (Rc.), mensais e total no período de Dez-95 a Nov-96, para escoamentos superficiais de 10, 20 e 30% da precipitação (pp). A taxa de recarga (% Rc.) é em relação à precipitação (pp).	60
Tabela 6.5: Parâmetros gerais dos poços tubulares.	68
Tabela 6.6: Análise estatística dos dados dos poços tubulares.	69
Tabela 6.7: Teste de bombeamento no poço P3.	71
Tabela 6.8: Teste de bombeamento no poço P4.	72
Tabela 6.9: Teste de bombeamento no poço P5.	74
Tabela 6.10: Teste de bombeamento no poço P8.	75
Tabela 6.11: Teste de bombeamento no poço P9.	76
Tabela 6.12: Teste de bombeamento no poço P10.	77
Tabela 6.13: Teste de bombeamento no poço P11.	78
Tabela 6.14: Resultados da aplicação do método da Recuperação de Theis. Onde T=transmissividade, b=espessura saturada e Kh=condutividade hidráulica horizontal.	84
Tabela 6.15: Parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir da aplicação do método de Neuman T = Transmissividade, Ss = armazenamento específico, Kh = condutividade hidráulica horizontal, Kv = condutividade hidráulica vertical, Ka = grau de anisotropia (Kv/Kh) e Sy = produção específica, S=coeficiente de armazenamento.	86

Tabela 6.16: Análise estatística dos parâmetros hidrodinâmicos. (1) valores obtidos pelos métodos de Neuman e da Recuperação de Theis, (2) valores calculados apenas pelo método de Neuman, (*) valor não determinado.	86
Tabela 6.17: Variação mensal dos níveis freáticos nos poços, para o período de dezembro de 1995 a novembro de 1996.	89
Tabela 6.18: Análise estatística das oscilações mensais do nível da água subterrânea.	90
Tabela 6.19: Análise estatística da variação do nível freático, observada para o período de dezembro -1995 a novembro-1996, levando-se em conta o conjunto total de dados dos poços monitorados.	90
Tabela 6.20: Fonte de dados para a o mapa potenciométrico Os dados relativos aos pontos P0 a P11 foram medidos, enquanto os demais, PV1 a Pv21, foram inferidos.	92
Tabela 6.21: Dados gerais do sistema de drenos.	95
Tabela 7.1 : Dados empregados na construção do mapa da Figura 7.1. Os poços P0-P11 são tubulares com dados medidos, enquanto que os poços PV1-PV21 são poços virtuais com dados inferidos.	102
Tabela 7.2 : Dados empregados na construção do mapa da Figura 7.2. Os poços P0-P11 são tubulares com dados medidos, enquanto que os poços PV1-PV21 são poços virtuais com dados inferidos.	103
Tabela 7.3: Síntese dos parâmetros hidrodinâmicos calculados.	106
Tabela 7.4: Valores de recarga médias mensais e totais no período compreendido entre Dez/95 e Nov/96. Os rótulos Rc.10, Rc.20 e Rc.30 correspondem aos valores de recarga calculados, respectivamente, supondo-se escoamentos superficiais de 10, 20 e 30% da precipitação total (pp). Esta Tabela foi montada a partir da Tabela 6.4. Todos os valores estão em mm.	107
Tabela 7.5: Dados do córrego do Engenho Nogueira. O rótulo “Início” refere-se aos valores estimados para o córrego no ponto em que este entra na área de estudo. O rótulo “Fim” refere-se ao ponto onde começa a canalização do córrego.	107
Tabela 7.6: Características da malha quanto as suas dimensões em planta.	110
Tabela 7.7: Dados utilizados na modelagem do córrego do Engenho Nogueira.	116

Tabela 7.8: Dados dos drenos empregados na simulação. SD1 = subsistema Reitoria-Horto, SD2 = subsistema Veterinária-Reitoria, SD3 = subsistema CDTN-Reitoria e SD4 = subsistema COLTEC-ICEX velho.	117
Tabela 7.9: Dados de entrada para a carga hidráulica constante.	118
Tabela 7.10: Opções de execução (<i>Run Options</i>) adotadas para a execução do modelo no regime estacionário. Estas opções estão disponibilizadas no <i>VisualMODFLOW</i> e são requisitos do código <i>MODFLOW</i>	119
Tabela 7.11: Análise dos resultados da calibração do modelo em regime estacionário.	120
Tabela 7.12: Comparação entre os valores do nível freático ou carga hidráulica, calculados pelo modelo computacional nos poços de monitoração, para um regime estacionário, com os valores médios do nível freático medidos nestes poços, para o período de Dez/95 a Nov/96.	121
Tabela 7.13: Comparação entre o conjunto de valores definidos no projeto do modelo, antes do processo de calibração, com aqueles resultantes dos ajustes realizados durante a calibração do modelo.	122
Tabela 7.14: Balanço de massa. Simulação no regime estacionário.	127

LISTA DE SÍMBOLOS

β = compressibilidade do fluido

ρ = densidade do fluido

ε = evapotranspiração potencial média

μ = viscosidade do fluido

ρ_a = densidade da água

ρ_b = densidade aparente do solo

Δh = variação de carga hidráulica

Δl = distância entre dois pontos de observação

$\Delta s'$ = variação do rebaixamento residual

A = área de seção perpendicular ao fluxo da água

AR = incremento da reserva de água

C' = constante de proporcionalidade adimensional

cc = capacidade de campo

Cd = condutância

CRA = capacidade de reserva de água nos solos

d = diâmetro das partículas constituintes do meio

e = espessura do solo considerada no cálculo do CRA

ETP = evapotranspiração potencial corrigida.

ETR = evapotranspiração real

EX = excedente de água

g = aceleração da gravidade

h = carga hidráulica

h' = carga hidráulica observada durante a recuperação da água subterrânea em um poço.

hm = carga hidráulica medida

ho = carga hidráulica inicial

hs = carga hidráulica simulada

I = índice de calor anual

i = índice de calor mensal

K = condutividade hidráulica

k = permeabilidade ou permeabilidade intrínseca do meio

k' = fator de correção da evapotranspiração potencial média

K_a = grau de anisotropia de um aquífero, em função dos valores de condutividade hidráulica horizontal e vertical.

K_h = condutividade hidráulica horizontal

K_v = condutividade hidráulica vertical

K_x = condutividade hidráulica no eixo dos x

K_y = condutividade hidráulica no eixo dos y

K_z = condutividade hidráulica no eixo dos z

L = comprimento do rio/córrego em uma determinada célula

M = espessura da camada leito do rio/córrego em uma determinada célula

MAE = erro médio absoluto (*Mean Absolute Error*)

ME = erro médio (*Mean Error*)

n = porosidade total do meio

P = precipitação

p_m = ponto de murcha

Q = vazão de bombeamento

r = distância entre um poço de observação e um em bombeamento

RMS = desvio padrão (*Root Mean Squared Error or Standard Deviation*)

S = coeficiente de armazenamento

s = rebaixamento

s' = rebaixamento residual

S_s = armazenamento específico

S_y = produção específica

t = tempo

T = transmissividade

t' = tempo de recuperação

T_m = temperatura média mensal do ar

v = descarga específica ou velocidade de Darcy

w = largura do rio/córrego em uma determinada célula

W = termo geral para designar fonte ou sumidouro

$W(u)$ = função do poço

z = tempo de bombeamento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A água doce é um bem fundamental ao desenvolvimento e manutenção da vida no planeta. Esta afirmativa, embora seja tão óbvia e inquestionável, nem sempre é lembrada pelo político ou pelo cidadão comum, pelo menos nos locais onde a água doce é abundante. Talvez seja exatamente por isso que sua escassez, pelo menos da água dita superficial, e poluição vêm apresentando um crescimento assustador, ao ponto de preocupar instituições nacionais e internacionais.

Na Agenda 21, documento final da Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UnCED, 1992), destinou-se um capítulo inteiro, o de nº.18, para tratar da água, ressaltando-se que “A escassez generalizada, a destruição gradual e o agravamento da poluição dos recursos hídricos em muitas regiões do mundo, ao lado da implantação progressiva de atividades incompatíveis, exigem o planejamento e manejo integrados desses recursos(...)incluindo tanto águas de superfície como subterrâneas(...)”.

Na década de 70 o mundo foi acometido por uma crise sem precedentes até então: a crise do petróleo. De acordo com o *World-Watch Institute* (Jornal do Brasil, 1995) o mundo caminha para uma nova crise em escala planetária: a crise da água. O crescimento populacional e a poluição dos mananciais apontam para uma falta deste bem, fundamental para a manutenção da vida, mesmo em países com enormes recursos hídricos, como o Brasil.

O problema de escassez da água é tão grave que, recentemente, o representante da *FAO* (*Food and Agriculture Organization*) no Brasil advertiu que “A ameaça de falta de suprimento de água limpa no planeta representa hoje o maior perigo para o desenvolvimento e também a maior ameaça para a saúde e nutrição humana” (Saneamento Ambiental, 1995). Dentro deste contexto, o então coordenador de Bacias Hidrográficas da EMATER-MG fez o seguinte prognóstico: “As guerras do futuro não serão pela terra, mas pela água doce(...)” (Mourão, 1994).

Quando se faz referência a água doce não se pode deixar de citar as águas subterrâneas, pois estas constituem cerca de 95% do total de água doce líquida existente no planeta,

correspondendo a um volume estimado de 4 milhões de km³ (Freeze & Cherry, 1979). Estes números denotam a importância quantitativa dos mananciais subterrâneos.

Em termos de água subterrânea a principal unidade geológica é o aquífero. Rebouças (1996), ao abordar o gerenciamento dos recursos hídricos de forma integrada, relacionou várias funções que os aquíferos podem desempenhar, destacando a mais tradicional, *função produção*, que é a de fornecer água para vários usos. Entre outras funções destacam-se: *função ambiental*, *função transporte*, *função estratégica*, *função filtro*, *função energética* e *função estocagem e regularização*. Todas estas funções, em conjunto, vêm contribuir para valorizar conceitualmente e de forma definitiva a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais, conforme previsto na lei Federal nº.9433 de 8 de janeiro de 1997.

Tem-se observado, a nível mundial e principalmente na última década, uma crescente utilização das águas subterrâneas no abastecimento público e privado. Tal fato é devido principalmente ao encarecimento dos custos relacionados com a utilização das águas superficiais, particularmente no tratamento e adução, em função da escassez progressiva da água de boa qualidade nos rios, lagos, etc., nas proximidades dos grandes centros urbanos. Por outro lado, uma série de aspectos podem explicar a crescente valorização dada às águas subterrâneas como fonte de abastecimento doméstico, industrial ou agrícola, quando comparadas com os recursos hídricos superficiais, entre eles (Rebouças, 1996): a grande capacidade de armazenamento dos aquíferos, evitando grandes variações sazonais na qualidade e quantidade das águas; a potabilidade natural dispensa os investimentos vultosos de tratamento; a larga distribuição espacial das águas subterrâneas, possibilitando a captação no local ou nas proximidades da demanda; os investimentos são relativamente pequenos quando comparados com as obras de captação, adução e tratamento das águas superficiais; a variação no volume de água retido pelos mananciais subterrâneos, devido à evaporação e ao assoreamento, é respectivamente insignificante e nulo, ao contrário do que ocorre com as águas dos rios e lagos.

Várias metrópoles mundiais fazem uso das águas subterrâneas no seu sistema de abastecimento público. No Brasil, segundo Rebouças (1996), estima-se que 61% da população se auto-abastece com água subterrânea, e se houvesse uma utilização mais racional das potencialidades hidrogeológicas, seria possível abastecer 80% das cidades brasileiras a partir destes mananciais.

Em Belo Horizonte, sabe-se que a utilização das águas subterrâneas remonta à época da fundação da cidade, através principalmente da captação das fontes naturais que deviam

abundar, outrora, as vertentes das serras e colinas. Somente na década de 50 foram perfurados os primeiros poços tubulares profundos no município de Belo Horizonte (Silva et al., 1995). A região carece de estudos hidrogeológicos mais detalhados e de uma política de aproveitamento dos recursos hídricos, capaz de fomentar o aproveitamento dos mananciais subterrâneos. Somente em 1995, num esforço conjunto da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte e da Universidade Federal de Minas Gerais, foi realizado um estudo abrangente, profundo e integrado dos aspectos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais no Município de Belo Horizonte. Este trabalho, realizado por Silva e seus colaboradores (1995), tornou-se uma referência para estudos de detalhamento que venham a abordar estes temas, na região.

É evidente que o crescimento da exploração das águas subterrâneas proporcionou uma valorização das mesmas e uma maior preocupação com a preservação destes mananciais. Estes aspectos têm estimulado o desenvolvimento de estudos integrados, multidisciplinares, que procuram tanto conhecer as potencialidades hidrogeológicas do meio como levantar considerações ambientais e preservacionistas, particularmente sobre a vulnerabilidade do sistema aquífero às agressões antrópicas. Na análise dos impactos ambientais causados por instalações industriais, depósitos de rejeitos, aterros sanitários, etc., não se pode mais descartar a análise dos efeitos da implantação destes empreendimentos nos recursos hídricos subterrâneos.

O estudo dos mecanismos de transporte de contaminantes em meios porosos saturados e não saturados é hoje um importante tema de pesquisa, principalmente nas avaliações prospectivas das concentrações dos poluentes no solo e nas águas subterrâneas. Para a simulação dos mecanismos de migração ou transporte de contaminantes num determinado sistema aquífero, é fundamental o conhecimento, entre outros, dos parâmetros hidrodinâmicos, e da distribuição espacial do fluxo da água subterrânea neste sistema.

Com a finalidade prioritária de contribuir para o conhecimento das potencialidades hidrogeológicas do Município de Belo Horizonte e de formar grupo de pesquisa, com competência interdisciplinar, capaz de fomentar e realizar estudos básicos e de ponta, visando a avaliação, o aproveitamento e a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, criou-se o Projeto Hidrogeológico da Bacia do Engenho Nogueira. - PROHBEN. Este projeto é fruto da cooperação entre o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN, órgão da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, e o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA, da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Para alcançar seus

objetivos, o PROHBEN vem implantando, na área do Campus-Pampulha da UFMG, uma bacia hidrogeológica experimental, capaz de permitir além do treinamento, absorção e desenvolvimento de novos métodos, equipamentos e procedimentos de técnicas nucleares e convencionais aplicados aos estudos hidrogeológicos, o aumento da capacitação na simulação do transporte de contaminantes em meios porosos. Ressalta-se que a estação experimental já é alvo de quatro dissertações de mestrado e de dois projetos de pesquisa financiados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG.

A presente dissertação é parte integrante do referido Projeto e se concentra na caracterização hidrodinâmica do sistema aquífero local, apresentando como resultado tanto um modelo conceitual físico, como um modelo numérico de simulação do fluxo subterrâneo, através da aplicação do código *MODFLOW*.

A região utilizada para o desenvolvimento deste trabalho abrange toda a área do PROHBEN, e já foi alvo, no passado, de estudos específicos cujos resultados contribuíram para a realização da dissertação. Em 1960, técnicos do Instituto de Pesquisa Radioativas - IPR, atual CDTN, realizaram estudo geológico-hidrogeológico da área da Cidade Universitária. Este trabalho (Mendes et al., 1960) teve por objetivo complementar o Relatório de Prevenções de Acidentes, elaborado em função da entrada em funcionamento do Reator Nuclear Triga I do CDTN, em novembro de 1960, e passou a servir de referência para os estudos subseqüentes no local. Os autores caracterizaram a área como de ocorrência predominante de gnaisses, de idade provável arqueana, em adiantado grau de decomposição. Identificaram dois "lençóis de água": o primeiro seria bem superficial, com profundidade média de 3,5 m, e estaria relacionado com um horizonte aluvionar argiloso, muito impermeável, responsável pela presença dos brejos nas regiões mais baixas. O segundo nível estaria a 12,0 m de profundidade e repousaria sobre o embasamento cristalino fresco.

Em 1969, a área foi novamente alvo de investigações hidrogeológicas, agora com enfoque no aproveitamento do manancial subterrâneo da Cidade Universitária (Branco & Branco, 1969). Este estudo confirmou o modelo geológico e hidrogeológico proposto por Mendes e colaboradores, em 1960, acrescentando o papel dos fraturamentos presentes no gnaiss fresco como estrutura armazenadora de água. Os autores propuseram a perfuração de quatro poços tubulares, indicando as suas locações, com profundidades de 80 m a 100 m, portanto atingindo o embasamento cristalino são, e estimaram uma produção de água de 6.000 a 10.000 l/h por poço.

Durante o ano de 1976 foram realizados dois trabalhos na área. O primeiro, Rosa (1976), apresentou um esboço geomorfológico parcial da Cidade Universitária, definindo 3 compartimentos de relevo: topo, vertentes e várzea. O segundo trabalho, Noger (1976), fez uma revisão do estudo realizado por Mendes et al (1960), pouco acrescentando às informações já existentes.

Em 1979, o CDTN, situado na Cidade Universitária, emitiu o "Relatório de Análise de Segurança da Usina Piloto de Enriquecimento" (Nuclebrás, 1979), onde apresentou uma descrição pormenorizada dos aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, etc., da área, baseada principalmente nas informações contidas nos trabalhos anteriormente realizados. Abordou-se também, a hipótese de um acidente e as conseqüências causadas pela propagação de um contaminante no sistema aquífero local, o que já havia sido tratado por Mendes et al. (1960).

Com a finalidade de determinar zonas geofisicamente favoráveis a locação de poços tubulares profundos no Campus da UFMG, foi realizado em 1992, pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, um levantamento por eletrorresistividade do subsolo local (Vieira & Drews, 1992). Como resultado deste trabalho foram selecionadas duas faixas anômalas, mais promissoras à exploração das águas subterrâneas.

Dos 8 poços tubulares citados pela bibliografia como existentes na área, localizou-se, durante o desenvolvimento da dissertação, 6 poços sendo que dois ainda em funcionamento. Em 1995, visando utilizar o manancial subterrâneo como fonte complementar ao abastecimento de água fornecido pela companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA, a UFMG perfurou 7 poços no seu Campus-Pampulha, sendo que 6 dentro da área de interesse ao presente estudo. A produção média de água, estimada para quando estes 6 poços estiverem em funcionamento, juntamente com os 2 já produtores, é de 60000 m³ por mês.

As informações geradas pela perfuração e pelos ensaios de produção e bombeamento destes poços, antigos e recentes, foram fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho, o qual foi dividido em oito capítulos. No Capítulo 2 expõe-se os seus objetivos e as justificativas para a realização do mesmo, destacando-se a sua relevância tanto acadêmica quanto prática.

No Capítulo 3 faz-se uma descrição da metodologia/plano de ação utilizada no desenvolvimento do trabalho, de modo a se alcançar os objetivos propostos. No Capítulo 4 apresenta-se a localização da área e alguns aspectos sobre o uso e ocupação do solo, enquanto

que no Capítulo 5 discorre-se sobre os trabalhos preparatórios, com ênfase no inventário de pontos de água.

As características geológicas/geomorfológicas, hidrológicas e hidrogeológicas da área de estudo são apresentadas no capítulo 6, assim como o balanço hídrico. Neste Capítulo procurou-se reunir todas as informações necessárias à construção do modelo hidrogeológico conceitual local.

No Capítulo 7 descreve-se os procedimentos empregados na modelagem numérica de simulação do fluxo da água subterrânea na área, assim como os resultados obtidos com as simulações. Constam também deste capítulo, detalhes do código *MODFLOW* assim como uma descrição dos módulos do aplicativo *VisualMODFLOW*, utilizado como gerenciador dos dados de entrada e saída, e acionador do processamento via *MODFLOW*.

Finalmente, no Capítulo 8, apresenta-se as conclusões do trabalho e as recomendações sugeridas para que se possa, através de trabalhos complementares, aprimorar os resultados e contribuir ainda mais para o desenvolvimento do tema em questão.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O trabalho tem por objetivo principal a determinação da dinâmica do fluxo da água subterrânea na área de estudo, através do levantamento e processamento de dados de campo e da literatura.

O plano de ação elaborado para alcançar este objetivo contempla a formulação de um modelo conceitual para o sistema aquífero local e a implementação de um modelo numérico de simulação do fluxo das águas subterrâneas.

Também é objetivo desta dissertação apresentar uma avaliação preliminar das potencialidades hídricas subterrâneas do local, de modo a contribuir para a análise do aproveitamento destes mananciais no abastecimento de água da UFMG, do CDTN e da comunidade local.

Os tópicos abordados no Capítulo 1 demonstraram a atual preocupação mundial com a degradação e escassez dos recursos hídricos, e também com a carência de estudos visando a proteção da qualidade dos mananciais subterrâneos e a gestão integrada dos recursos hídricos. Estes aspectos, por si só, já justificam o desenvolvimento da presente dissertação. No entanto, outros aspectos vêm demonstrar, ainda mais, a relevância deste trabalho, os quais são:

- o trabalho trará subsídios para a avaliação das potencialidades do sistema aquífero da região como fonte de abastecimento de água para a comunidade local;
- devido às características geológicas/hidrogeológicas da área enfocada pela dissertação, os resultados obtidos neste estudo irão contribuir, ainda que de forma modesta, para o melhor conhecimento dos sistemas aquíferos que ocorrem no embasamento pré-cambriano do Brasil, mais especificamente aqueles do tipo misto, isto é, com manto de alteração bem espesso (aquífero poroso granular) sobreposto à rocha sã fraturada (aquífero fissural). Este tipo de sistema aquífero tem grande importância hidrogeológica no Brasil, pois abrange cerca de 4 milhões de km²,

correspondendo à aproximadamente 50% da área do território nacional, e armazena em torno de 10.000 km³ de água (Rebouças, 1996);

- os resultados apresentados por este trabalho servirão de base para o desenvolvimento de futuros estudos na área da estação hidrogeológica experimental do PROHBEN. A elaboração de um modelo matemático de simulação do fluxo da água subterrânea tornará viável a simulação computacional do transporte de contaminantes no meio poroso local, além de permitir estudos de previsão, especialmente quanto ao comportamento do sistema hídrico subterrâneo frente a fenômenos naturais e/ou antrópicos;
- Por ser o primeiro trabalho do PROHBEN, e ter sido desenvolvido segundo os objetivos deste projeto, a sua realização será o marco inicial para a consolidação de grupo interdisciplinar e interinstitucional de pesquisa em hidrogeologia e ciências afins;
- finalmente, ressalta-se que esta dissertação vem ao encontro das propostas de ações/objetivos sugeridas por Rebouças (1996), ao elaborar um diagnóstico do setor de hidrogeologia para o Grupo Técnico do Subprograma de Geociências e Tecnologia Mineral, do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT. Neste documento o autor enfatiza que, para se promover o desenvolvimento da hidrogeologia no país, fundamental para o crescimento sócio-econômico da nação, deve-se incentivar, entre outras ações: a consolidação de grupos interdisciplinares de pesquisa e formação de recursos humanos tais como a pós-graduação; o desenvolvimento de estudos geológicos/hidrogeológicos básicos e de ponta; a pesquisa de problemas de uso e proteção das águas subterrâneas; e a realização de cursos práticos abrangendo vários tópicos, tais como a modelagem matemática do fluxo das águas subterrâneas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA / PLANO DE AÇÃO

Para que os objetivos propostos fossem alcançados, a estratégia adotada foi dividir o trabalho em 4 fases, subdivididas em etapas: Fase I, de trabalhos preparatórios; Fase II, contemplando os trabalhos de caracterização da área de estudo; fase III, relativa à modelagem numérica do sistema aquífero; e Fase IV, de análise dos resultados, conclusões, recomendações e redação da dissertação.

Na prática, durante o desenvolvimento do trabalho não se teve a preocupação de seguir de forma rígida a seqüência de execução das fases propostas. Na realidade, o tema em estudo faz com que o desenvolvimento se processe de forma espiral ascendente. Por exemplo, durante a implementação do modelo numérico (Fase III), teve-se a necessidade, em várias ocasiões, de uma reavaliação do modelo conceitual, sendo necessária as vezes uma nova investigação de campo (Fase II). O mesmo acontecia com as etapas dentro de uma fase, por exemplo, nos estudos hidrogeológicos, as diversas metas de trabalho não tinham uma separação nítida, em função da complementariedade dos conhecimentos envolvidos.

O plano de ação adotado foi baseado nas metodologias propostas por Custódio & Llamas (1976), e por Anderson & Woessner (1992), para a realização de estudos hidrogeológicos e para a modelagem numérica do fluxo das águas subterrâneas, respectivamente. Estas metodologias, na verdade, se integraram durante o desenvolvimento do trabalho.

3.1 - FASE I - Trabalhos Preparatórios

Nesta fase, foram executadas as etapas que tiveram por objetivo estruturar a base do trabalho, de maneira a formar uma coleção de dados já existentes sobre a área de estudo, realizar o inventário de pontos de água, definir a base cartográfica do trabalho e, finalmente, inserir a área dentro de um contexto geológico e hidrogeológico regional.

3.1.1- Pesquisa Bibliográfica

Esta etapa teve por finalidade reunir a documentação existente sobre a área de estudo, e que fosse de serventia para a realização das etapas e fases subseqüentes. Alguns dados históricos foram obtidos nesta etapa, citando-se entre outros: altura do nível das águas, qualidade das águas, planilhas de testes de bombeamento, perfis geológicos de furos de sondagem e de poços tubulares, dados de vazão de poços, investigação geofísica do local. Também foi feita uma seleção de artigos técnicos e livros que tratassem do tema da dissertação, de modo a dar o suporte teórico necessário.

3.1.2 - Definição da Base Cartográfica e Localização da Área de Estudo

O objetivo desta etapa foi o de definir a escala de trabalho e de montar o mapa planialtimétrico básico, a ser utilizado na dissertação. A escala de trabalho é função dos objetivos que se pretende atingir num estudo hidrogeológico. Todas as informações geradas pelas etapas subseqüentes, e que pudessem ser identificadas espacialmente, foram lançadas neste mapa básico. A digitalização das informações geográficas foram feitas nesta etapa, através dos aplicativos *Corel Draw* e *Idrisi*.

3.1.3 - Inventário de Pontos de Água

Denomina-se inventário de pontos de água à compilação e análise de todos os dados[©] relacionados com a hidrologia subterrânea do local em estudo, obtidos a partir das informações oriundas dos pontos de água, assim denominados os locais onde se pode acessar de forma direta ou indireta o aquífero, tais como todas as perfurações existentes (poços, sondagens, etc), em exploração ou não, abandonadas e mesmo destruídas, além de nascentes, lagos etc. (Custódio & Llamas, 1976). Os dados levantados nesta etapa foram armazenados de forma sistemática, utilizando-se padronizações já existentes, nas quais registrou-se a localização e identificação do ponto, as características técnicas de construção dos poços tubulares, o perfil geológico interceptado pela sondagem, os equipamentos de bombeamento, os dados do teste de bombeamento, parâmetros hidrodinâmicos, etc.

Esta compilação de dados é uma das mais importantes etapas no desenvolvimento dos trabalhos hidrogeológicos em geral, já que a sua realização é um meio rápido e pouco oneroso

de se conhecer várias características hidrogeológicas do sistema aquífero local. Algumas destas características são mencionadas por Custódio & Llamas (1976): o volume de água subterrânea extraído anualmente na região; estimativa de parâmetros hidrodinâmicos, tais como a transmissividade do aquífero; a geologia de subsuperfície, a partir dos perfis litológicos dos poços e sondagens; e a evolução histórica das vazões e níveis potenciométricos. Este inventário foi fundamental para o desenvolvimento da dissertação, além de contribuir para a formação de uma base de dados hidrogeológicos, de grande valia para os estudos futuros.

3.1.4 - Estudos Preliminares e de Reconhecimento

O objetivo fundamental desta etapa foi o de posicionar a área de estudo dentro de um contexto regional, a partir do reconhecimento de suas características físicas mais gerais. Buscou-se, também, delinear em mapa, algumas inferências relativas a contatos e estruturas geológicas, zonas aquíferas, contornos hidrogeológicos, paisagens geomorfológicas, entre outras, as quais foram investigadas em detalhe na fase seguinte.

3.2 - FASE II - Trabalhos de Caracterização da Área de Estudo

De acordo com Custódio & Llamas (1976) “A hidrogeologia subterrânea é uma ciência interdisciplinar, e por conseguinte, seus métodos de trabalho fazem uso de muitas técnicas de outras áreas da ciência.”. Dentro desta filosofia é que se desenvolveu esta fase, que objetivou a execução de estudos detalhados em vários setores da ciência, de maneira a compor uma base de sustentação técnica para o estabelecimento de um modelo hidrogeológico conceitual para o local de estudo.

3.2.1 - Estudos Geológicos e Geomorfológicos

Os mapas geológicos, topográficos e as fotografias aéreas constituem instrumentos básicos e imprescindíveis nos estudos das águas subterrâneas (Custódio & Llamas, 1976). O objetivo desta etapa foi o de elaborar, a partir dos levantamentos geológicos/geomorfológicos de campo e das informações do subsolo (sondagens), um modelo geológico tridimensional para a área de estudo, capaz de permitir a identificação e visualização da distribuição espacial

das unidades hidrogeológicas, além da geometria e das condições de contorno do sistema aquífero, contribuindo para o estabelecimento do modelo conceitual hidrogeológico local.

A análise geomorfológica teve por objetivo identificar as formas de relevo existentes na área, relacionado-as com a geologia e tendo a preocupação de associá-las com aspectos da hidrogeologia, e da hidrologia, tais como as áreas de maior potencial para recarga do aquífero.

Para alcançar o objetivo desta etapa, foi necessário o estabelecimento e execução de metas, em conformidade com a metodologia empregada nos estudos geológicos em geral: *fotointerpretação*, buscando-se identificar falhamentos e zonas de fraqueza, a partir, principalmente, da observação da rede de drenagem; *trabalhos de campo*, com a realização de perfis e visitas a exposições dos materiais integrantes do aluvião, do colúvio e do manto de alteração das rochas do embasamento; e *elaboração do mapa geológico* e confecção de seções geológicas.

3.2.2 - Balanço Hídrico e Estimativa de Recarga do Aquífero

Esta etapa teve por objetivo realizar o balanço hídrico e apresentar uma estimativa de recarga do sistema aquífero em estudo. Para o cumprimento dos objetivos foram analisados os dados da precipitação e da temperatura do ar, no período de dezembro de 1995 a novembro de 1996, e aplicado o método empírico de THORNTWAITE para a estimativa da evapotranspiração potencial. Este método tem como variáveis primárias de entrada a precipitação, a temperatura do ar e a capacidade inicial de reserva de água, e utiliza uma fórmula muito prática que permite calcular a evapotranspiração potencial com satisfatória[©] aproximação, com base apenas na temperatura média do ar e de um fator de correção dependente da latitude ou do comprimento real do dia. Com auxílio de planilhas de cálculo pode-se determinar a evapotranspiração potencial mensal média de uma região e conseqüentemente sua distribuição anual.

A evapotranspiração potencial pode ser entendida como a quantidade de água que teoricamente seria transferida da superfície à atmosfera numa área vegetada, sem causar excedentes ou deficiências de umidade no solo. Quando há deficiência de água no solo a evapotranspiração fica reduzida, passando a ser denominada de evapotranspiração efetiva ou real.

Para o cálculo do balanço hídrico pelo método de THORNTWAITE, parte-se da média mensal das temperaturas diárias para se calcular o índice de calor mensal (i), segundo a equação:

$$i = \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514} \quad (3.1)$$

onde T_m representa a temperatura média mensal do ar em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$). O índice de calor anual é dado por $I = \sum i$.

Pela Equação (3.2) obtém-se a evapotranspiração potencial média (ε) em milímetros (mm), e que deve ser corrigida em função da insolação máxima diária. Esta correção é feita pelo fator de correção (k'), dependente da latitude, obtendo-se assim a evapotranspiração potencial em mm (ETP), pela Equação (3.3):

$$\varepsilon = 16 \left(10 \frac{T_m}{i} \right)^a \quad (3.2)$$

$$\text{ETP} = k' \varepsilon \quad (3.3)$$

onde $a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0,4924$ e k' é o fator de correção cujos valores encontram-se tabulados no Apêndice A.

Uma das finalidades do balanço hídrico é quantificar a deficiência ou o excesso de água em uma bacia hidrográfica, num determinado intervalo de tempo. Para a sua resolução emprega-se a Equação (3.4):

$$P = \text{ETR} + \text{EX} + \text{AR} \quad (3.4)$$

na qual P é a precipitação (mm), ETR é a evapotranspiração real (mm), EX é o excedente de água (mm), correspondendo ao escoamento superficial mais a infiltração, e AR é o incremento

da reserva de água (mm) utilizável pelas plantas. Deve-se observar sempre a condição de evapotranspiração real menor ou igual a evapotranspiração potencial: $ETR \leq ETP$.

Para iniciar o balanço hídrico tem que se adotar um valor para a reserva inicial de água utilizável pelas plantas, que deve corresponder à capacidade de reserva de água nos solos (CRA), calculado a partir da Equação (3.5):

$$CRA = \frac{cc - pm}{100} e \frac{\rho b}{\rho a} \quad (3.5)$$

onde CRA é a capacidade de reserva de água (mm), cc é a capacidade de campo (% em peso), pm é o ponto de murcha (% em peso), e é a espessura do intervalo considerado, pb é a densidade aparente do solo (g/cm^3) e pa é a densidade da água (g/cm^3).

Muitos autores definem a capacidade de campo (cc) como sendo o teor de água presente no solo apta de ser utilizada pela planta. O ponto de murcha ou murchamento (pm) é o valor de umidade do solo abaixo do qual as plantas não conseguem retirar água em quantidade suficiente para satisfazer as suas necessidades de transpiração (Matos, 1995 in Raposo, 1997), indicando o início do período da seca nas regiões onde esta é rigorosa.

A partir do valor obtido para o excedente anual de água, resultante do balanço hídrico, estimou-se a taxa de recarga, adotando-se um valor para o escoamento superficial entre 10-30% da precipitação no período, conforme resultados obtidos em estudos recentes (Freeze & Cherry, 1979). ©

3.2.3 - Estudos de Hidrologia de Superfície

As informações referentes a localização e vazão dos rios/córregos são de extrema utilidade para os estudos das águas subterrâneas, pois contribuem na caracterização do sistema hidrogeológico (Custódio & Llamas, 1976). Esta etapa teve por finalidade a locação no mapa básico da rede de drenagem e das obras de engenharia hidráulica existentes na área, tais como córregos, drenos e canalizações. Embora reconheça-se a importância que a realização de medições das vazões dos mananciais de superfície teria para a dissertação, estas não puderam ser realizadas.

3.2.4 - Estudos Hidrogeológicos Propriamente Ditos

Estão incluídas nesta etapa todos aqueles estudos/atividades que fundamentam a caracterização hidrogeológica da área de estudo, tais como: a caracterização hidrogeológica num contexto regional e local, com a individualização das unidades hidrogeológicas; a determinação das características dos poços tubulares; o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos a partir da análise dos resultados dos testes de bombeamento; o programa de medição sistemática dos níveis da água subterrânea, com elaboração do mapa potenciométrico; a análise do sistema de drenagem local; e a estimativa de reserva da água subterrânea.

O conceito de unidade hidroestratigráfica ou hidrogeológica foi introduzido por Maxey, em 1964, e reavaliado por Seaber em 1988 (in Anderson e Woessner, 1992). O princípio básico definido por estes autores é que se deve agrupar ou subdividir as formações geológicas em unidades hidrogeológicas aquíferas ou confinantes. Havendo necessidade de um refinamento da divisão das unidades, como pode ocorrer em trabalhos executados em escala de muito detalhe, faz-se necessário defini-las segundo o valor intrínseco da condutividade hidráulica, por exemplo. Na presente dissertação foram individualizadas duas unidades hidrogeológicas, as quais caracterizam dois tipos de aquífero: fissural e poroso granular.

Utilizando-se dos poços tubulares, já inventariados, promoveu-se uma campanha de medição do nível da água subterrânea, com periodicidade semanal, tendo por objetivos: estabelecer uma relação entre as chuvas e a recarga do aquífero; estimar a direção do escoamento ou fluxo da água subterrânea; possibilitar uma representação espacial da superfície potenciométrica periodicamente; e formar uma base de dados, que com a continuação das medições, será de utilidade para os futuros estudos. Esta campanha teve início em outubro de 1995 e prossegue até hoje.

Os chamados Testes de Bombeamento foram criados visando suprir uma carência que se tinha no passado, que era a falta de uma ferramenta prática de avaliação dos mananciais subterrâneos como fontes de suprimento de água. Os ensaios de bombeamento trouxeram uma grande contribuição para o estudo das potencialidades hídricas dos aquíferos. A partir da análise dos resultados obtidos com estes ensaios de campo pode-se calcular certos parâmetros hidráulicos do aquífero, tais como a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T), o coeficiente de armazenamento (S), a produção específica (S_y) e o armazenamento específico (S_s). As definições destes parâmetros encontram-se no Apêndice B.

A teoria clássica da hidráulica dos poços se baseia no modelo e na solução de Theis, proposta em 1935 (in Freeze & Cherry, 1979), que foi idealizada em analogia à expressão matemática que descreve a remoção do calor, a uma taxa constante, de uma lasca de material homogêneo e de extensão infinita (Domenico & Schwartz, 1990). A solução de Theis foi desenvolvida para ensaios em aquíferos confinados, homogêneos e de extensão horizontal infinita, e foi adotada na maioria dos ensaios hidráulicos realizados na hidrologia subterrânea. Foi escrita em termos do rebaixamento s , e é expressa pela equação:

$$s = h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad (3.6)$$

onde $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ (3.7)

h_0 = carga hidráulica inicial

h = carga hidráulica final, no instante t

Q = vazão de bombeamento

T = transmissividade

r = distância do poço de observação ao poço bombeado

s = rebaixamento

A integral presente na Equação (3.6) é conhecida dos matemáticos e existem tabelas com valores para a sua resolução, podendo-se representá-la por uma série infinita, alterando-se a Equação (3.6) para: ©

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} \dots \right) \quad (3.8)$$

Analistas verificaram que a integral exponencial da Equação (3.6) é função apenas do limite inferior da integração, o que permite que esta equação seja escrita na forma:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3.9)$$

O termo $W(u)$ é conhecido como função u do poço, indicando sua dependência aos valores de u expressos na Equação (3.7). O valor da integral exponencial pôde ser

determinado e tabulado para vários valores de u . Entre os termos que constituem u , o coeficiente de armazenamento S e a transmissividade T podem ser considerados constantes, enquanto a distância r e o tempo t são variáveis. Quando se plota os valores de $W(u)$ versus os valores de u ou $1/u$, se obtém uma curva, denominada curva típica de Theis ou curva de Theis, a qual revela o perfil de um cone de depressão como função da distância r .

Vários autores propuseram modificações à solução de Theis, de modo a adaptá-la a situações específicas, criando novos métodos de cálculo dos parâmetros hidrológicos, como por exemplo: aquíferos semi-confinados - Hantush, 1964 (in Domenico & Schwartz, 1990); aquíferos livres - Neuman (1975); e poços com penetração parcial no aquífero - Hantush, 1964 (in Domenico & Schwartz, 1990).

A partir dos dados obtidos nos ensaios de bombeamento realizados nos poços tubulares da área de estudo, efetuou-se o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos, através da aplicação dos métodos da Recuperação de Theis e de Neuman. A escolha destes métodos foi função das características do aquífero (livre) e dos ensaios de bombeamento empregados.

O Método da Recuperação de Theis foi originalmente desenvolvido para aquíferos confinados, mas vem sendo utilizado em aquíferos livres e semi-confinados, conforme Neuman (1975) e Starpoint Software (1995). De acordo com Domenico & Schwartz (1990), é um dos métodos indicados na análise de testes de bombeamento realizados em poço único, ou seja, testes em que os dados de recuperação são medidos no próprio poço bombeado. Situação predominante nos ensaios efetuados nos poços da área de estudo. Para se apresentar a equação utilizada neste ensaio de recuperação, faz-se necessário citar o trabalho de Cooper & Jacob, de 1946 (in Freeze & Cherry, 1979). Estes autores observaram que para valores pequenos de u (medições no próprio poço), o somatório da série da Equação (3.8), além do $\ln u$, tornava-se desnecessário, portanto:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln u) \quad (3.10)$$

Substituindo-se u pela Equação (3.7) :

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad (3.11)$$

Sabendo-se que $-\ln x = \ln 1/x$:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2 S} - 0,5772 \right) \quad (3.12)$$

Como $\ln 1,78 = 0,5772$ e $\ln x = 2,3 \log x$, então:

$$s = h_0 - h = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (3.13)$$

Se um poço é bombeado durante um período de tempo, e depois é desligado, o rebaixamento medido a partir deste momento é conhecido como rebaixamento residual, que é o valor do nível da água antes do bombeamento (nível estático) menos o valor do nível da água em qualquer instante após o bombeamento ter cessado. Conforme ilustrado na Figura 3.1, o rebaixamento residual pode ser expresso de forma aproximada, como a diferença numérica entre o rebaixamento previsto no poço, caso o bombeamento tivesse continuado, e a recuperação do poço em resposta à presença imaginária de um poço de injeção, de igual vazão, superposto ao poço bombeado a partir do instante em que este foi desligado.

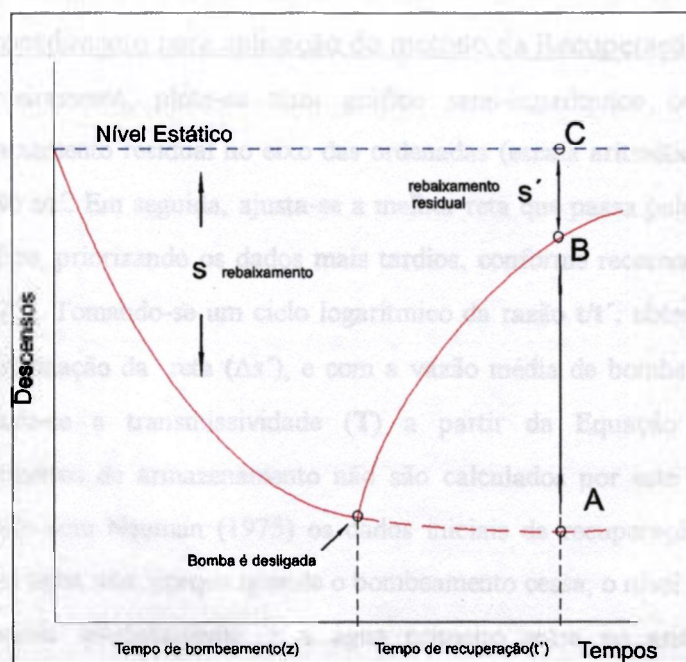


Figura 3.1: Ilustração das curvas de rebaixamento e recuperação versus o tempo.

Com base na Figura 3.1, onde o rebaixamento residual $s' = AC - AB$, o tempo desde o início do bombeamento é $t = z + t'$, e designando-se a carga inicial como h_0 , e como h' a carga observada em qualquer momento durante o período de recuperação, chega-se, a partir da Equação (3.13), à expressão utilizada no método da recuperação de Theis:

$$h_0 - h' = s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \left(\log \frac{2,25Tt}{r^2S} - \log \frac{2,25Tt'}{r^2S} \right) \quad (3.14)$$

ou

$$s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log \frac{t}{t'} \quad \text{ou} \quad \Delta s' = \frac{2,3Q}{4\pi T}, \text{ para } t/t' = 10 \quad (3.15)$$

onde t = tempo desde o início do bombeamento

t' = tempo a partir do início da recuperação ou tempo de recuperação

s' = rebaixamento residual

$\Delta s'$ = variação do rebaixamento residual por ciclo logarítmico

No parágrafo seguinte, descreve-se o procedimento que deve ser empregado para a aplicação deste método.

Procedimento para aplicação do método da Recuperação de Theis

Primeiramente, plota-se num gráfico semi-logarítmico os dados do rebaixamento residual no eixo das ordenadas (escala aritmética), versus a razão t/t' . Em seguida, ajusta-se a melhor reta que passa pelos pontos do gráfico, priorizando os dados mais tardios, conforme recomenda Neuman (1975). Tomando-se um ciclo logarítmico da razão t/t' , obtém-se o valor da inclinação da reta ($\Delta s'$), e com a vazão média de bombeamento (Q), calcula-se a transmissividade (T) a partir da Equação (3.15). Os parâmetros de armazenamento não são calculados por este método. De acordo com Neuman (1975) os dados iniciais da recuperação não caem numa linha reta, porque quando o bombeamento cessa, o nível da água não responde imediatamente, e a água primeiro entra no armazenamento devido a expansão do aquífero e a própria compressão da água. Somente quando mais tarde o efeito do armazenamento elástico cessa, é que ocorrerá um alinhamento dos dados de recuperação.

O Método da Curva Típica de Neuman foi desenvolvido em 1975, para ser aplicado em ensaios de bombeamento em aquíferos livres. Freeze & Cherry (1979) relatam que quando se analisa os dados provenientes de testes de bombeamento realizados em aquíferos livres, observa-se que o rebaixamento do nível da água, em piezômetros adjacentes aos poços bombeados, tende a declinar em taxas variáveis e menores do que aquelas previstas pela solução original de Theis, desenvolvida para a análise de rebaixamentos em aquíferos confinados.

Domenico & Schwarts (1990) descreveram como os dados de rebaixamento versus tempo se comportam nas vizinhanças de um poço bombeado em um aquífero do tipo livre. Observaram que a curva resultante pode ser dividida em três segmentos distintos, conforme pode ser visto na Figura 3.2. O primeiro, com forte inclinação, corresponde ao estágio inicial de bombeamento, durante o qual o aquífero livre reage ao bombeamento da mesma forma que o aquífero confinado, sendo a água liberada do armazenamento devido à sua expansão e à compressão do meio. O valor do coeficiente de armazenamento S , nesta fase, é o mesmo esperado para uma condição de confinamento. No segundo, há nitidamente uma queda na taxa de rebaixamento, havendo uma horizontalização da curva, passando a serem notados os efeitos da drenagem gravitacional, já havendo fluxo vertical nas proximidades do poço. Nos tempos mais tardios do bombeamento, correspondendo ao terceiro segmento, o rebaixamento volta a se comportar de forma concordante com a curva de Theis, com o coeficiente de armazenamento S agora refletindo a produção específica S_y , que é muito maior que S .

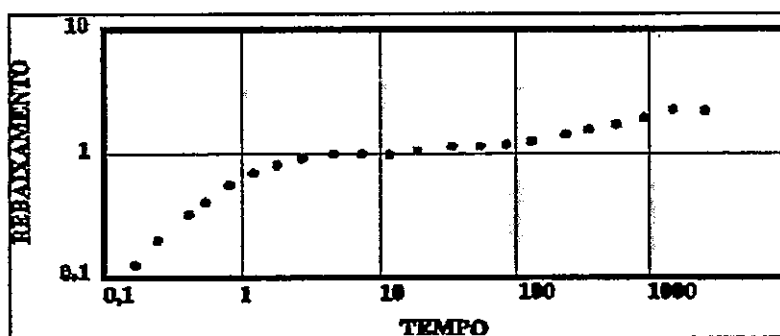


Figura 3.2: Variação do rebaixamento durante o bombeamento de um poço em um aquífero livre. A unidade do rebaixamento é pés e do tempo é minutos. Baseado em Domenico & Schwarts (1990).

O método idealizado por Neuman (1975) é capaz de determinar as características hidráulicas dos aquíferos livres e anisotrópicos, levando em conta o comportamento particular

destes aquíferos durante os testes de bombeamento. A solução de Neuman pode ser apresentada, de uma forma simplificada (Freeze & Cherry, 1979), como:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \eta) \quad (3.16)$$

onde $W(u_A, u_B, \eta)$ é conhecida como função do poço para um aquífero livre e

$$\eta = r^2 Kh / b^2 K_v \quad (3.17),$$

onde b é a espessura saturada do aquífero, r é a distância entre o poço de observação e o bombeado, Kh é a condutividade hidráulica horizontal e K_v a vertical.

A Figura 3.3 é uma representação gráfica desta função para vários valores de η . As curvas do tipo A, localizadas próximas à curva de Theis à esquerda da Figura 3.3, caracterizam os instantes iniciais do bombeamento, e são expressas por:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, \eta) \quad (3.18)$$

$$\text{onde } u_A = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (3.19)$$

O coeficiente de armazenamento S é responsável pela liberação instantânea da água do aquífero para o poço.

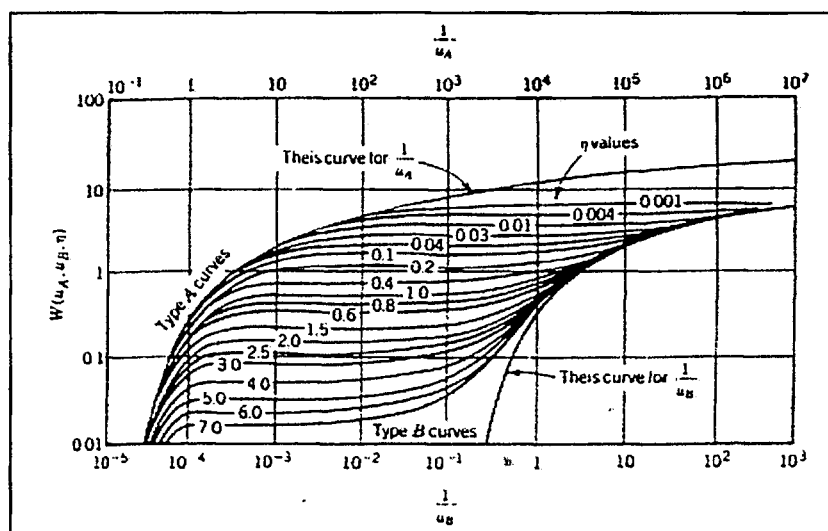


Figura 3.3: Curvas teóricas de $W(u_A, u_B, \eta)$ versus $1/u_A$ e $1/u_B$ para um aquífero livre (Neuman, 1975).

As curvas do tipo B, localizadas na parte à direita da Figura 3.3, correspondem aos momentos finais do bombeamento e são expressas por:

$$s = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} W(u_B, \eta) \quad (3.20)$$

$$\text{onde} \quad u_B = \frac{r^2 S y}{4 T t} \quad (3.21)$$

A produção específica Sy é responsável pela liberação tardia da água do aquífero para o poço. A transmissividade T é definida como o produto da condutividade hidráulica Kh pela espessura b . As Equações, desde a (3.17) até a (3.21), só são válidas se $Sy \gg S$ e $h_0 - h \ll b$. Conhecendo-se os valores de Q , S , Sy , Kh , Kv , e b , e aplicando-se estas Equações (3.17 - 3.21), pode-se fazer uma previsão do valor de rebaixamento à uma distância r do poço bombeado para qualquer tempo. No parágrafo seguinte, descreve-se o procedimento adotado para a aplicação do Método de Neuman.

Procedimento para aplicação do método de Neuman

Com base nos artigos de Neuman (1975) e de Domenico e Schwartz (1990), deve-se executar os seguintes passos para a aplicação do método em questão:

- (1) Faz-se a superposição dos dados iniciais do rebaixamento versus tempo obtidos no campo com as curvas do tipo A do gráfico padrão da Figura 3.2. Seleciona-se um ponto de coincidência, e obtêm-se os valores de suas coordenadas $w(u_A, \eta)$, $1/u_A$ e de η . Os valores do rebaixamento $s (h_0 - h)$ e do tempo t são obtidos no gráfico com os dados de campo. Conhecendo-se o valor da vazão média Q e o valor da distância r , calcula-se, então, os valores de T e S respectivamente pelas Equações (3.18) e (3.19).
- (2) Faz-se a superposição dos dados finais do rebaixamento versus tempo, obtidos no campo, com as curvas do tipo B, se possível usando o valor de η obtido anteriormente. Seleciona-se um ponto de coincidência, e obtêm-se

os valores de suas coordenadas, $w(u_B, \eta)$, $1/u_B$, s , t , e de η . Calcula-se então o valor de T , pela Equação (3.20), e de S_y pela Equação (3.21).

(3) Com o valor de T e da espessura saturada b , calcula-se o valor da condutividade hidráulica horizontal K_h pela Equação: $K_h = T/b$.

(4) O valor da condutividade hidráulica vertical K_v é obtido pela Equação (3.17). O grau de anisotropia é dado pela razão K_v/K_h .

(5) Pela razão S/b obtém-se o valor do armazenamento específico S_s .

No presente trabalho, aplicou-se o Método da Recuperação de Theis e o Método de Neuman nos dados provenientes dos testes de bombeamento, através do programa de computador *Infinite extent* (Starpoint software, 1995).

3.3 - FASE III - Modelagem Numérica do Sistema Aquífero

3.1 - Introdução

“ Um modelo é qualquer dispositivo ou aparelho que representa de forma aproximada uma situação de campo(...). Um modelo matemático simula indiretamente o fluxo da água subterrânea através de uma equação principal, que representa o processo físico que ocorre dentro do sistema, junto com equações que descrevem as cargas ou fluxos ao longo das fronteiras do sistema (condições de contorno). Modelos matemáticos consistem de uma equação governante, condições de contorno e condições iniciais”.

“ A melhor ferramenta disponível para auxiliar os hidrogeólogos no desafio da predição é usualmente o modelo matemático de simulação da água subterrânea(...). O atrativo que se tem em modelar a água subterrânea é que isto proporciona a combinação do julgamento subjetivo do homem com o poder de um computador digital”.

Os dois parágrafos anteriores contêm transcrições do livro de Anderson & Woessner (1992) e demonstram a importância que estes autores dão à modelagem, e o modo como definem o termo modelo, e em particular o modelo matemático de simulação do fluxo da água subterrânea. Ressalta-se, entretanto, que a importância de se utilizar modelos matemáticos nos estudos científicos, de um modo geral, e na hidrogeologia em particular, não tem unanimidade entre os pesquisadores. Alguns autores alegam que a construção de um modelo requer a obtenção de muitos dados, o que torna o processo de modelagem muito caro, e que um modelo pode nunca vir a ser considerado correto.

No trabalho de Konikow e Bredehoeft (1992), estes autores defendem a tese de que os modelos científicos, e em particular aqueles desenvolvidos para a hidrogeologia, são a “encarnação” de uma hipótese científica, não podendo ser provados ou validados mas apenas testados. Por outro lado, Konikow e Bredehoeft (1992) reconhecem a importância do modelo como uma ferramenta valiosa na análise de sistemas hidrogeológicos, mas colocam restrições à sua utilização em estudos de previsão.

O conceito básico adotado na presente dissertação é que, da mesma forma que as teorias ou hipóteses científicas, os modelos retratam, ou deveriam retratar, uma realidade física idealizada a partir dos dados ou informações disponíveis no momento. De forma alguma entende-se que o modelos hidrogeológicos, conceitual e numérico, a serem elaborados nesta dissertação tenham o caráter definitivo e onipotente. Espera-se, sim, que sejam uma reprodução da realidade física hidrogeológica do sistema aquífero local, idealizada com base nos dados de campo atualmente disponíveis e em informações arbitradas segundo critérios científicos, e com as suas limitações reconhecidas e descritas. ©

Com base no trabalho de Anderson e Woessner (1992), apresenta-se na Figura 3.4 e na descrição à seguir, a seqüência metodológica, ou os passos necessários para o desenvolvimento de um modelo numérico de simulação do fluxo da água subterrânea.

Passo 1 - Estabelecimento do Objetivo do Modelo;

Passo 2 - Desenvolvimento do Modelo Conceitual do Sistema Aquífero. Consiste, basicamente, na elaboração de um modelo representativo das características hidrogeológicas, hidrológicas, geológicas, etc., da área

de estudo. É fundamental para a construção do modelo numérico;

Passo 3 - Seleção do Código de Computador a ser Utilizado.

Este código contém os algoritmos necessários para resolver as equações governantes do modelo matemático. Tanto as equações quanto o código devem ser verificados, isto é, testados quanto às suas exatidões;

Passo 4 - Projeto do Modelo. Tem por finalidade colocar o modelo

conceitual num formato adequado para a modelagem. Inclui o traçado da malha, a transferência dos dados do modelo conceitual para a malha, definição dos passos de tempo, estabelecimento das condições de contorno e iniciais, e seleção preliminar (pré-calibração) dos valores dos parâmetros do aquífero e das variações (*stresses*) hidrológicas;

Passo 5: Calibração. O propósito da calibração é certificar-se que

o modelo é capaz de reproduzir as medidas de carga e de fluxo feitas no campo. Durante a calibração são feitos ajustes nos valores dos parâmetros do modelo, de modo a se definir o conjunto de valores que resultam na melhor reprodução dos dados de campo;

Passo 6 - Análise de Sensibilidade. Verifica-se a sensibilidade do

modelo frente às variações dos valores dos parâmetros, tanto espacialmente quanto temporalmente. Esta análise é feita de modo a se estabelecer os efeitos das incertezas sobre o modelo calibrado;

Passo 7 - Verificação do Modelo. Este passo tem por finalidade

aumentar a confiança no modelo. Verifica-se se o conjunto de valores resultantes da calibração permite que o modelo reproduza uma nova entrada de dados de campo. É uma segunda calibração;

Passo 8 - Predição. Tem por finalidade quantificar as respostas do

sistema frente a eventos ou cenários futuros;

- Passo 9 - Análise da Sensibilidade da Predição.** Assemelha-se ao passo 6, porém quantifica os efeitos dos parâmetros usados na predição;
- Passo 10 - Apresentação do Projeto do Modelo e Resultados.** Tem por função expor, de forma clara e objetiva, o modelo numérico propriamente dito e os resultados alcançados com a sua aplicação;
- Passo 11 - Reanálise Futura ou Validação.** É realizada alguns anos após a conclusão da modelagem. Novos dados de campo são coletados de forma a avaliar se as predições foram feitas corretamente. Em caso afirmativo, o modelo é considerado validado. A validação deve ocorrer muito tempo após a predição, de maneira que se garanta haver tempo suficiente para que alterações significativas ocorram;
- Passo 12 - Novo Projeto do Modelo.** Como consequência do passo 11, pode-se concluir pela necessidade de alterações no modelo conceitual ou nos valores de alguns parâmetros utilizados.

De acordo com Anderson & Woessner (1992), estudos tipicamente genéricos e interpretativos não prosseguem além do passo 6, embora o passo 10 seja sempre indispensável. © Tendo por base a metodologia apresentada por Anderson & Woessner (1992), realizou-se nesta fase do desenvolvimento do trabalho as seguintes etapas: (3.3.2) definição do objetivo do modelo numérico; (3.3.3) modelo conceitual; (3.3.4) escolha do código de computador; (3.3.5) projeto do modelo numérico; (3.3.6) execução, calibração e resultados obtidos e; (3.3.7) considerações finais. Comparando estas etapas com o protocolo de Anderson & Woessner (1992) observa-se que estas abrangem até o passo 5, calibração do modelo.

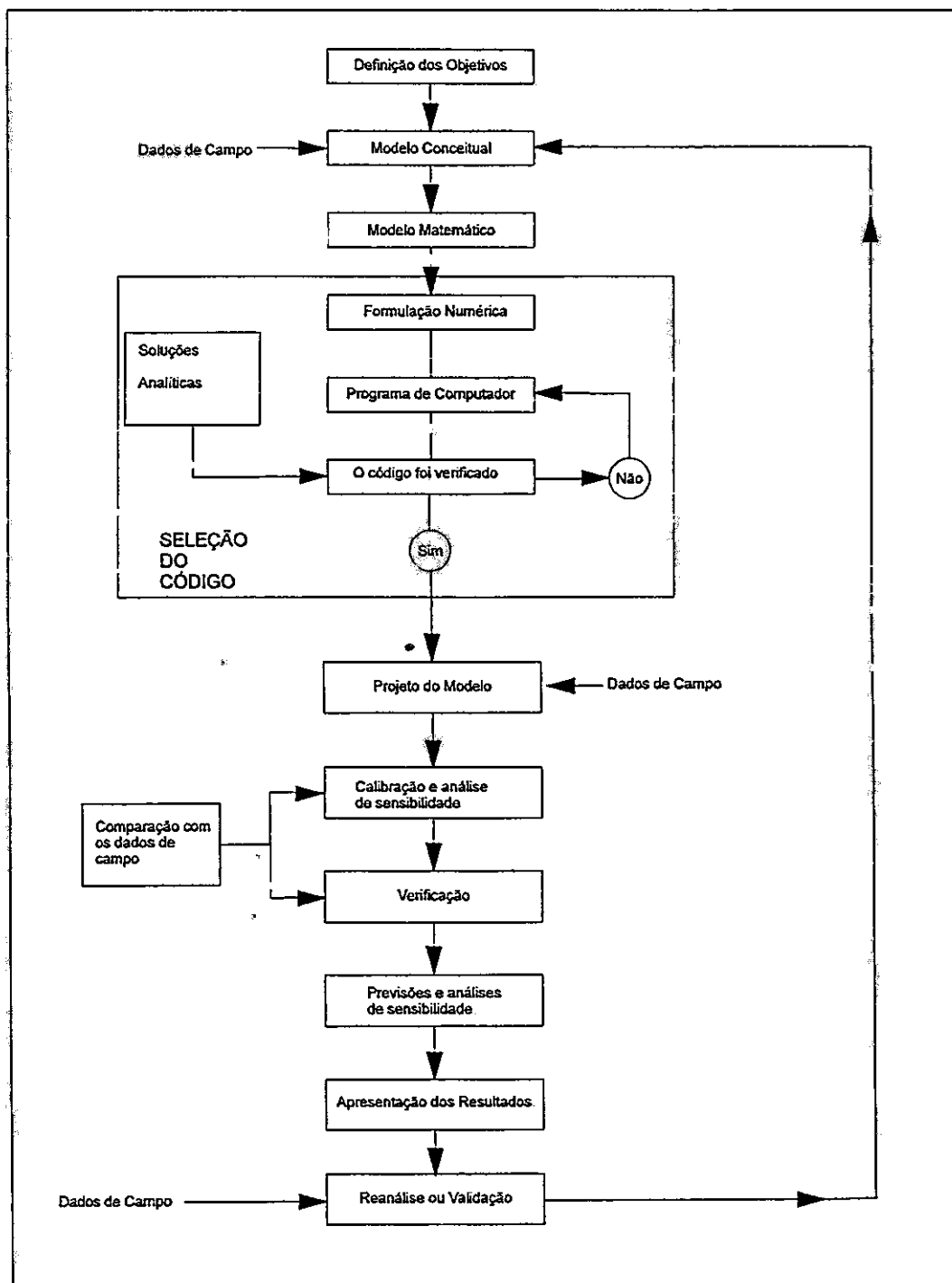


Figura 3.4: Fluxograma para elaboração e aplicação de um modelo numérico. Fonte: Anderson & Woessner (1992).

3.3.2 - Definição do Objetivo do Modelo Numérico

Somente quando já se tem bem definidos os propósitos da modelagem é que se poderá definir a equação governante e o código a ser utilizado (Anderson & Woessner, 1992). Estes autores identificaram os três principais tipos de aplicações da modelagem da água subterrânea:

1. **Predição:** usada para prever conseqüências de uma ação (obra civil, bombeamento de poços, etc.) sobre as águas subterrâneas;
2. **Interpretativa:** empregada tanto na avaliação de um sistema como para servir de estrutura na reunião e organização dos dados de campo, e também permitir um maior conhecimento de como os parâmetros controlam este sistema. Modelos podem ser usados, por exemplo, para ajudar na localização e caracterização dos contornos do aquífero e na estimativa dos valores de recarga e conteúdo de água do manancial subterrâneo;
3. **Genérico:** usado sobre um arcabouço hidrogeológico hipotético, contribuindo para a caracterização do fluxo da água subterrâneo em diferentes ambientes hidrogeológicos.

Na presente dissertação, a aplicação da modelagem numérica teve um caráter interpretativo, tendo por principal objetivo auxiliar na caracterização dos parâmetros hidrogeológicos e da dinâmica do escoamento da água subterrânea no sistema aquífero da área de estudo. A utilização de um modelo para a realização de previsões requer que o mesmo seja detentor de um conjunto satisfatório de dados, principalmente referentes às condições de contorno, que permita a sua plena calibração em situações estacionárias e principalmente em situações transientes.

3.3.3 - Modelo Conceitual

O modelo conceitual é uma representação, por ilustração, da geologia, dos parâmetros hidrogeológicos, da hidrologia, e do sistema de fluxo da água subterrânea. Esta representação é freqüentemente feita sob a forma de um bloco diagrama ou de uma seção vertical, onde devem estar sintetizadas as principais características do sistema aquífero, obtidas durante a execução das fases anteriores. A natureza do modelo conceitual determinará as dimensões do modelo numérico e o desenho da malha.

Uma definição mais sintética dada ao modelo conceitual é aquela apresentada por Konikow e Bredehoeft (1992), os quais definem o modelo conceitual como sendo uma hipótese elaborada para representar como um sistema ou processo opera.

Através do modelo conceitual, pode-se visualizar as informações obtidas no campo de uma maneira mais simplificada e rápida do que as descrições de costume. É claro que, quanto mais detalhada for a representação dos dados no modelo conceitual, mais acurado será o modelo numérico, embora seja do conhecimento dos técnicos envolvidos com a modelagem que uma representação detalhada e completa da realidade existente no campo, seja algo muito difícil de se conseguir.

Desde a fase I desta dissertação, já se vinha trabalhando no sentido de se estabelecer um modelo conceitual para a área de estudo, tendo-se a preocupação de construir uma base de dados representativa. Portanto, o que se realizou nesta etapa foi a consolidação e síntese das informações obtidas anteriormente.

3.3.4 - Escolha do Código de Computador

A escolha do código de computador irá depender da equação governante do modelo. No presente trabalho não se teve a intenção de desenvolver uma nova equação, mas sim utilizar uma já consagrada, isto é, que já tenha sido amplamente verificada. A verificação de uma equação governante visa demonstrar sua exatidão ao descrever processos físicos que ocorrem nos meios porosos. O movimento da água subterrânea no meio poroso saturado pode ser descrito, num sistema tridimensional, pela equação diferencial parcial abaixo (Anderson & Woessner, 1992; McDonald & Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.22) \quad \text{©}$$

onde, K_x , K_y e K_z são valores da condutividade hidráulica nos eixos das coordenadas x , y e z , h é a carga hidráulica, W é o fluxo volumétrico por unidade de volume do aquífero, por unidade de tempo, e pode representar uma fonte ou sumidouro de água, S_s é o armazenamento específico do material poroso, e t é o tempo.

No momento da escolha do código de computador, três questões devem ser respondidas (Anderson & Woessner, 1992): (1) o código já foi testado (verificado) quanto a sua exatidão ?; (2) o código possui rotina para calcular o balanço hídrico ? e; (3) o código já foi empregado

em outros estudos de campo ?. Na presente dissertação, escolheu-se o código *MODFLOW* (*A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*).

Em síntese, o código *MODFLOW* é a ferramenta, ou um modelo genérico, possuidor do algoritmo capaz de resolver a Equação diferencial (3.22) e incorporar, em um formato discretizado temporalmente e espacialmente, as propriedades físicas, as condições de contorno e as variações do sistema. Quando, sobre o modelo genérico, no caso a ferramenta *MODFLOW*, são especificados os parâmetros hidrogeológicos, a condições de contorno, as dimensões da malha, etc, de modo a representar uma determinada área geográfica, o código resultante é denominado de modelo de local específico, ou simplesmente modelo de local.

3.3.5 - Projeto do Modelo Numérico

O objetivo desta etapa é transferir o modelo conceitual para o formato apropriado da modelagem matemática, ou seja, promover a entrada de dados no modelo genérico. Nesta etapa, são definidos os passos de tempo, as condições de contorno e iniciais, o desenho da malha, seleciona-se os valores dos parâmetros hidrogeológicos e transfere-se todos os dados do modelo conceitual para a malha. Enfim, estrutura-se as informações visando a elaboração do modelo numérico do local ora em estudo.

As condições iniciais são necessárias nas simulações transientes. Elas representam a distribuição de carga no início da simulação. As condições de contorno são enunciados matemáticos que especificam a variável dependente (carga) ou a derivada da variável dependente (fluxo) nos limites ou fronteiras do domínio do problema (Anderson & Woessner, © 1992). Na realidade, esta definição não é muito exata, pois as condições de contorno são também usadas para simular fontes ou sumidouros de água que ocorrem no interior do domínio do problema. Como exemplo de contornos, usualmente implementados nos códigos de computador, pode-se citar: rios, drenos, células com carga constante, recarga, evapotranspiração e paredes impermeáveis. Contornos hidrogeológicos são representados por três tipos de condições matemáticas (Anderson & Woessner, 1992):

1. **Tipo 1:** contornos com carga especificada (condição de Dirichlet);

2. **Tipo 2:** contornos com fluxo especificado (condição de Neuman). Neste tipo a derivada da carga (fluxo) é especificada e a condição de não fluxo é dada pelo fluxo igual a zero;
3. **Tipo 3:** contorno com fluxo dependente da carga (condição de Cauchy). O fluxo através do contorno é calculado a partir do valor da carga no contorno. Este tipo também é denominado de condição do tipo mista, pois relaciona os tipos 1 e 2.

Num modelo numérico, o domínio do sistema físico é substituído por um domínio discretizado, composto por uma matriz formada de nodos associados a células. A dimensão desta matriz ou malha, que compõe a estrutura do modelo numérico, é função do modelo conceitual e do tipo de modelo, em termos espaciais, a ser utilizado: bidimensionais areais; bidimensionais em perfis; quasi tridimensionais e; totalmente tridimensionais. Num modelo tridimensional propriamente dito, cabe nesta etapa estabelecer para a malha o número de linhas e colunas, o número de camadas, a sua orientação espacial e o espaçamento entre os nodos.

A transferência dos dados do modelo conceitual para a malha nem sempre é uma tarefa simples, e sempre requer um dispêndio muito grande de tempo. Neste caso, o uso de pré-processadores para gerenciar a entrada dos dados nos arquivos proporciona um ganho significativo de tempo, além de minimizar os erros de digitação.

Cada nodo da malha deverá ter um valor para os parâmetros em questão. Como os dados de campo são geralmente esparsos, faz-se necessário o emprego de métodos estatísticos de interpolação para auxiliar na representação espacial e contínua destes dados. ©

3.3.6 - Execução, Calibração e Resultados Obtidos

Para a execução do modelo deve-se fornecer ao código, ou modelo genérico, um conjunto de dados que irão orientar o processo de execução, tais como: o(s) tipo(s) de aquífero(s); o modo de execução (regime estacionário ou transiente); o tipo de resolvidor que se deseja utilizar. Maiores detalhes sobre as opções de execução do modelo são apresentadas no Apêndice D. Dois dos parâmetros mais importantes que devem ser fornecidos ao código no momento em que se vai executar o modelo, são os valores de variação de carga hidráulica e o do erro residual que se deseja adotar como critério para a convergência dos processos de iteração.

Uma solução iterativa que não satisfizer os critérios de variação de carga e erro residual adotados irá produzir um resultado que não converge, portanto insatisfatório. Como regra geral, o critério de erro escolhido deve ser 1 a 2 ordens de magnitude menor que o grau de exatidão desejado nos resultados de carga (Anderson & Woessner, 1992). O ideal seria a adoção de um critério de erro bem reduzido, de modo a se ter resultados muito exatos. Porém, neste caso, corre-se o risco da simulação exceder a precisão numérica, gerando uma solução que irá se aproximar do critério de erro, mas jamais irá convergir. Dessa maneira, a escolha do critério de erro deve ser feita de forma cautelosa.

O objetivo da calibração é o de demonstrar que o modelo é capaz de reproduzir os valores de carga e fluxo obtidos no campo. Durante o processo de calibração, busca-se o conjunto de parâmetros e condições de contorno que produzam valores de carga ou de fluxo coincidentes, dentro de uma faixa de erro pré-estabelecido, com os dados de campo. Basicamente, o processo de calibração consiste na variação ou em ajustes nos valores de certos parâmetros, dentro de uma faixa aceitável de variação, até que se consiga minimizar as diferenças entre os valores calculados e os observados no campo. Estes ajustes podem ser realizadas segundo duas técnicas: (1) ajuste por tentativa e erro; e (2) estimativa automática dos parâmetros de informação prévia.

Os resultados da calibração devem ser avaliados tanto quantitativamente como qualitativamente. Qualitativamente, esta análise pode ser feita comparando-se os mapas de contorno gerados pelas cargas simuladas com os das cargas medidas. Quantitativamente, utiliza-se usualmente três maneiras para expressar a diferença média entre os valores das cargas medidas e simuladas (Anderson & Woessner, 1992):

1. **Erro médio (*mean error*) - ME:** é a diferença média entre os valores das cargas medida (*hm*) e simuladas (*hs*).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hm - hs)_i \quad (3.23)$$

onde *n* é o numero de valores de calibração;

2. **Erro médio absoluto (*mean absolute error*) - MAE:** é a média entre os valores absolutos da diferença entre as cargas medidas e simuladas.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i| \quad (3.24);$$

3. Desvio Padrão (*root mean squared error or standart deviation*)

- RMS: é a raiz quadrada da média da diferença, ao quadrado, dos valores da carga medida e simulada.

$$\text{RMS} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right)^{0,5} \quad (3.25)$$

Geralmente, para a calibração de um modelo em um regime estacionário, utiliza-se como valores de calibração os dados históricos da oscilação do nível freático ou potenciométrico. Já para um regime transiente, normalmente emprega-se as variações do nível da água subterrânea, observadas nos poços durante os ensaios de bombeamento e recuperação, como fatores de calibração.

Na apresentação dos resultados obtidos com a execução e calibração do modelo, deve-se evitar longas descrições textuais, priorizando-se o emprego de tabelas, gráficos e mapas.

3.3.7 - Considerações sobre a Modelagem.

O objetivo desta etapa é avaliar a modelagem propriamente dita, apresentando uma análise dos resultados obtidos, descrever as incertezas quanto aos parâmetros hidrogeológicos e condições de contorno, que de alguma forma podem estar contribuindo para resultados ainda não tão precisos como o desejado. Por exemplo, a carência de ensaios de bombeamento, a falta de maiores informações sobre as condições de contorno, etc. Nesta etapa, procurou-se também apresentar, ainda que de forma qualitativa, uma análise de sensibilidade do modelo frente aos parâmetros envolvidos com a sua construção.

3.4 - FASE IV - Conclusões, Recomendações e Redação Final

O processo de elaboração das conclusões e recomendações, pode ser entendido como um momento de reflexão, no qual procura-se realizar uma análise crítica do trabalho, tendo por

finalidade verificar se os objetivos foram alcançados, divulgar e comentar os resultados obtidos de maior relevância, apontar as incertezas que ainda permaneceram, tecer comentários gerais sobre o modelo e, finalmente, apresentar sugestões para realização de novos trabalhos no sentido de aumentar o conhecimento sobre a área de estudo, minimizando o número de dados arbitrados e/ou incertos.

A edição e redação final da dissertação têm uma importância bem característica. É exatamente durante esta etapa que o autor da toma ciência das dimensões reais do esforço empreendido e dos conhecimentos adquiridos com o desenvolvimento do trabalho. A finalidade desta etapa é a de transpor para o papel, dentro de um formato sistêmico e numa seqüência lógica, todas as etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho, desde a introdução ao tema e definições do objetivos, até a descrição dos resultados obtidos e conclusões finais. O resultado é um documento científico, de domínio público.

CAPÍTULO 4

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA / USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A área de desenvolvimento do trabalho situa-se na região metropolitana de Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, estando na sua maior parte dentro dos limites da Cidade Universitária da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Mais especificamente, conforme pode ser visto na Figura 4.1, a área de estudo está localizada na região da Pampulha, nas proximidades da lagoa de mesmo nome, distante cerca de 6 km do centro de Belo Horizonte.

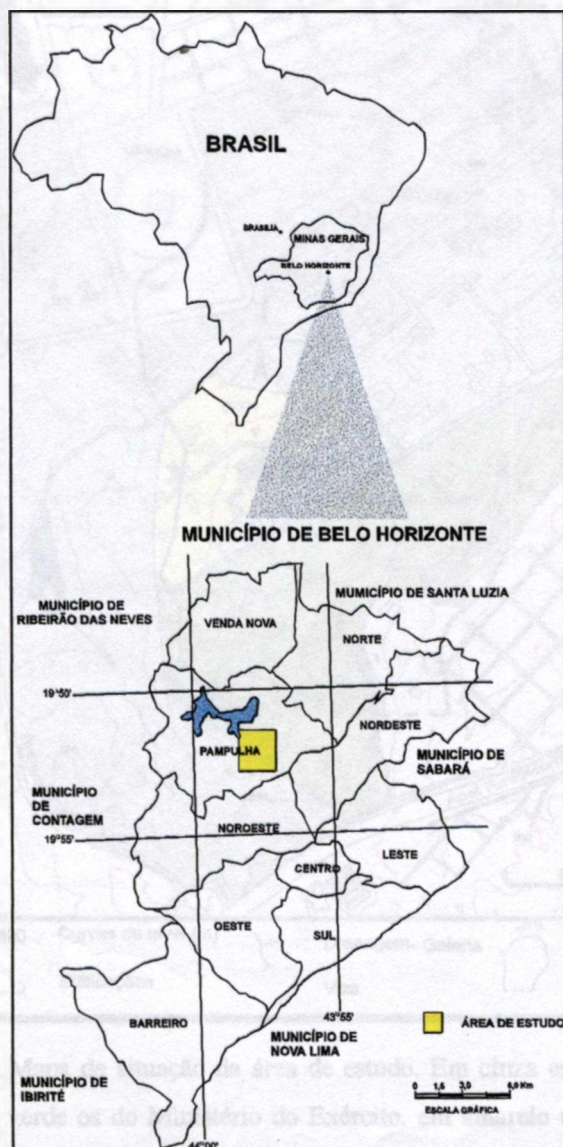


Figura 4.1: Localização da área de estudo.

A área pertence à bacia hidrográfica do córrego do Engenho Nogueira, o qual a atravessa no sentido sul-nordeste, percorrendo cerca de 2.400 metros, sendo os últimos 1.500 metros de forma canalizada. Este córrego é tributário do ribeirão Pampulha. Como ilustrado na Figura 4.2, o contorno da área perfaz um polígono irregular, com cerca de 2,5 km², inserido num retângulo delimitado pelas coordenadas UTM 607.200 e 609.600 oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 sul, correspondendo aproximadamente aos paralelos 19°51'25" e 19°53'10" sul e meridianos 43°57'11" e 43°58'34" oeste. O traçado irregular da área corresponde ao divisor hidrográfico da bacia.

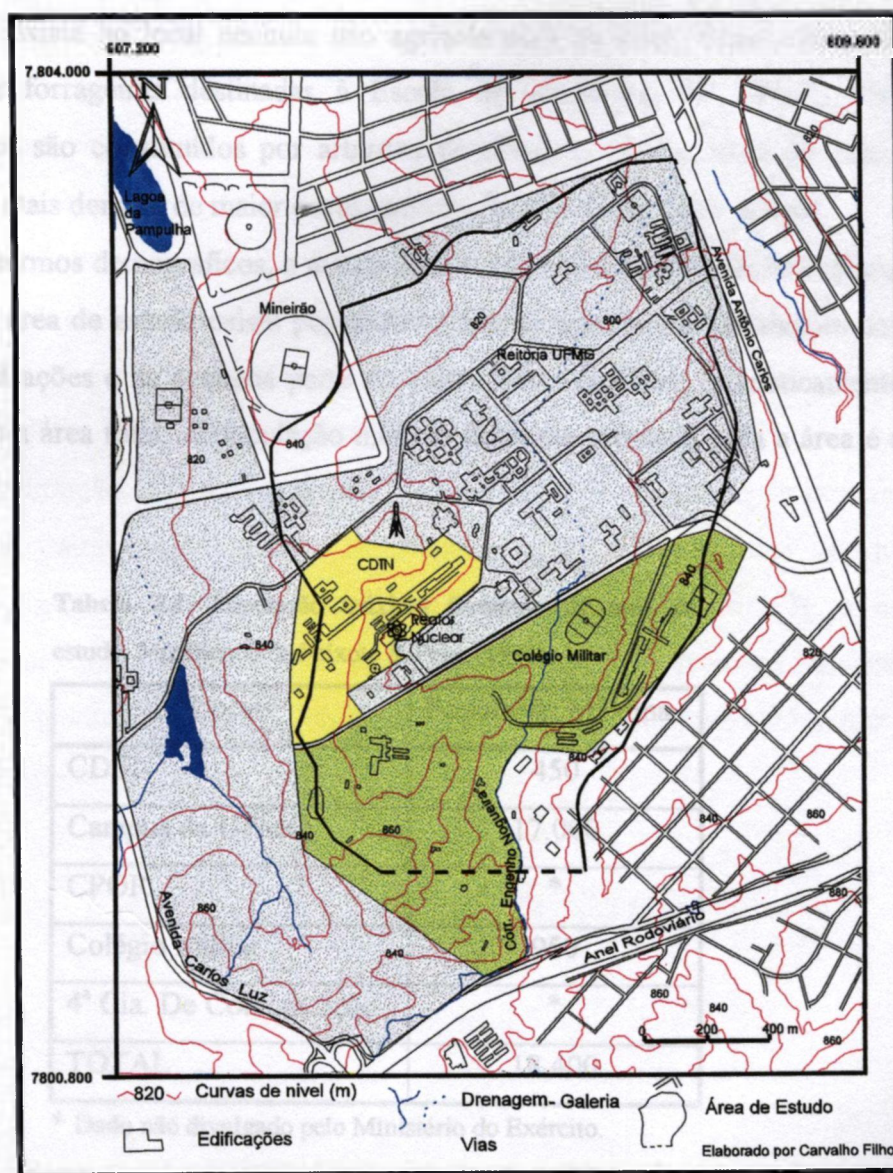


Figura 4.2: Mapa de situação da área de estudo. Em cinza estão os terrenos da UFMG, em verde os do Ministério do Exército, em amarelo os do CDTN e em branco outras ocupações urbanas.

A maior parte da área, representada pelas regiões central e norte, está localizada em terrenos do Campus da UFMG e é ocupada por diversas unidades administrativas, de serviço e de ensino da Universidade. As porções sul, sudeste e sudoeste abrangem propriedades do Ministério do Exército, pouco urbanizadas, ocupadas por esparsas edificações do Colégio Militar, da 4ª Companhia de Comunicações e da Companhia de Preparação de Oficiais do Exército (CPOR). Algumas poucas vias e residências do bairro São Francisco estão localizadas dentro dos limites da área, especificamente à sudeste desta. A porção oeste é ocupada pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), enquanto que o Estádio Magalhães Pinto (Mineirão) situa-se exatamente no limite noroeste da área.

Não existe no local nenhum uso agrícola para os solos, exceto as pequenas áreas de cultivo de forrageiras destinadas à Escola de veterinária da UFMG. Os terrenos não urbanizados são constituídos por arbustos de pequeno porte, existindo alguns pontos com vegetação mais densa e de maior porte, principalmente no topo das colinas.

Em termos demográficos, a área é constituída por uma população nitidamente flutuante. Dentro da área de estudo existe população residente apenas nas instalações da 4ª Companhia de Comunicações e na pequena parte do bairro São Francisco, estatisticamente insignificante em relação a área total. A população máxima flutuante estimada para a área é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: População máxima flutuante da área de estudo. Modificado de Peixoto & Pego (1996).

Locais	População Máxima
CDTN	450
Campus da UFMG	17.000
CPOR	*
Colégio Militar	950
4ª Cia. De Comunicação	*
TOTAL	18.400

* Dado não divulgado pelo Ministério do Exército.

Se fosse incluída na Tabela 4.1 a população máxima flutuante do Mineirão, 130.000, já que este está localizado muito próximo à área, o valor total obtido nesta Tabela passaria a ser

de 148.400. Ao todo, a região da Pampulha possuía uma população residente urbana de 52.739 habitantes em 1991 (Peixoto & Pego, 1996).

A região adjacente à área de estudo é cortada por importantes vias de tráfego urbano. Partindo-se do centro de Belo Horizonte chega-se a área pela Avenida Antônio Carlos (acesso Leste) ou pela Avenida Carlos Luz (acesso Oeste).

A escolha deste local para o desenvolvimento da presente dissertação deve-se a três aspectos:

- (1) crescente demanda de água na área, em função, principalmente, da construção de novas unidades de ensino no Campus da UFMG. Tanto o CDTN como a Universidade têm o interesse de aumentar a participação das águas subterrâneas nos seus sistemas de abastecimento;
- (2) à montante da área estão situadas várias indústrias potencialmente poluidoras dos mananciais subterrâneos, a partir do lançamento de seus efluentes no meio ambiente. O presente trabalho será útil para os estudos da qualidade da água subterrânea local, a serem executados num futuro próximo;
- (3) a área é pouco urbanizada e geologicamente promissora para ser representada por modelos. Além disso, dispõe de infra-estrutura capaz de viabilizar a realização desta dissertação, especialmente pelo fato de abranger um centro de pesquisas nucleares e um Campus universitário, contribuindo para fortalecer uma das justificativas de realização deste trabalho, conforme já exposto no Capítulo 2: “(...)a consolidação de grupos interdisciplinares de pesquisa e formação de recursos humanos tais como a pós-graduação; o desenvolvimento de estudos geológicos/hidrogeológicos básicos e de ponta(...)”

CAPÍTULO 5

TRABALHOS PREPARATÓRIOS

5.1 - Definição da Base Cartográfica

O mapa base utilizado nesta dissertação foi montado a partir da junção de 8 folhas planialtimétricas, na escala 1/2.000, elaboradas pela PRODABEL - Processamento de Dados de Belo Horizonte e codificadas como 5054, 5055, 5056, 5057, 5154, 5155, 5156 e 5157. Antes de serem agrupadas, as folhas foram reduzidas para a escala 1/5000. O mapa resultante deste processamento foi digitalizado e transformado em um mapa base onde as informações utilizadas e/ou geradas pelo trabalho, tais como os pontos de água, os dados geológicos, a malha do modelo numérico, a distribuição de carga hidráulica gerada pelo modelo, passíveis de serem identificadas espacialmente, foram nele localizadas. A Figura 4.2 é um exemplo da base cartográfica construída e empregada por este trabalho.

5.2 - Inventário de Pontos de Água

Como já foi exposto no Capítulo 2, Item 3.1.3, a finalidade do inventário de pontos de água é a de formar uma base de dados composta por informações referentes a todos os pontos ou locais no terreno onde se pode acessar (ou que já se pôde acessar outrora), direta ou indiretamente, a água subterrânea. Através destes pontos de água podem ser obtidos valiosas informações sobre o sistema aquífero da área de estudo.

Para a realização do inventário de pontos de água foram consultados vários documentos arquivados na UFMG e no CDTN, dentre os quais destacam-se: Hidropoços (1996); Nuclebrás (1979); Engesonda (1979); Arcos (1991); e E.G.F(1992). Também foram utilizadas as informações obtidas durante a perfuração dos novos poços tubulares instalados na área em 1995 (Equipoços, 1995a, 1995b, 1995c, 1995d, 1995 e 1995f). Foram cadastrados 26 pontos de água, dentre os quais 12 pontos correspondem a poços tubulares profundos e 14 pontos são furos de sondagens rasos. A Tabela 5.1 contém exemplos dos dados registrados para cada um

destes pontos, enquanto que a Figura 5.1 mostra o mapa de localização dos mesmos. Maiores informações sobre os pontos de água serão apresentados nos capítulos seguintes.

Tabela 5.1: Dados gerais dos pontos de água.

Pontos de água	Tipo	Data término perfuração	Localização UTM		Cota no terreno (m)	Profundidade final (m)	Perfil geológico	Resultados de testes de bombeamento	Data do teste bombeamento	Situação em 10/1/97
			Norte	Leste						
P0	Poço tubular	(?)	7802165	608190	817	60,00	Não	Sim	30/09/70	desativado
P1	Poço tubular	05/12/69	7802260	608345	806	80,00	Sim	Sim	12/12/69	desativado
P2	Poço tubular	(?)	7802270	608490	808	92,00	Não	Sim	20/12/73	desativado
P3	Poço tubular	(?)	7802290	608135	821	80,00	Sim	Sim	28/09/95	operando
P4	Poço tubular	30/11/95	7802320	608585	808	80,00	Sim	Sim	06/12/95	operar em 97
P5	Poço tubular	28/09/95	7802345	608615	807	91,00	Sim	Sim	29/09/95	operar em 97
P6	Poço tubular	(?)	7802430	608590	806	80,00	Não	Sim	31/12/73	operando
P7	Poço tubular	(?)	7802455	608435	806	79,00	Não	Sim	03/12/73	desativado
P8	Poço tubular	30/12/95	7803115	608720	802	80,00	Sim	Sim	30/12/95	operar em 97
P9	Poço tubular	02/11/95	7803350	608790	800	80,00	Sim	Sim	08/11/95	operar em 97
P10	Poço tubular	12/09/95	7803375	608840	799	100,00	Sim	Sim	13/09/95	operar em 97
P11	Poço tubular	04/10/95	7803665	608980	794	60,00	Sim	Sim	06/10/95	operar em 97
F1	Furo sonda	15/10/95	7803542	608911	797	30,00	Sim	-	-	perdidos
F2	Furo sonda	12/02/92	7802692	608486	803	26,42	Sim	-	-	perdidos
F3	Furo sonda	15/02/92	7802736	608541	803	22,15	Sim	-	-	perdidos
F4	Furo sonda	?/7/78	7802670	608682	806	24,52	Sim	-	-	perdidos
F5	Furo sonda	?/7/78	7802659	608781	813	25,50	Sim	-	-	perdidos
F6	Furo sonda	?/7/78	7802638	608879	820	32,60	Sim	-	-	perdidos
F7	Furo sonda	02/06/86	7802365	607919	845	17,45	Sim	-	-	perdidos
F8	Furo sonda	29/11/79	7802387	608094	840	19,30	Sim	-	-	perdidos
F9	Furo sonda	02/05/81	7802321	608170	822	13,45	Sim	-	-	perdidos
F10	Furo sonda	?/7/78	7802779	608661	808	21,40	Sim	-	-	perdidos
F11	Furo sonda	?/7/78	7802714	608650	806	25,00	Sim	-	-	perdidos
F12	Furo sonda	?/7/78	7802627	608639	805	24,60	Sim	-	-	perdidos
F13	Furo sonda	15/10/91	7803390	608617	809	23,45	Sim	-	-	perdidos
F14	Furo sonda	16/10/91	7803368	608661	804	23,10	Sim	-	-	perdidos

Os poços P4, P5, P8, P9, P10 e P11, localizados no Campus da UFMG, foram perfurados no segundo semestre de 1995 e têm como objetivo participar no abastecimento d'água do Campus. Durante o desenvolvimento do estudo foi possível acompanhar todas as operações de sondagem e testes de bombeamento realizados nestes poços. A entrada em operação destes poços está prevista para o final de 1997 ou início de 1998. Os poços P0, P1 e P2, mais antigos e atualmente desativados, estão localizados em terrenos da UFMG, em frente ao CDTN, e estavam ocultos até serem localizados durante as atividades de campo deste trabalho. Ao que tudo indica, os poços P0, P1 e P2 foram perfurados na década de 60 e tiveram no passado uma participação efetiva no abastecimento de água das unidades da UFMG, funcionando atrelados a um sistema único de compressão de ar.

Os poços P3 e P6, localizados, respectivamente, no CDTN e nas proximidades do Colégio Técnico da UFMG, são os únicos que estão em operação no momento. Tratam-se de poços antigos, perfurados possivelmente no final da década de 60 ou início da de 70, mas que ainda vêm contribuindo para o abastecimento de água da comunidade local. A vazão obtida em

testes de bombeamento foi de 19,2 m³/h, para o P6, e de 12,2 m³/h, para o P3. O poço P7, localizado junto ao prédio do Departamento de Química da UFMG, encontra-se desativado desde meados da década de 80, mas no passado operou interligado com o P6.

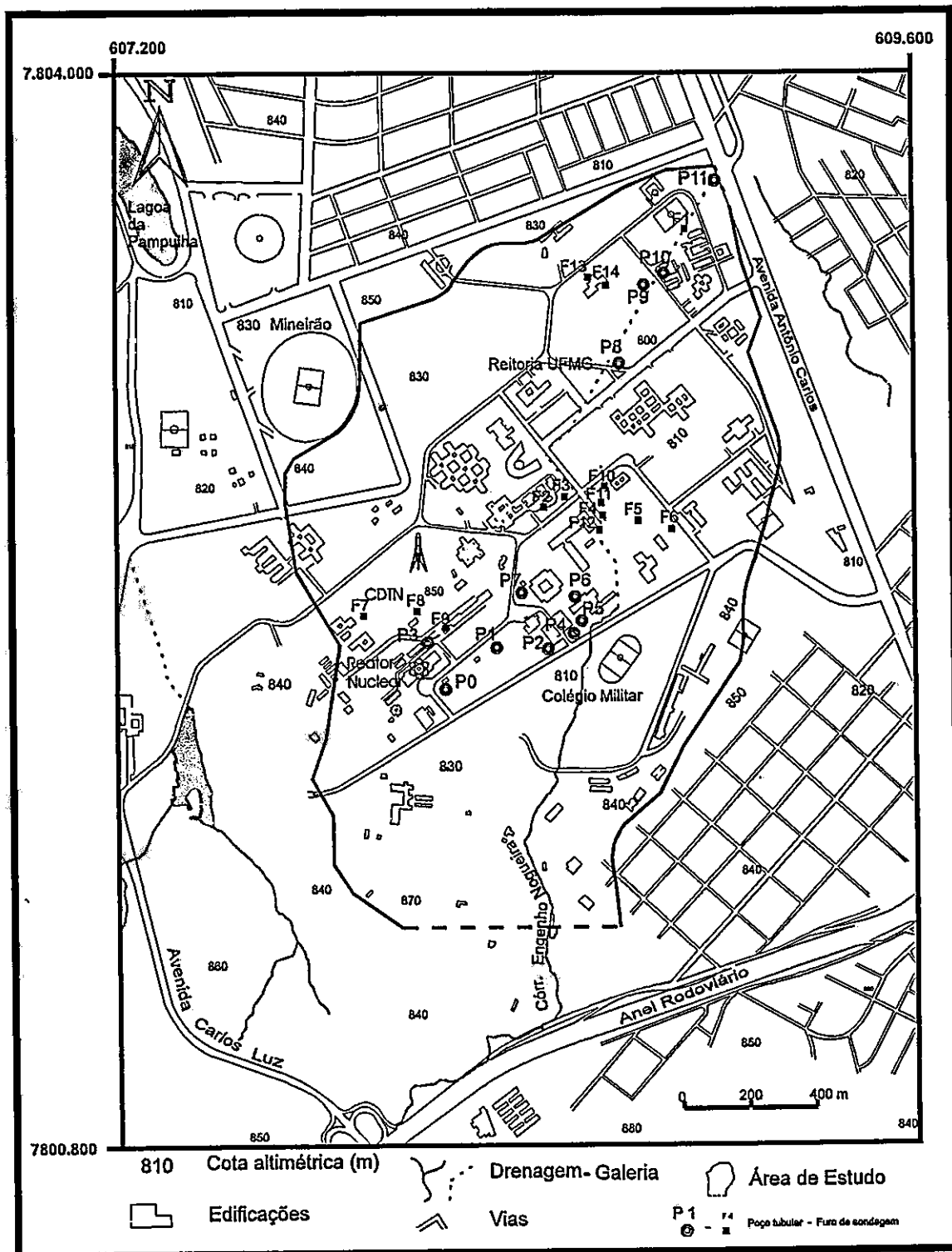


Figura 5.1: Mapa de localização dos pontos de água. Os poços tubulares estão representados por círculos vermelhos e os furos de sondagem por quadrados pretos.

Alguns documentos pesquisados fizeram menção à existência de dois poços tubulares nas proximidades do Colégio Militar. Estes poços não foram localizados durante os trabalhos de campo e as informações relativas a eles se mostraram pouco confiáveis, não tendo sido utilizadas neste estudo.

Com exceção do furo F1, que é um poço tubular abandonado durante as perfurações realizadas em 1995, os demais furos de sondagem inventariados foram perfurados visando o projeto das fundações de prédios. Na realidade, de um total aproximado de 120 furos analisados, selecionou-se os 14 que constam da Tabela 5.1. Esta seleção foi feita, principalmente, em função da representatividade dos dados e da escala de trabalho. Estes furos contribuíram para os estudos geológicos da área, especialmente durante a elaboração das seções geológicas.

A locação em planta dos poços tubulares foi feita com o uso de trena e bússola, tomando-se por referência as construções existentes nas imediações. Após locados no mapa, os poços tiveram suas coordenadas UTM levantadas. As altitudes destes poços no terreno, relativas ao nível do mar, foram obtidas a partir do mapa base. Quanto aos furos de sondagem, estes foram locados no mapa base e tiveram suas cotas definidas conforme as informações originais, disponibilizadas pelas companhias de sondagens sob a forma de croquis e perfis no solo: Engesonda (1979); Arcos (1991); e E.G.F(1992) . Maiores informações sobre os poços tubulares serão apresentadas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS DE CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

6.1 - Geologia

Visando facilitar o entendimento das informações geológicas tratadas neste item, optou-se por subdividi-lo em dois subitens. O primeiro deles, Contexto Regional, tem por objetivo situar a área de estudo dentro dos domínios geológicos regionais. Para o desenvolvimento deste item utilizou-se, em parte, o trabalho elaborado por Silva e colaboradores (Silva et al., 1995), que trata sobre vários aspectos físicos do Município de Belo Horizonte, destacando-se a geologia e a hidrogeologia. A finalidade do segundo subitem, Contexto Local, é apresentar as características geológicas da área de estudo, obtidas como resultado dos trabalhos de campo e de gabinete realizados no decurso do desenvolvimento da dissertação. Além disso, procurou-se estruturar os dados geológicos dentro de um formato mais adequado para o estabelecimento do modelo hidrogeológico conceitual local. As informações que mais contribuíram para a elaboração do Contexto Local foram aquelas provenientes dos poços tubulares e dos furos de sondagem inventariados, tais como os perfis geológicos de subsuperfície.

6.1.1 - Contexto Regional

©

Conforme pode ser visto na Figura 6.1, o Município de Belo Horizonte abrange dois grandes Domínios litoestruturais e morfológicos quais sejam: o Domínio do Complexo Belo Horizonte e o Domínio das Sequências Metassedimentares. Além das litologias representativas destes dois domínios, o subsolo do Município também é constituído por rochas metabásicas intrusivas e pelas Formações Superficiais.

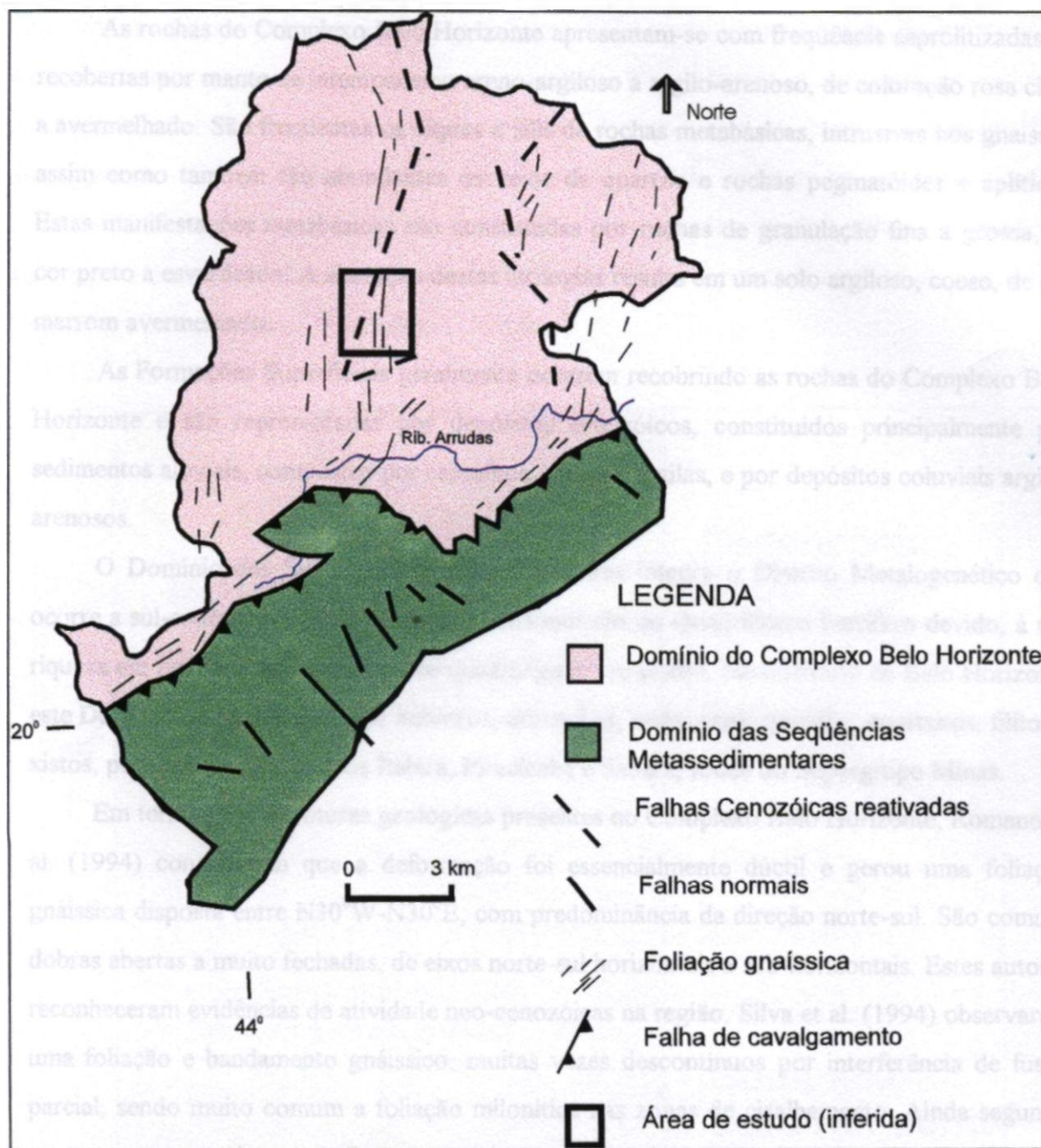


Figura 6.1: Localização da área de estudo no contexto da geologia regional. Simplificado de Silva et al. (1995).

O Complexo Belo Horizonte compõe o substrato do território de Belo Horizonte, sendo constituído por rochas gnaíssicas arqueanas, parcialmente remobilizadas e migmatizadas. A principal litologia integrante deste Complexo foi designada por Noce et al. (1994) de Gnaiss Belo Horizonte. Esta rocha apresenta cor cinza, granulação fina a muito grossa, de composição granítica a monzonítica. A alternância de bandas milimétricas a centimétricas de cor clara, quartzo-feldspáticos, e bandas finas, escuras, ricas em biotita e/ou anfibólio, impõe a esta litologia um bandamento composicional marcante.

As rochas do Complexo Belo Horizonte apresentam-se com frequência saprolitizadas ou recobertas por manto de intemperismo areno-argiloso a argilo-arenoso, de coloração rosa claro a avermelhado. São freqüentes os diques e sills de rochas metabásicas, intrusivas nos gnaisses, assim como também são abundantes os veios de quartzo e rochas pegmatóides e aplíticas. Estas manifestações metabásicas são constituídas por rochas de granulação fina a grossa, de cor preto a esverdeado. A alteração destas litologias resulta em um solo argiloso, coeso, de cor marrom avermelhado.

As Formações Superficiais geralmente ocorrem recobrando as rochas do Complexo Belo Horizonte e são representadas por depósitos cenozóicos, constituídos principalmente por sedimentos aluviais, compostos por cascalhos, areias e argilas, e por depósitos coluviais argilo-arenosos.

O Domínio das Sequências Metassedimentares integra o Distrito Metalogenético que ocorre a sul-sudoeste de Belo Horizonte, denominado de Quadrilátero Ferrífero devido, à sua riqueza em ferro e à sua configuração quadrangular em planta. No território de Belo Horizonte este Domínio é representado por itabiritos, dolomitos, metaconglomerados, quartzitos, filitos e xistos, pertencentes aos grupos Itabira, Piracicaba e Sabará, todos do Supergrupo Minas.

Em termos das estruturas geológicas presentes no Complexo Belo Horizonte, Romano et al. (1994) constataram que a deformação foi essencialmente dúctil e gerou uma foliação gnáissica disposta entre N30°W-N30°E, com predominância da direção norte-sul. São comuns dobras abertas a muito fechadas, de eixos norte-sul horizontais a sub-horizontais. Estes autores reconheceram evidências de atividade neo-cenozóicas na região. Silva et al. (1994) observaram uma foliação e bandamento gnáissico, muitas vezes descontínuos por interferência de fusão parcial, sendo muito comum a foliação milonítica nas zonas de cisalhamento. Ainda segundo estes autores, as juntas e fraturas possuem em geral mergulhos fortes a verticais, com distribuições espaciais muito variadas.

6.1.2 - Contexto Local

Os 2,5 km² da área de estudo encontram-se inseridos no Domínio do Complexo Belo Horizonte. As rochas deste Complexo estão representadas no local por seus produtos de decomposição, geralmente recobertos pelos depósitos das Formações Superficiais. Com o objetivo de subsidiar a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual, optou-se por dividir as litologias do Complexo Belo Horizonte em duas unidades distintas, levando-se em conta o

fator intemperismo, conforme ilustrado na Figura 6.2. Assim, denominou-se de **Substrato Cristalino São** as rochas do Complexo que ainda não sofreram a ação dos processos intempéricos. Sobreposta a esta unidade ocorre um espesso manto de alteração, resultado da decomposição “in situ” das rochas sotopostas, o qual designou-se de **Manto de Intemperismo**. As Formações Superficiais estão representadas na área pelos sedimentos aluviais recentes ou **Depósitos Aluviais**, presentes no leito e várzea do córrego do Engenho Nogueira, e pelos **Depósitos Coluviais** de encosta.

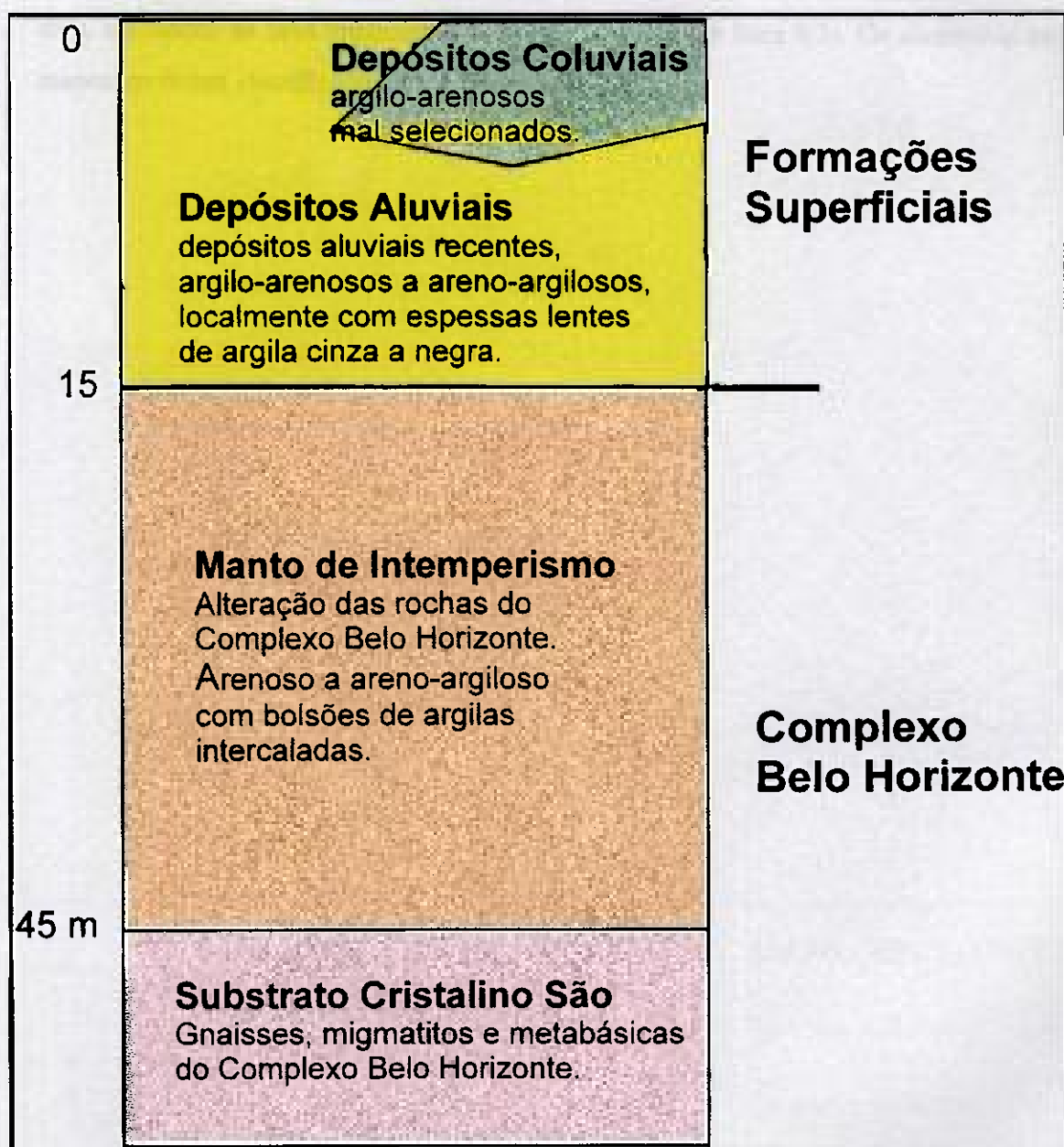


Figura 6.2: Perfil geológico vertical esquemático na várzea do córrego do Engenho Nogueira.

Cabe aqui algumas considerações sobre o mapa geológico mostrado na Figura 6.3, o qual foi elaborado com base nos levantamentos de campo e nos dados de geologia do subsolo provenientes dos pontos de água inventariados. Como as informações de subsuperfície são esparsas e como uma parte da área encontra-se urbanizada e recoberta por aterros, mascarando os materiais geológicos, procurou-se apenas cartografar, de forma inferida, o contato entre as áreas de predominância do Complexo Belo Horizonte, com aquelas onde prevalecem os depósitos das Formações Superficiais. A exceção foi dada ao veio de quartzo, situado nas imediações do CDTN, e ao depósito aluvial mais argiloso, localizado ao norte da área, em função de suas implicações hidrogeológicas (vide Item 6.5). Os elementos estruturais mapeados foram identificados por fotointerpretação.

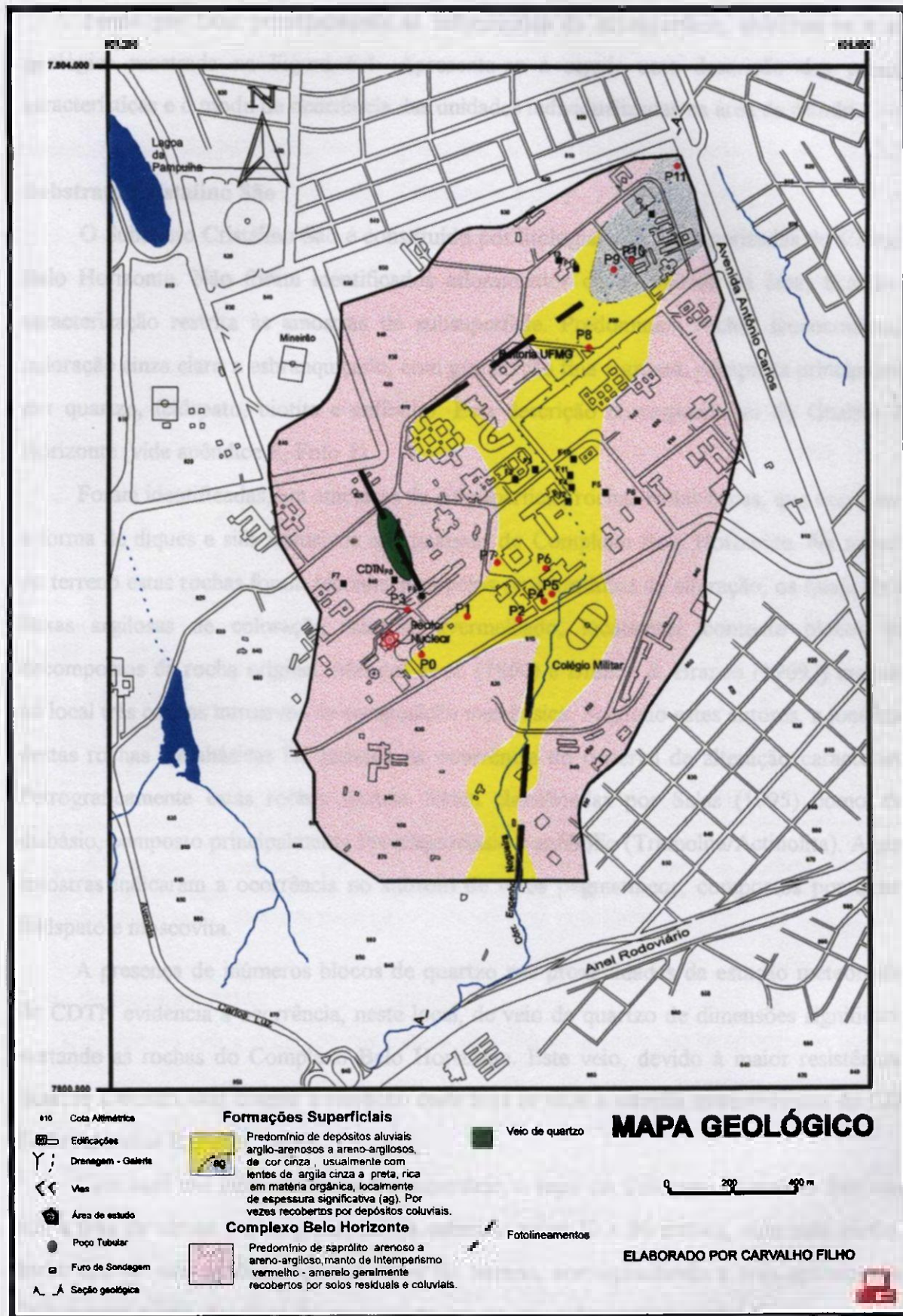


Figura 6.3: Mapa geológico simplificado.

Tendo por base principalmente as informações de subsuperfície, elaborou-se a seção geológica mostrada na Figura 6.4. Apresenta-se a seguir uma descrição das principais características e o modo de ocorrência das unidades individualizadas na área de estudo.

Substrato Cristalino São

O Substrato Cristalino São é constituído por litologias não intemperizadas do Complexo Belo Horizonte. Não foram identificados afloramentos desta unidade na área, ficando sua caracterização restrita às amostras de subsuperfície. Predominam rochas leucocráticas, de coloração cinza claro a esbranquiçado, com granulação fina a grossa, composta principalmente por quartzo, feldspato, biotita e anfibólio. Esta descrição corresponde ao do Gnaiss Belo Horizonte (vide apêndice E, Foto 1).

Foram identificadas, em amostras de subsuperfície, rochas metabásicas, que ocorrem sob a forma de diques e sills intrusivos nos gnaisses do Complexo Belo Horizonte. Na superfície do terreno estas rochas foram reconhecidas pelos seus produtos de alteração, os quais formam faixas argilosas de coloração marrom avermelhado, localmente contendo blocos semi-decompostos da rocha original. Mendes et al. (1960) e Branco & Branco (1969?) mapearam no local três corpos intrusivos de composição metabásica. Segundo estes autores, a localização destas rochas metabásicas foi baseada na ocorrência do material de alteração característico. Petrograficamente estas rochas básicas foram classificadas por Salas (1995) como metadiabásio, composto principalmente por plagioclásio e anfibólio (Tremolita/Actinolita). Algumas amostras indicaram a ocorrência no subsolo de veios pegmatíticos, compostos por quartzo, feldspato e moscovita. ©

A presença de inúmeros blocos de quartzo nas proximidades da estação meteorológica do CDTN evidencia a ocorrência, neste local, de veio de quartzo de dimensões significativas, cortando as rochas do Complexo Belo Horizonte. Este veio, devido à maior resistência do quartzo à erosão, deu origem à elevação onde hoje se situa a estação meteorológica do CDTN (vide Apêndice E, Fotos 2 e 3).

Com base nas informações de subsuperfície, o topo do Substrato Cristalino São ocorre sob a área de várzea a uma profundidade estimada entre 30 e 50 metros, com uma média em torno dos 45 metros abaixo da superfície do terreno, correspondendo à cota aproximada de 750 metros acima do nível do mar, como mostra a seção geológica da Figura 6.4. Sob as regiões mais elevadas da área, representadas pelos topos das colinas, que atuam como divisores hidrológicos da bacia do Engenho Nogueira, estimou-se que o topo do Substrato

Cristalino São esteja a uma profundidade de 20-30 metros. Esta estimativa tem como base as informações provenientes de alguns furos de sondagem.

Uma informação importante, do ponto de vista hidrogeológico, é a frequência e o posicionamento espacial das estruturas planares. A ausência de afloramentos do substrato cristalino impossibilitou o mapeamento em superfície destas estruturas. Durante a perfuração dos poços tubulares, várias vezes se interceptou fraturas no Substrato Cristalino São. Na Figura 6.4 estão assinaladas todas as passagens com fraturas/juntas reportadas pelos sondadores.

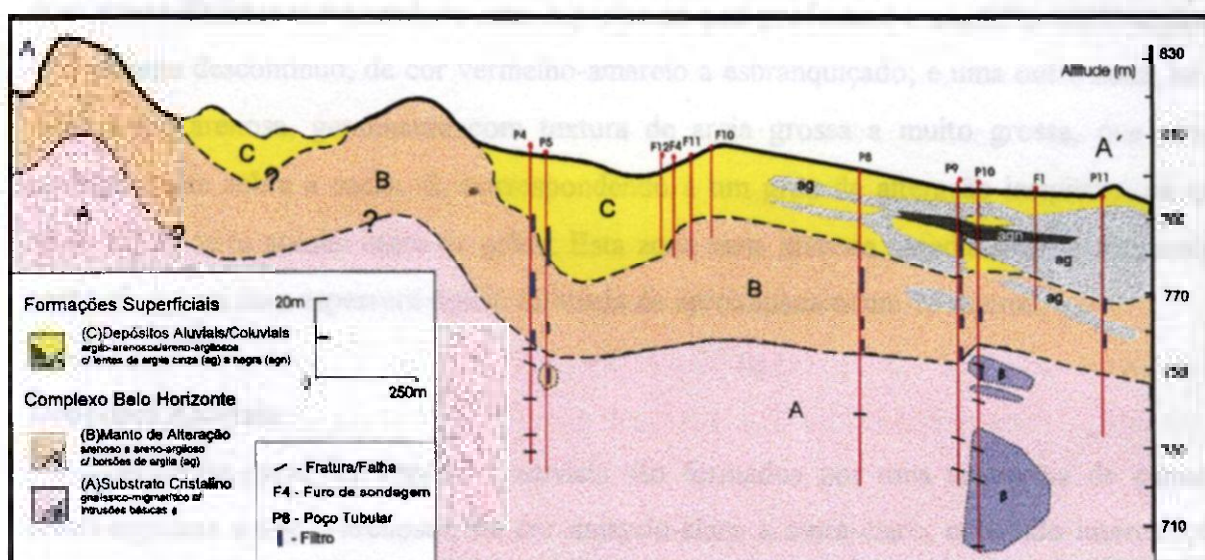


Figura 6.4: Seção geológica vertical A-A' longitudinal à calha do córrego do Engenho Nogueira. Todos os contatos são inferidos. Apenas estão representadas as lentes de argila mapeáveis na escala do desenho. Os poços foram projetados na seção. Em alguns poços não se forneceu dados de fraturas.

Manto de Intemperismo

É composto pelos produtos resultantes da ação de agentes do intemperismo sobre as rochas constituintes do Complexo Belo Horizonte, ocorrendo portanto sobreposto ao Substrato Cristalino São. Trata-se de uma unidade saprolítica onde prevalecem as características típicas da alteração de gnaisses (vide Apêndice E, Foto 4). Na área de estudo possui textura predominante arenosa a areno-argilosa, mas com variações desde areias grossas até argilas, refletindo um caráter textural heterogêneo mas com predomínio, no local, da alteração de gnaisses de granulação grosseira sobre as demais litologias presentes no Complexo Belo Horizonte: gnaisses de granulação fina, migmatitos, rochas máficas e outras mais. Possui cor rosa avermelhado, as vezes com níveis esbranquiçados devido à presença de

caulim, apresentando geralmente estruturas originais preservadas (vide Apêndice E, Foto 5). As rochas metabásicas geram um saprólito mais argiloso e coeso, de cor marrom avermelhada, contrastante com o resultante da alteração dos gnaisses (vide Apêndice E, Foto 4). O manto de intemperismo encontra-se geralmente recoberto por solos residuais, pouco espessos, e pelos depósitos clásticos das Formações Superficiais.

A unidade do Manto de Intemperismo possui espessura variável, estimada entre 20-30 metros no topo das colinas, e de 25-35 metros, na várzea do córrego do Engenho Nogueira. O saprólito torna-se mais arenoso e coeso em profundidade, com a diminuição do estado intempérico, até passar, gradativamente, para a rocha sã propriamente dita. Individualizou-se duas zonas distintas nesta unidade: uma superior na qual predomina o saprólito areno-argiloso, lateralmente descontínuo, de cor vermelho-amarelo a esbranquiçado; e uma outra zona, basal, tipicamente arenosa, geralmente com textura de areia grossa a muito grossa, que ocorre imediatamente sobre a rocha sã, correspondendo a um grau de alteração insipiente, na qual ainda existe certa coesão entre os grãos. Esta zona mais arenosa, imediatamente sotoposta à rocha sã, possui uma espessura média estimada de aproximadamente 15 metros.

Depósitos Aluviais

De forma geral, os depósitos aluviais são formados por uma seqüência de camadas areno-argilosas a argilo-arenosas, de cor amarelo-claro a cinza-claro, contendo intercalações centimétricas a métricas de argila cinza a preta, muito rica em matéria orgânica. O leito ou canal atual do córrego é constituído por areia grossa a cascalho fino, contendo fragmentos de rocha. A várzea ou planície de inundação é composta predominantemente por argila cinza clara a escura, localmente preta e muito rica em matéria orgânica. As informações de sondagem levaram à individualização de uma expressiva lente de argila, com até 20 metros de espessura, localizada no extremo norte da área, conforme ilustrado nas Figuras 6.3 e 6.4. Os depósitos aluviais apresentam uma espessura variando entre os 1-2 metros até os 20 metros, podendo-se estimar uma espessura média de 15 metros.

As amostras de subsuperfície mostraram a presença de paleocanais sotopostos à várzea atual, indicando uma migração pretérita do leito fluvial. Também foram identificados paleobrejos, caracterizados pela presença de lentes delgadas de argila negra carbonosa, inclusas nas argilas da planície de inundação. Estes brejos devem ter sido originados de pequenos acúmulos de águas de cheias, ricas em detritos vegetais e lama.

Embora o córrego do Engenho Nogueira esteja canalizado no seu trecho mais a jusante da área, pode-se reconhecer o seu antigo traçado, de direção sudoeste-nordeste. Nesta parte, o córrego apresenta uma planície de inundação mais larga com depósitos relativamente mais finos que os presentes, mais a montante. Na porção setentrional da área, o córrego apresenta trechos de baixa sinuosidade, caracterizando um canal fluvial do tipo retilíneo encaixado, de direção sul-norte, e possuindo, em comparação com o trecho mais a jusante, uma área de várzea menor e mais estreita, e sedimentos mais grosseiros no canal fluvial.

Depósitos coluviais

Os depósitos coluviais foram gerados pelos movimentos torrenciais de encosta e de tálus, com ocorrência restrita às porções intermediárias e basais das vertentes das colinas. São constituídos por matriz areno-argilosa, vermelho-amarelo, mal selecionada, contendo grãos de quartzo angulosos e fragmentos de rocha do Complexo Belo Horizonte, em decomposição. Estes depósitos exibem espessuras variando entre 2 e 5 metros, com média de 3 metros, e recobrem parcialmente e de forma localizada as litologias do Manto de Intemperismo e os Depósitos Aluviais (vide Apêndice E, Foto 7). É muito difícil, e às vezes impossível, estabelecer uma nítida separação entre os depósitos coluviais dos aluviais. A presença de grande volume de material areno-argiloso utilizado em aterros durante a urbanização que vem se expandindo na área desde a década de 60, principalmente nos domínios do Campus da UFMG, torna ainda mais difícil a individualização desta unidade.

Nos locais em que o colúvio está sobreposto aos depósitos aluviais argilosos de planície de inundação, observou-se que este atua como um pequeno depósito superficial de água, pois a água proveniente das encostas nele se infiltra sendo barrada em profundidade pela presença da argila mais impermeável.

Aspectos estruturais

Devido à ausência de afloramentos de rochas não decompostas na área, não foi possível efetuar medidas confiáveis nas estruturas planares e lineares das rochas do Complexo Belo Horizonte, embora em alguns locais seja possível observar o bandamento gnáissico pretérito. A fotointerpretação apontou a existência de três fotolineamentos, indicados na Figura 6.3, que já tinham sido mapeados por Silva et al.(1995). Um deles, de direção sudeste-noroeste, corresponde ao veio de quartzo mapeado nas imediações da estação meteorológica do CDTN. Os outros dois, um localizado no sul da área e tendo direção norte-sul, e o outro de direção

sudoeste-nordeste, ocorrendo mais a norte, devem corresponder a antigos planos ou zonas de fraqueza estrutural das rochas do Complexo Belo Horizonte. Estes fotolineamentos ocorrem sobre o canal ou várzea do córrego do Engenho Nogueira, indicando um controle estrutural no traçado do mesmo, e podem ser evidências de atividade tectônica neocenozóica no local, regionalmente reconhecida por Romano et al. (1994). Na parte setentrional da área, o córrego possui baixa sinuosidade, forte retiliniaridade de direção sul-norte, concordante com o fotolineamento (vide Apêndice E, Foto 10). Estes aspectos vêm corroborar as evidências de controle estrutural da drenagem. Mais a jusante, o córrego sofre uma inflexão, passando a fluir na direção sudoeste-nordeste, que corresponde à direção do fotolineamento identificado no local.

6.2 - Geomorfologia

Como já descrito anteriormente, a área de estudo está inserida no domínio litomorfológico regional, denominado de Complexo Belo Horizonte. Este Complexo integra a unidade geomorfológica denominada de Depressão de Belo Horizonte (Barbosa & Rodrigues, 1965), que se caracteriza por estar posicionada na zona de contato entre o compartimento de relevo acidentado, cenário típico da região do Quadrilátero Ferrífero (MG), e o compartimento de relevo suave, característico da bacia sedimentar do Grupo Bambuí (MG). Conforme Silva et al. (1994), predominam no relevo da região as colinas de topo plano a arqueado, com encostas côncavo-convexas e altitudes entre 800-900 m, resultantes da dissecação fluvial das áreas gnáissicas. Sobressaem-se na paisagem espigões alongados que, diferentemente da maior parte das colinas, apresentam encostas de média a alta declividade suscetíveis ao escoamento torrencial. Nas partes baixas das encostas formam-se expressivos depósitos coluviais, que se interdigitam a jusante com depósitos aluviais. Observa-se em muitos locais padrões ortogonais dos cursos d'água, evidenciando o condicionamento da drenagem à estrutura do substrato. Ainda segundo estes autores, nas áreas de relevo acidentado predominam solos imaturos, arenosos e muito vulneráveis a erosão, tornando-se maturo, espesso e silto-argiloso nas áreas de relevo suave. O solo é delgado ou ausente nas áreas onde afloram os maciços rochosos. Na região da Pampulha encontram-se as maiores espessuras do manto de intemperismo, atingindo valores de até 100 m.

O relevo local foi dividido em duas unidades fisiográficas, uma caracterizada pelo conjunto de colinas, e a outra pela várzea do córrego do Engenho Nogueira. As colinas foram subdivididas em dois segmentos distintos: as vertentes e o topo (vide Figura 6.5).

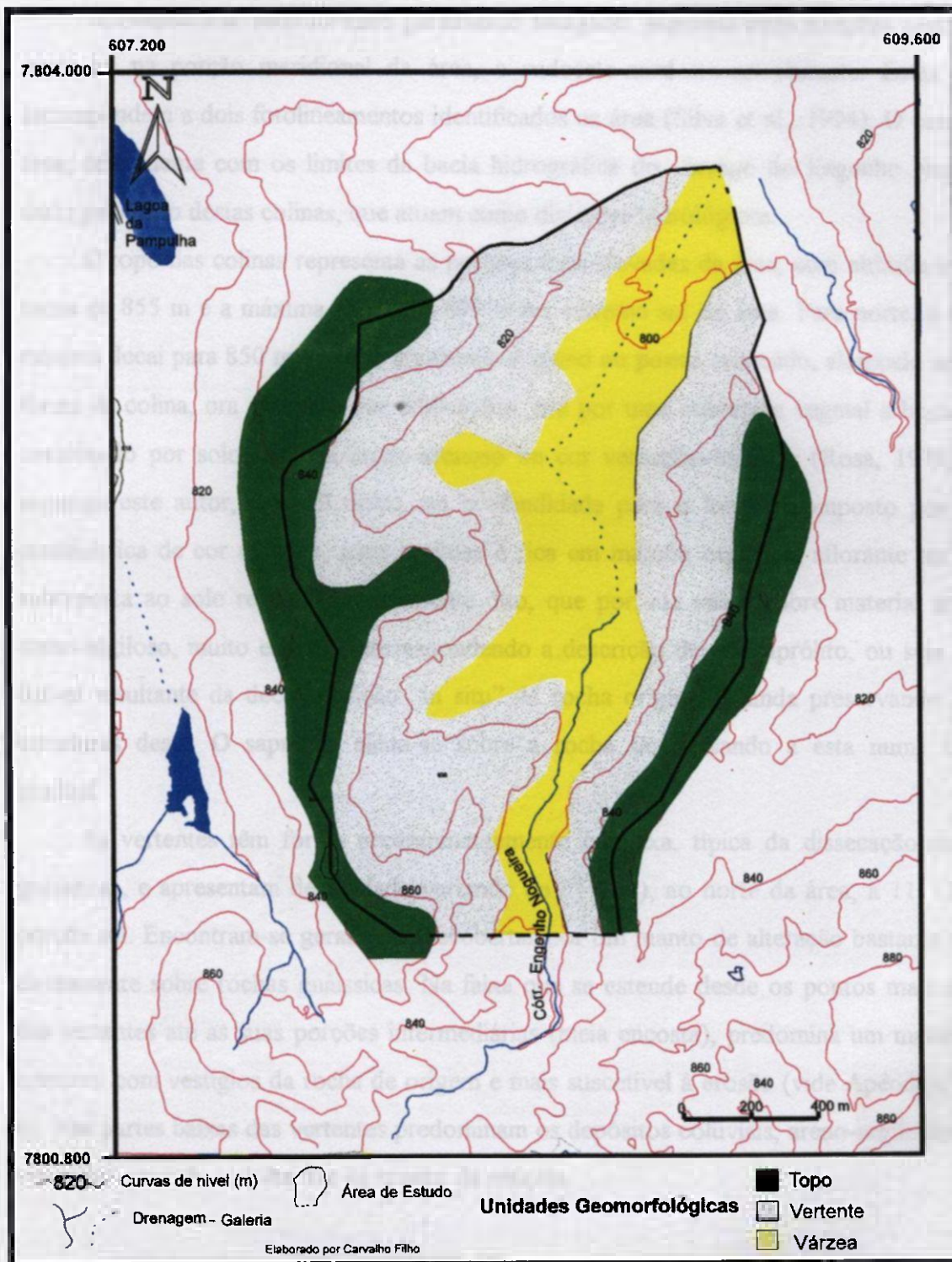


Figura 6.5: Mapa de distribuição das unidades geomorfológicas. Limites aproximados.

Descreve-se a seguir uma síntese das principais características observadas para cada uma das unidades.

Colinas

Apresentam-se num formato geralmente alongado, segundo duas direções preferenciais, norte-sul na porção meridional da área, e sudoeste-nordeste no restante. Estas direções correspondem a dois fotolineamentos identificados na área (Silva et al., 1994). O contorno da área, coincidente com os limites da bacia hidrográfica do córrego do Engenho Nogueira, é dado pelo topo destas colinas, que atuam como divisores hidrológicos.

O topo das colinas representa as porções mais elevadas da área, com altitude média em torno de 855 m e a máxima atingindo 875 m no extremo sul da área. Para norte, a elevação máxima decai para 850 m. O topo apresenta-se plano ou pouco arqueado, alongado segundo a forma da colina, ora ocupado por edificações, ora por uma cobertura vegetal arbórea, sendo constituído por solo residual argilo-arenoso de cor vermelho-amarelo (Rosa, 1976). Ainda segundo este autor, o perfil típico em profundidade para o local é composto por camada centimétrica de cor marrom, mais argilosa e rica em matéria orgânica, aflorante no terreno, sobreposta ao solo residual propriamente dito, que por sua vez recobre material arenoso a areno-argiloso, muito espesso, correspondendo a descrição de um saprólito, ou seja material friável resultante da decomposição “in situ” da rocha original e ainda preservando algumas estruturas desta. O saprólito aleita-se sobre a rocha sã, passando a esta numa transição gradual.

As vertentes têm forma predominantemente convexa, típica da dissecação de rochas gnáissicas, e apresentam declividade variando de 5° (9%), ao norte da área, a 11° (20%) na porção sul. Encontram-se geralmente recobertas por um manto de alteração bastante espesso, diretamente sobre rochas gnáissicas. Na faixa que se estende desde os pontos mais elevados das vertentes até as suas porções intermediárias (meia encosta), predomina um material mais arenoso, com vestígios da rocha de origem e mais suscetível à erosão (vide Apêndice E, Foto 6). Nas partes baixas das vertentes predominam os depósitos coluviais, areno-argilosos, de cor vermelho-amarelo, resultantes da erosão da encosta.

Várzea

Encontra-se restrita às partes mais baixas da área, englobando o leito do córrego do Engenho Nogueira e sua planície de inundação (vide Apêndice E, Fotos 8 e 9). Possui a forma

alongada acompanhando o traçado do córrego, que por sua vez segue as direções preferencias dos lineamentos estruturais.

A várzea está preenchida por sedimentos arenosos e argilosos, depositados pelo córrego do Engenho Nogueira. Geralmente, nas proximidades da base das vertentes, estes sedimentos aluviais estão ora recobertos ora interdigitados com depósitos coluviais.

Na porção mais meridional da área, a região de várzea apresenta uma extensão lateral em torno dos 200 m, ocorrendo até a cota topográfica de 820 m, aproximadamente. Mais para norte observa-se um alargamento da várzea que alcança os 400 m de largura, limitada topograficamente à cota 805 m. A Figura 6.6 apresenta um perfil esquemático vertical da área, transversal ao leito do córrego do Engenho Nogueira, onde se pode identificar as unidades de relevo.

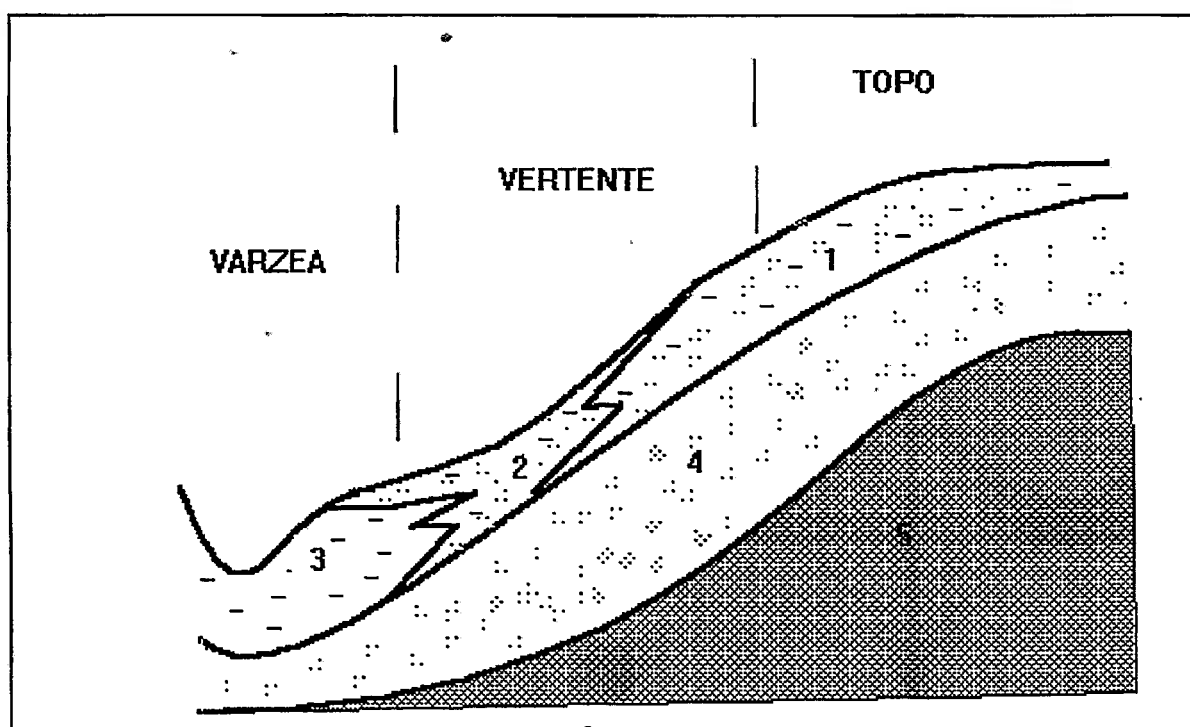


Figura 6.6: Perfil esquemático Típico da área. 1) solo residual; 2) solo coluvial (depósito de tálus) ; 3) depósito aluvial; 4) saprólito ou rocha decomposta; 5) rocha sã do Complexo Belo Horizonte, principalmente gnaiss. Não se guardou as proporções entre as espessuras de cada unidade.

6.3 - Balanço Hídrico e Estimativa de Recarga do Aquífero

Os dados meteorológicos apresentados na Tabela 6.1, representando os valores mensais da temperatura média do ar e da precipitação para o período de dezembro de 1995 a novembro

de 1996, foram obtidos junto ao 5º Distrito de Meteorologia em Belo Horizonte, órgão do Instituto Nacional de Meteorologia, do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. O intervalo de tempo, de 12/95 a 11/96, corresponde ao período no qual se utilizou os dados referentes às oscilações dos níveis de água nos poços tubulares, como valores de calibração para o modelo numérico (vide Capítulo 7). A temperatura média no período foi de 21,9°C, enquanto a precipitação total alcançou os 1921,8 mm.

Tabela 6.1: Dados meteorológicos para o período de dezembro/95 a novembro/96.

Meses do Ano	Temperatura Média do Ar (°C)	Precipitação Total (mm)
Dez/95	22,3	547,7
Jan/96	24,6	211,0
Fev/96	24,3	205,0
Mar/96	24,2	295,2
Abr/96	22,3	112,4
Mai/96	19,8	20,0
Jun/96	18,8	3,0
Jul/96	19,0	0,0
Ago/96	19,5	21,7
Set/96	20,8	70,4
Out/96	27,2	65,1
Nov/96	21,5	370,3
TOTAL	21,9	1921,8

Comparando-se estes dados com os da Tabela 6.2, que apresenta as médias para o período de 1961 a 1991, observa-se que o período em análise (dez/95-nov/96) foi 29 % mais chuvoso que a média histórica de 30 anos. Este aspecto é importante, pois mostra que, embora nos 12 meses considerados no trabalho a precipitação tenha sido superior à média observada nos últimos anos, a diferença não foi suficientemente elevada, conforme informação não referenciada, para considerar este período como atípico.

A estação chuvosa ocorreu de dezembro de 1995 a abril de 1996, reiniciando-se em novembro de 1996, enquanto que o período seco foi de maio de 1996 até outubro de 1996 (vide Tabela 6.1).

Tabela 6.2: Dados meteorológicos históricos (Período de 1961 a 1991).

Meses do Ano	Temperatura Média do Ar (°C)	Precipitação Total (mm)
Janeiro	22,8	296,3
Fevereiro	23,2	188,4
Março	23,0	163,5
Abril	21,1	61,2
Mai	19,8	27,8
Junho	18,5	14,1
Julho	18,1	15,7
Agosto	19,0	13,7
Setembro	21,0	40,5
Outubro	21,9	123,1
Novembro	22,2	227,6
Dezembro	22,2	319,4
TOTAL	21,1	1491,3

Na Tabela 6.3 são apresentados os resultados do balanço hídrico calculados segundo o método de THORNTWAITE (vide Capítulo 3, Item 3.2.2). Para o cálculo do balanço hídrico foram utilizados, como dados de entrada, os valores da Tabela 6.1, mais o valor da capacidade inicial de reserva de água nos solos (CRA). Para este último parâmetro adotou-se o valor de 127 mm, que corresponde ao valor calculado por Raposo (1997) para solos residuais de alteração dos gnaisses do Complexo Belo Horizonte, até a profundidade de 1,0 m. Utilizou-se os fatores de correção mensais (k') da evapotranspiração potencial (ϵ) referentes à latitude 20° sul (vide Apêndice A). ©

A partir dos dados mensais de precipitação e de excedente de água, respectivamente, introduzidos e calculados no balanço hídrico (Tabela 6.3), e considerando-se uma taxa para o escoamento superficial variando de 10-30% da precipitação total do mês, conforme proposto por Freeze & Cherry (1979) com base em estudos recentes, pode-se estimar os valores mensais e anual para a recarga pluvial do aquífero, como mostra a Tabela 6.4. Ressalta-se que estes autores não especificaram o grau de urbanização das bacias estudadas, as quais serviram de base para a análise estatística que determinou a faixa de variação da taxa de escoamento superficial apresentada por eles..

Tabela 6.3: Balanço hídrico.

BALANÇO HÍDRICO - MÉTODO DE THORNTHWAITE																																						
ESTAÇÃO: Belo Horizonte			ALTITUDE: 869m				LATITUDE: 19°56' S																															
Período: Dez/95 - Nov/96	Dez/95	Jan/96	Fev/96	Mar/96	Abr/96	Mai/96	Jun/96	Ju/96	Ago/96	Set/96	Out/96	Nov/96																										
Temperatura média (°C)	22,3	24,6	24,3	24,2	22,3	19,8	18,8	19,0	19,5	20,8	27,2	21,5																										
Índice de calor mensal (I)	9,62	11,16	10,95	10,89	9,62	8,03	7,43	7,55	7,85	8,66	12,99	9,10																										
Fator cor. LAT. mês (K)	1,15	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09																										
ε	87,6	112,3	108,9	107,8	87,6	64,9	56,9	58,4	62,4	73,5	144,8	79,9																										
ETP (mm)	100,8	128,0	108,9	113,1	85,0	62,3	51,8	55,5	61,8	73,5	156,4	87,1																										
Precipitação (mm)	547,7	211,0	205,0	295,2	112,4	20,0	3,0	0,0	21,7	70,4	65,1	370,3																										
ETReal (mm)	100,8	128,0	108,9	113,1	85,0	62,3	51,8	36,0	21,7	70,4	65,1	87,1																										
CRA (mm)	127,0	127,0	127,0	127,0	127,0	84,7	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	127,0																										
Variação da Reserva (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-42,3	-48,8	-36,0	0,0	0,0	0,0	0,0																										
Excedentes (mm)	446,9	83,0	96,1	182,1	27,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	156,2																										
Deficiências (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,6	40,1	3,1	91,3	0,0																										
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="13" style="text-align: center;">BELO HORIZONTE</td> </tr> <tr> <td style="width: 30%;">CRA = 127,0</td> <td colspan="12"> Precipitação Anual : 1921,8 mm Evapotr. Pot. Anual : 1084,1 mm Evapotr. Real Anual : 930,1 mm Excedente Anual : 991,7 mm Deficiência Anual : 154,0 mm </td> </tr> </table>													BELO HORIZONTE													CRA = 127,0	Precipitação Anual : 1921,8 mm Evapotr. Pot. Anual : 1084,1 mm Evapotr. Real Anual : 930,1 mm Excedente Anual : 991,7 mm Deficiência Anual : 154,0 mm											
BELO HORIZONTE																																						
CRA = 127,0	Precipitação Anual : 1921,8 mm Evapotr. Pot. Anual : 1084,1 mm Evapotr. Real Anual : 930,1 mm Excedente Anual : 991,7 mm Deficiência Anual : 154,0 mm																																					

Tabela 6.4: Cálculo dos valores de recarga (Rc.), mensais e total no período de Dez-95 a Nov-96, para escoamentos superficiais de 10, 20 e 30% da precipitação (pp). A taxa de recarga (%Rc.) é em relação à precipitação (pp).

	Dez/95	Jan/96	Fev/96	Mar/96	Abr/96	Mai/96	Jun/96	Jul/96	Ago/96	Set/96	Out/96	Nov/96	ANO
Precipitação (pp)	547,7	211,0	205,0	295,2	112,4	20,0	3,0	0,0	21,7	70,4	65,1	370,3	1921,8
Excedentes (ex)	446,9	83,0	96,1	182,1	27,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	156,2	991,7
E. S. = 10% pp	54,8	21,1	20,5	29,5	11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	174,2
E. S. = 20% pp	109,5	42,2	41,0	59,0	22,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	74,1	348,3
E. S. = 30% pp	164,3	63,3	61,5	88,6	33,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	111,1	522,5
Rc.(E.S.=10%pp)	392,1	61,9	75,6	152,6	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	119,2	817,6
Rc.(E.S.=20%pp)	337,4	40,8	55,1	123,1	4,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	82,1	643,4
Rc.(E.S.=30%pp)	282,6	19,7	34,6	93,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,1	475,5
% Rc.(E.S.=10%pp)	72	29	37	52	14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32	43
% Rc.(E.S.=20%pp)	62	19	27	42	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22	33
% Rc.(E.S.=30%pp)	52	9	17	32	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12	25

Para o período em análise, e considerando-se escoamentos superficiais mensais variando de 10% a 30% da precipitação verificada no mês, concluiu-se que a recarga pluvial do aquífero situa-se entre 817,6 mm e 475,5 mm, o que corresponde a taxas anuais de recarga entre 43% e 25% da precipitação anual. A taxa de recarga calculada por Raposo (1997), nos ensaios com trítio em solos residuais de alteração de gnaisses, foi de 30% ou 571,3 mm no ano. Também recentemente, Oliveira (1997), aplicando o método empírico do *Soil Conservation Service* (SCS), estimou uma taxa de recarga de 25% na área abrangida pelo presente estudo. Os resultados obtidos por estes autores vêm ratificar a faixa de variação da recarga calculada nesta dissertação e que será utilizada no modelo numérico.

6.4 - Hidrologia de Superfície

©

A área de interesse está situada na bacia do córrego do Engenho Nogueira, aflrente da margem direita do ribeirão Pampulha, tributário do ribeirão do Onça, que por sua vez deságua no rio das Velhas, conforme mostrado na Figura 6.7. Esta bacia hidrográfica tem cerca de 6,5 km², dos quais aproximadamente 2,5 km² estão inseridos na área de estudo, 3,5 km² encontram-se à montante e os 1,0 km² restantes à jusante desta.

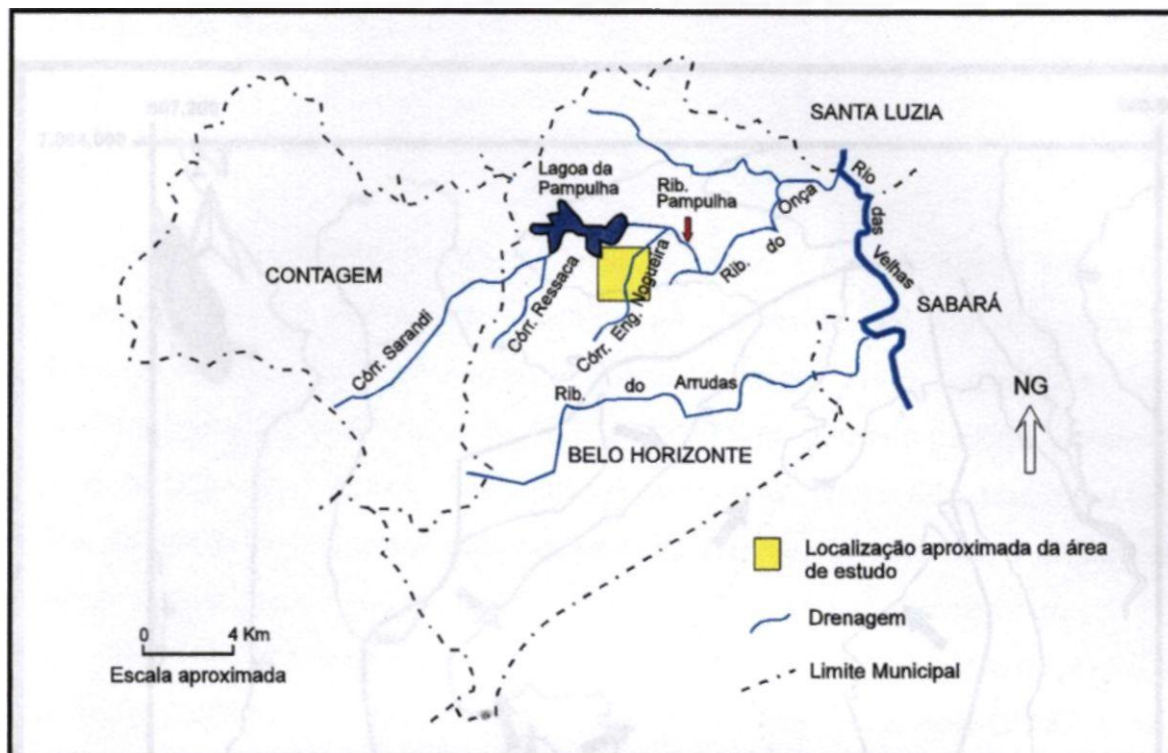


Figura 6.7: Croqui de localização da área de estudo no contexto hidrológico municipal.

O córrego do Engenho Nogueira nasce nas proximidades do Aeroporto Carlos Prates, atingindo a área de interesse após percorrer aproximadamente 3.000 m. No interior da área, o córrego escoar por um trecho de aproximadamente 2.500 m, dos quais os primeiros 1.000 m ainda não estão canalizados, como ilustrado na Figura 6.8. A canalização foi feita através de galerias com seções retangulares de 4,5m de largura por 2,0m de altura, formando um conduto fechado com cerca de 1.500 m de comprimento.

A conformação do relevo local favorece o escoamento das águas pluviais, que rapidamente atingem as cotas inferiores do terreno. Conforme pode ser visto na Figura 6.8, a colina onde está situada a estação meteorológica do CDTN atua como um divisor de águas, sendo responsável pela individualização de duas sub-bacias de drenagem, com eixos na direção sudoeste-nordeste. Em alguns mapas antigos, ainda pode-se observar o traçado de dois córregos nestas sub-bacias, os quais fluem para a calha do córrego do Engenho Nogueira.

A drenagem das águas pluviais, o esgoto sanitário e os efluentes provenientes das instalações existentes na bacia, são lançados no córrego do Engenho Nogueira, conforme informação do Departamento de Planejamento Físico de Obras (DPFO) da UFMG e da Prefeitura de Belo Horizonte, o que contribui significativamente para a contaminação de suas águas (vide Apêndice E, Foto 11).

6.5 - Estudos Hidrogeológicos

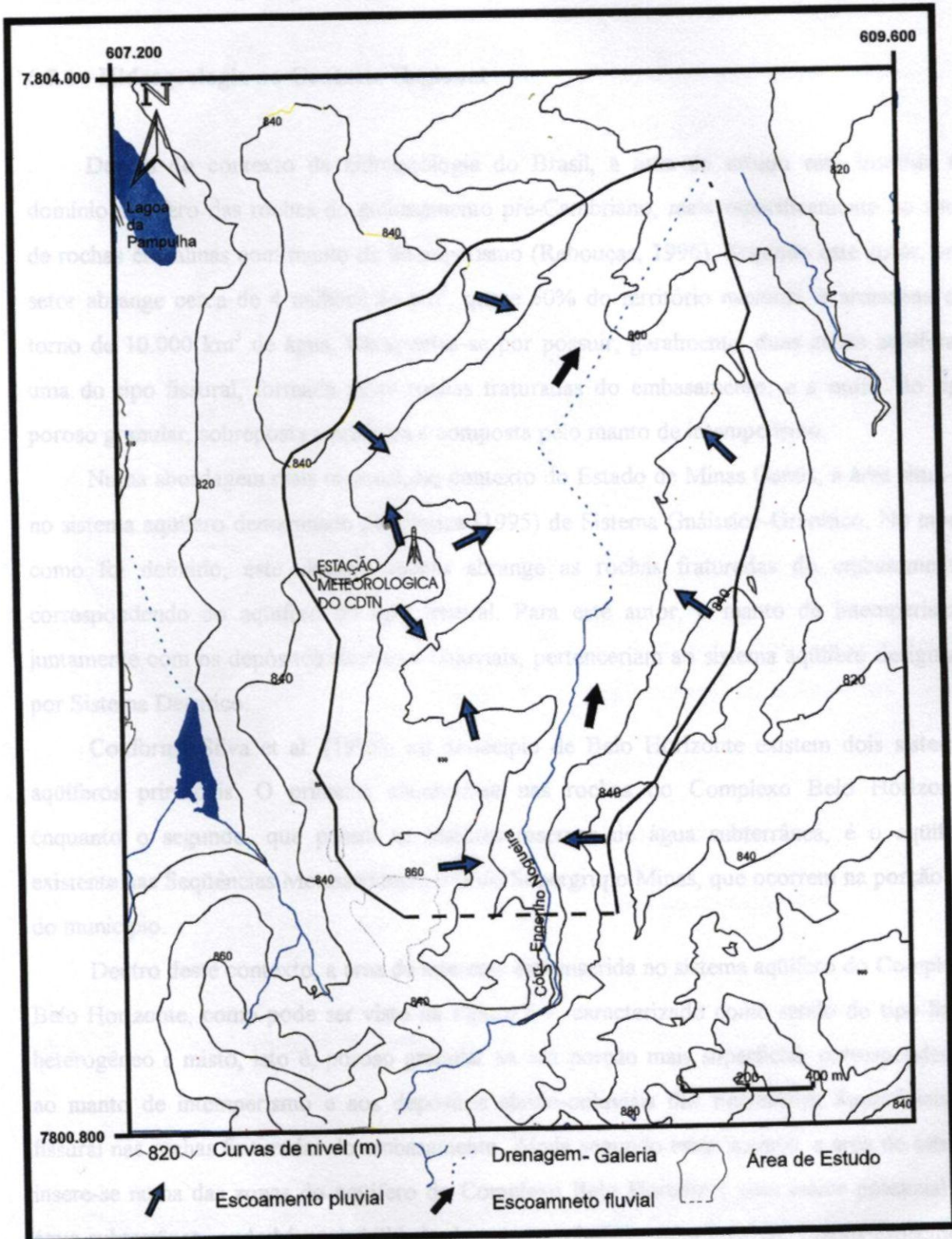


Figura 6.8: Mapa de drenagem da área de estudo.

6.5 - Estudos Hidrogeológicos

6.5.1 - Hidrogeologia no Contexto Regional

Dentro do contexto da hidrogeologia do Brasil, a área de estudo está inserida no domínio aquífero das rochas do embasamento pré-Cambriano, mais especificamente no setor de rochas cristalinas com manto de intemperismo (Rebouças, 1996). Segundo este autor, este setor abrange cerca de 4 milhões de km², quase 50% do território nacional, e armazena em torno de 10.000 km³ de água. Caracteriza-se por possuir, geralmente, duas zonas aquíferas: uma do tipo fissural, formada pelas rochas fraturadas do embasamento; e a outra, do tipo poroso granular, sobreposta à primeira e composta pelo manto de intemperismo.

Numa abordagem mais regional, no contexto do Estado de Minas Gerais, a área situa-se no sistema aquífero denominado por Souza (1995) de Sistema Gnáissico-Granítico. No modo como foi definido, este sistema apenas abrange as rochas fraturadas do embasamento, correspondendo ao aquífero do tipo fissural. Para este autor, o manto de intemperismo, juntamente com os depósitos aluviais e coluviais, pertenceriam ao sistema aquífero designado por Sistema Detrítico.

Conforme Silva et al. (1995), no município de Belo Horizonte existem dois sistemas aquíferos principais. O primeiro encontra-se nas rochas do Complexo Belo Horizonte, enquanto o segundo, que possui as maiores reservas de água subterrânea, é o aquífero existente nas Sequências Metassedimentares do Supergrupo Minas, que ocorrem na porção sul do município. ©

Dentro deste contexto, a área de interesse está inserida no sistema aquífero do Complexo Belo Horizonte, como pode ser visto na Figura 6.9, caracterizado como sendo do tipo livre, heterogêneo e misto, isto é, poroso granular na sua porção mais superficial, correspondendo ao manto de intemperismo e aos depósitos aluvio-coluviais das Formações Superficiais, e fissural nas rochas fraturadas do embasamento. Ainda segundo estes autores, a área de estudo insere-se numa das zonas do aquífero do Complexo Belo Horizonte com maior potencial de água subterrânea, onde há probabilidade dos poços tubulares apresentarem vazões específicas superiores a 0,08 l/s/m.



Figura 6.9: Contexto hidrogeológico do Município de Belo Horizonte. Adaptado de Silva et al. (1995).

6.5.2 - Hidrogeologia no Contexto Local

Com base, principalmente, nas informações de subsuperfície, individualizou-se na área de estudo um aquífero do tipo fissural, composto pelas rochas fraturadas do Complexo Belo Horizonte, e um poroso granular, o qual denominou-se de Aquífero do Engenho Nogueira, sobreposto ao anterior e constituído pelas rochas inconsistentes do manto de intemperismo e pelos depósitos aluviais e colúviais das Formações Superficiais, como ilustrado na Figura 6.10.

Estes aquíferos parecem estar em íntima comunicação hidráulica, constituindo um sistema aquífero único. Dentro do domínio do Aquífero do Engenho Nogueira, no extremo norte da área, foi identificada uma zona argilosa, aluvial, de dimensões significativas, que deve atuar como um aquítardo, isto é, uma camada litológica pouco permeável. Apresenta-se a seguir, uma descrição das características destes aquíferos.

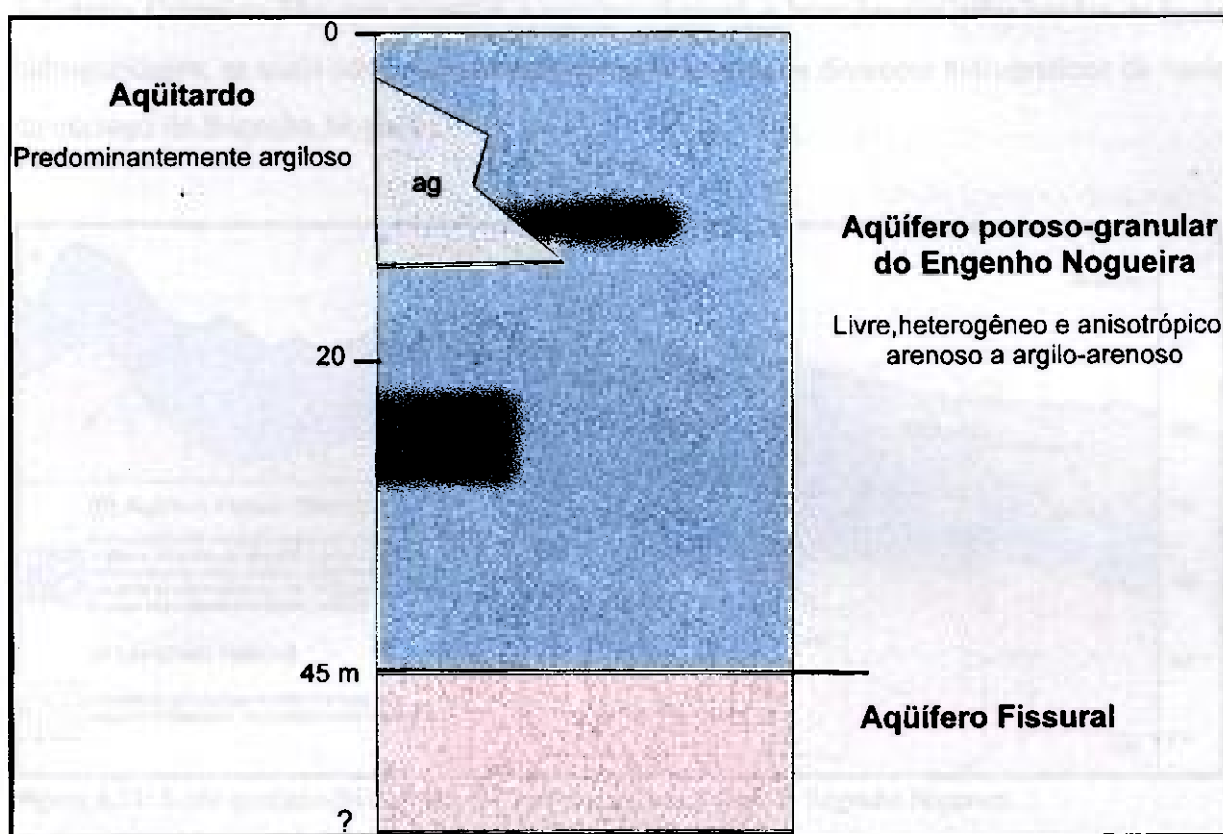


Figura 6.10: Perfil hidrogeológico vertical, característico do sistema aquífero do Complexo Belo Horizonte na área de estudo, especificamente na várzea do córrego do Engenho Nogueira.

Aquífero Poroso Granular do Engenho Nogueira

O manto de intemperismo, resultante da alteração das rochas do Complexo Belo Horizonte, juntamente com os depósitos clásticos aluviais e coluviais, constituem o aquífero poroso granular local, o qual passou-se a denominar de Aquífero do Engenho Nogueira. Trata-se de um aquífero do tipo livre, heterogêneo e anisotrópico, arenoso a argilo-arenoso. Possui 44 metros de profundidade média (vide Figura 6.11) e máxima em torno dos 50 m (poços P2 e P5), sob a calha do córrego do Engenho Nogueira.

A heterogeneidade e anisotropia deste aquífero são devidas à presença de intercalações de argila na matriz arenosa e às variações texturais bruscas, desde argilas a areias grossas, resultantes tanto da alteração dos diferentes tipos litológicos presentes no domínio do Complexo Belo Horizonte, gnaisses de granulação fina a grossa, metabasitos e outras, como pela diversidade granulométrica do ambiente fluvial.

O aquífero poroso granular do Engenho Nogueira está delimitado em profundidade pelo Substrato Cristalino São, que constitui o aquífero fissural, e lateralmente pelas bordas da bacia hidrogeológica, as quais admite-se serem coincidentes com os divisores hidrográficos da bacia do córrego do Engenho Nogueira.

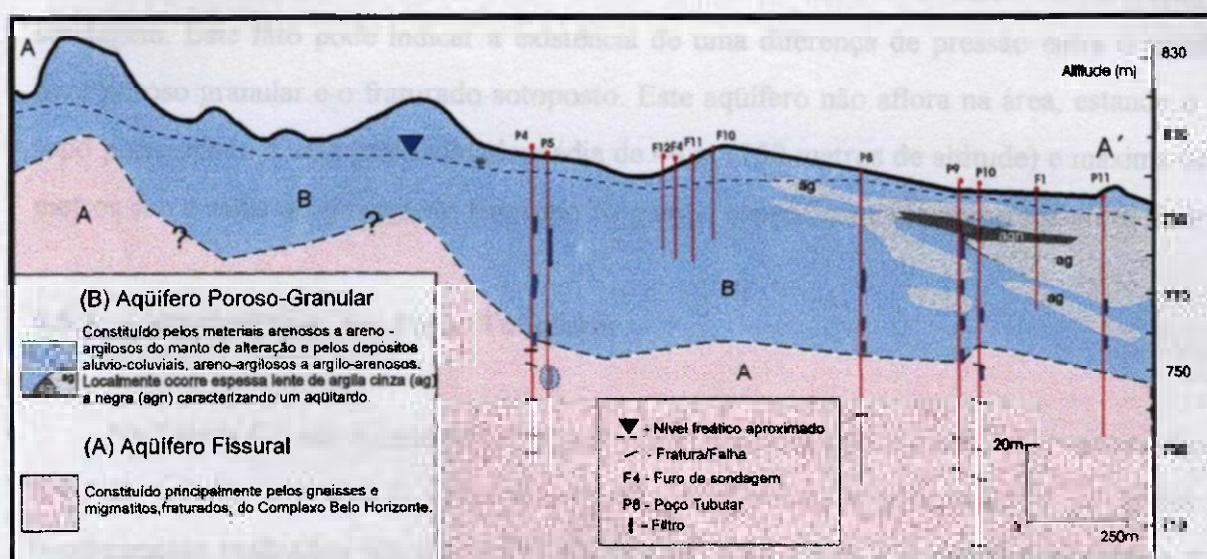


Figura 6.11: Seção geológica/hidrogeológica longitudinal ao córrego do Engenho Nogueira.

A porção mais argilosa dos depósitos aluviais, característica dos sedimentos de várzea, possuem maior presença a jusante da área de estudo, no extremo norte, conforme pode ser visto na Figura 6.11. Esta zona argilosa possui 20 metros de espessura máxima (poço P11), apresentando-se geralmente recoberta pelos depósitos colúviais e por material de aterro. Como possui baixa permeabilidade, dificulta a infiltração da água, proporcionando frequentes inundações no local na época das chuvas.

Aquífero Fissural

O Substrato Cristalino São, composto pelas litologias do Complexo Belo Horizonte, ainda livres da ação intempérica, constituem um aquífero do tipo fissural, sotoposto ao poroso

granular. A existência de uma zona de fraqueza no embasamento cristalino, especificamente sob a calha do córrego do Engenho Nogueira, foi corroborada pela presença de fraturas abertas e saturadas em água, freqüentemente interceptadas durante a perfuração dos poços P4, P5, P8, P9, P10 e P11. As posições aproximadas destas fraturas estão mostradas nas Figuras 6.4 e 6.11, onde pode-se observar a presença de algumas delas até 40 m dentro do aquífero fissural. Com base no arcabouço geológico-estrutural da área (vide Item 6.1), tudo indica que as principais fraturas que ocorrem no local têm direções preferenciais norte-sul e sudoeste-nordeste.

Durante a perfuração dos poços tubulares observou-se que no momento em que a sonda alcançava uma fratura saturada, ocorria uma oscilação no nível da água na tubulação de sondagem. Este fato pode indicar a existência de uma diferença de pressão entre o aquífero livre poroso granular e o fraturado sotoposto. Este aquífero não aflora na área, estando o seu topo posicionado a uma profundidade média de 44 m (750 metros de altitude) e máxima de 50 metros sob a calha do córrego do Engenho Nogueira, especificamente no centro-norte da área.

6.5.3 - Características dos Poços Tubulares

Na Tabela 6.5 são apresentados alguns parâmetros dos poços tubulares inventariados na área de estudo. Teve-se a oportunidade de acompanhar a perfuração e os testes de bombeamento realizados nos poços P4, P5, P8, P9, P10 e P11. Os dados referentes a estes poços, e que constam da Tabela 6.5, foram obtidos diretamente, ou foram calculados, a partir das informações contidas nos boletins de sondagem emitidos pela Equipe Poços (1995a, 1995b, 1995c, 1995d, 1995e, 1995f). Estes poços foram perfurados pelo método a percussão e receberam revestimentos de tubos de aço galvanizados nas partes superiores, onde são encontradas as rochas inconsistentes do manto de intemperismo e dos depósitos aluvio-colúviais. Nas partes mais profundas, onde ocorrem as rochas duras e consolidadas do aquífero fissural, eles não foram revestidos. O diâmetro final destes poços foi de 6 polegadas, aproximadamente 15 cm. Nas passagens mais arenosas do aquífero poroso granular, acoplou-se aos revestimentos filtros espiralados e galvanizados, com aberturas de 0,75 mm, visando captar a água subterrânea nestes intervalos (vide Apêndice E, Foto 13). Como pré-filtro empregou-se areia selecionada, arredondada, com granulometria variando de 2 a 4 mm. Em todos estes poços, cimentou-se o intervalo compreendido entre os 0,50 m e 10-20 m de

profundidade. No Apêndice C apresenta-se alguns dados construtivos sobre cada um destes poços.

As informações referentes aos poços P0, P1, P2, P6 e P7 foram resgatadas de documentos internos da UFMG: Minasonda (1969), Minasonda (1970), Chalfoun (1973) e Ennes (1973). Exclusivamente, em relação ao poço P6, seus dados de vazão e rebaixamento, utilizados nesta dissertação, foram obtidos junto à Hidromig (1992). O poço P3 teve alguma de suas características levantadas em um relatório interno da Nuclebrás (1979), embora os dados provenientes do seu teste de bombeamento, o qual também teve-se a oportunidade de acompanhar, tenham sido obtidos da Hidropoços (1996). Os dados construtivos dos poços P0, P1, P2, P3, P6 e P7 são ausentes ou muito incompletos (vide Apêndice E, Foto 12).

Tabela 6.5: Parâmetros gerais dos poços tubulares.

Poços	Data do teste Bombeamento	Cota poço no terreno (m)	Profundidade final (m)	Nível estático (m)	Cota nível estático (m)	Nível dinâmico (m)	Rebaixamento (m)	Vazão de teste (l/s)	Vazão específica (l/s/m)	Espessura total aquífero granular (m)	Espessura saturada aquífero granular (m)
P0	30/09/70	817	60,00	6,60	810,40	12,00	5,40	16900	0,87	42,00	35,40
P1	12/12/69	806	80,00	1,70	804,30	28,00	26,30	8600	0,09	36,00	34,30
P2	20/12/73	808	92,00	4,00	804,00	61,50	57,50	7200	0,03	50,50	46,50
P3	28/09/95	821	80,00	8,10	812,90	21,94	13,84	12200	0,24	36,00	27,90
P4	06/12/95	808	80,00	8,00	800,00	41,28	33,28	24012	0,20	49,00	41,00
P5	29/09/95	807	91,00	8,70	798,30	48,22	39,52	4320	0,03	50,00	41,30
P6	01/04/92	806	80,00	3,00	803,00	22,00	19,00	19000	0,28	*	*
P7	03/12/73	806	79,00	2,90	803,10	52,59	49,69	8600	0,05	*	*
P8	30/12/95	802	80,00	8,00	794,00	34,11	26,11	21996	0,23	46,00	38,00
P9	08/11/95	800	80,00	6,09	793,91	44,21	38,12	9108	0,07	48,00	41,91
P10	13/09/95	799	100,00	8,20	790,80	30,00	21,80	10000	0,13	40,00	31,80
P11	06/10/95	794	60,00	3,28	790,72	40,24	36,96	7920	0,06	44,00	40,72

Na Tabela 6.5, a coluna “Espessura total aquífero granular” corresponde à espessura total da camada hidrogeológica constituída pelo material inconsolidado, englobando as zonas saturada e não saturada. A coluna “Espessura saturada aquífero granular” refere-se apenas à espessura da zona saturada propriamente dita, ou seja, a espessura total menos a profundidade do nível estático medida no momento do teste de bombeamento.

Promoveu-se uma análise estatística de algumas características dos poços tubulares, que constam da Tabela 6.5, e cujos resultados podem ser vistos na Tabela 6.6. Observa-se, nesta Tabela, que a profundidade média destes poços está em torno dos 80 m, indicando que estes não se aprofundaram muito no aquífero fissural, cujo limite superior encontra-se a cerca de 44,00 m de profundidade. As profundidades dos níveis estáticos nos poços, os quais definem o limite superior da superfície potenciométrica do sistema aquífero, variam de 1,70 m a 8,70 m, com média de 5,71 m. Estes valores vêm ratificar o caráter pouco profundo do topo da zona saturada. A espessura média saturada do aquífero poroso está em torno dos 38 m.

Tabela 6.6: Análise estatística dos dados dos poços tubulares

Análises	Profundidade final (m)	Nível estático (m)	Cota N. Esta. (m)	Nível dinâmico (m)	Rebaixamento (m)	Vazão de teste (l/h)	Vazão específica (l/s/m)	Espessura total aquífero granular (m)	Espessura saturada aquífero granular (m)
Média	80,17	5,71	800,45	36,64	30,63	12488	0,19	44,15	37,88
Desvio padrão	11,05	2,46	6,90	13,72	14,25	6114	0,22	5,21	5,25
Varição	40,00	7,00	22,18	49,50	52,10	19692	0,84	14,50	18,60
Mínimo	60,00	1,70	790,72	12,00	5,40	4320	0,03	36,00	27,90
Máximo	100,00	8,70	812,90	61,50	57,50	24012	0,87	50,50	46,50
No. de amostras	12	12	12	12	12	12	12	10	10

Ainda segundo a Tabela 6.6, os valores obtidos para o rebaixamento apresentaram uma variação muito grande, da ordem de 52 m. O maior valor de rebaixamento encontrado foi de 57,50 m, e o menor de 5,40 m, enquanto o valor médio foi de 30,63 m. As vazões de teste oscilaram entre 4320 l/h (4,3 m³/h) e 24012 l/h (24,0 m³/h), com a média em torno de 12488 l/h (12,5 m³/h). As vazões específicas apresentaram um valor médio de 0,19 l/s/m, com máxima de 0,87 e mínima de 0,03 l/s/m.

Finalmente, considerando um rebaixamento médio da ordem de 31 m, e vazões específicas média de 0,19 l/s/m, e máxima de 0,87 l/s/m, um poço com estas características produziria, respectivamente, 21,2 m³ e 97,1 m³ de água por hora.

6.5.4 - Parâmetros Hidrodinâmicos

Como já foi mencionado anteriormente, teve-se a oportunidade de acompanhar os testes de bombeamento realizados nos poços P3, P4, P5, P8, P9, P10 e P11 (vide Apêndice E, Fotos 14 e 15). Durante estes testes, foram obtidos os dados de rebaixamento e recuperação dos níveis da água nos poços, conforme mostrado nas Tabelas 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13. Estas tabelas foram elaboradas, para cada um dos poços, a partir das informações dos testes de bombeamento, que constam dos boletins de sondagem emitidos pela Hidropoços (1996) e Equipoços (1995a, 1995b, 1995c, 1995d, 1995e, 1995f), e foram utilizadas no cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos. De forma geral, empregou-se nestes testes o chamado ensaio em poço único, no qual os dados de rebaixamento e da recuperação são medidos no próprio poço bombeado. Apenas no caso do teste realizado no poço P4, pôde-se efetuar medidas tanto no poço bombeado (P4) como num poço de observação, poço P5.

Ressalta-se que, embora se tenha tido acesso a alguns dados de rebaixamento e recuperação, referentes aos poços P0, P1, P2, P6 e P7, optou-se por não utilizá-los no cálculo

dos parâmetros hidrodinâmicos, devido às incertezas quanto aos critérios operacionais empregados nestes ensaios de bombeamento.

Para o cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos, empregou-se os métodos da Recuperação de Theis, para os ensaios em poço único, e o de Neuman, para o ensaio com poço de observação. Utilizou-se o programa de computador *Infinite Extent* (Starpoint Software, 1995) para auxiliar na aplicação destas metodologias, cujos respectivos procedimentos de cálculo encontram-se descritos no Capítulo 3.

Tabela 6.7: Teste de bombeamento no poço P3.

TESTE DE BOMBEAMENTO							
Poço bombeado :	P3		Vazão de teste (l/s):	3,38			
Local :	CDTN/CNEN		Vazão média (l/s):	3,38			
Nível Estático (m) :	8,10		Profundidade final do poço (m):	80,00			
Nível Dinâmico (m) :	21,94		Tempo Bombeamento (min) :	1440			
Espessura saturada do			Tempo de recuperação (min) :	18			
Aqüífero poroso (m):	26,90		Raio do poço (cm) :	7,62			
Poço de Observação :	Não houve		Distância ao poço Bombeado (m) :				
Local :			Profundidade final do poço (m):				
Nível Estático :			Tempo Bombeamento (min) :				
Nível Dinâmico :							
Ensaio no Poço Bombeado							
TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	Vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	Vazão (l/s)
1	6,13	14,23		720	13,70	21,80	3,38
2	7,80	15,90		750	12,99	21,09	3,38
3	8,70	16,80		780	13,56	21,66	3,38
4	9,20	17,30		810	13,00	21,10	3,38
5	9,59	17,69		840	13,37	21,47	3,38
6	9,75	17,85		870	13,55	21,65	3,38
8	10,13	18,23		900	13,64	21,74	3,38
10	10,43	18,53		930	13,46	21,56	3,38
12	10,59	18,69		960	13,28	21,38	3,38
14	10,76	18,86		990	13,36	21,46	3,38
16	10,90	19,00		1020	13,62	21,72	3,38
18	11,01	19,11		1050	13,47	21,57	3,38
20	11,08	19,18	3,56	1080	13,70	21,80	3,38
25	11,22	19,32	3,56	1110	13,71	21,81	3,38
30	11,25	19,35	3,56	1140	13,47	21,57	3,38
40	11,45	19,55	3,56	1170	13,63	21,73	3,38
60	11,63	19,73	3,44	1200	13,47	21,57	3,38
90	12,18	20,28	3,44	1230	13,58	21,68	3,38
120	11,99	20,09	3,44	1260	13,73	21,83	3,38
150	12,06	20,16	3,44	1290	13,70	21,80	3,38
180	12,14	20,24	3,44	1320	13,58	21,68	3,38
210	12,20	20,30	3,44	1350	13,36	21,46	3,38
240	12,28	20,38	3,44	1380	13,44	21,54	3,38
270	12,32	20,42	3,44	1410	13,66	21,76	3,38
300	12,36	20,46	3,44	1440	13,84	21,94	3,38
330	12,38	20,48	3,44	1441	8,55	16,65	
360	12,40	20,50	3,44	1442	6,56	14,66	
390	12,44	20,54	3,38	1443	5,22	13,32	
420	12,48	20,58	3,38	1444	4,90	13,00	
450	12,46	20,56	3,38	1445	4,16	12,26	
480	12,50	20,60	3,38	1446	3,74	11,84	
510	12,62	20,72	3,38	1448	3,14	11,24	
540	12,74	20,84	3,38	1450	2,72	10,82	
570	12,83	20,93	3,38	1452	2,38	10,48	
600	12,95	21,05	3,38	1454	2,03	10,13	
630	13,33	21,43	3,38	1456	1,76	9,86	
660	13,51	21,61	3,38	1458	1,41	9,51	
690	13,44	21,54	3,38				

Tabela 6.8: Teste de bombeamento no poço P4.

TESTE DE BOMBEAMENTO					
Poço bombeado :	P4		Vazão de teste (l/s):	6,67	
Local :	Campus da UFMG		Vazão média (l/s):	6,93	
Nível Estático (m) :	8,00		Profundidade final do poço (m):	80,00	
Nível Dinâmico (m) :	41,28		Tempo Bombeamento (min) :	1440	
Espessura saturada do			Tempo de recuperação (min) :	240	
Aquífero poroso (m):	41,00		Raio do poço (cm) :	7,62	
Poço de Observação :	P5		Distância ao poço Bombeado (m) :	38,00	
Local :	Campus UFMG		Profundidade final do poço (m):	91,00	
Nível Estático (m) :	7,89				
Nível Dinâmico (m) :	17,48				
Ensaio no Poço Bombeado			Poço P4P5 (Obsevação)		
TEMPO	REBAIX.	N. DINAMICO	vazão	REBAIX.	N. DINAMICO
(min)	(m)	(m)	(l/s)	(m)	(m)
1	4,34	12,34	7,33	0,00	7,89
2	6,93	14,93	7,33	0,00	7,89
3	8,57	16,57	7,33	0,00	7,89
4	9,95	17,95	7,33	0,00	7,89
5	10,73	18,73	7,33	0,03	7,92
6	11,87	19,87	7,33	0,07	7,96
8	13,28	21,28	7,33	0,12	8,01
10	14,59	22,59	7,33	0,23	8,12
12	15,37	23,37	7,33	0,35	8,24
14	16,53	24,53	7,33	0,48	8,37
16	17,37	25,37	7,33	0,62	8,51
18	18,03	26,03	7,33	0,76	8,65
20	18,68	26,68	7,33	0,89	8,78
25	19,99	27,99	7,33	1,24	9,13
30	21,07	29,07	7,33	1,56	9,45
40	22,80	30,80	7,10	2,10	9,99
60	24,74	32,74	7,10	2,99	10,88
90	26,64	34,64	7,10	3,98	11,87
120	27,92	35,92	7,10	4,72	12,61
150	28,93	36,93	7,10	5,31	13,20
180	29,06	37,06	7,10	5,78	13,67
210	29,46	37,46	7,10	6,15	14,04
240	29,99	37,99	7,10	6,47	14,36
270	30,36	38,36	7,10	6,79	14,68
300	30,85	38,85	7,10	7,11	15,00
330	31,11	39,11	7,10	7,43	15,32
360	31,41	39,41	7,10	7,75	15,64
390	31,70	39,70	7,10	8,09	15,98
420	31,90	39,90	7,10	8,33	16,22
450	31,90	39,90	7,10	8,37	16,26
480	31,90	39,90	7,10	8,41	16,30
510	31,95	39,95	7,10	8,45	16,34
540	32,02	40,02	7,10	8,49	16,38
570	32,09	40,09	7,10	8,53	16,42
600	32,16	40,16	7,10	8,57	16,46
630	32,21	40,21	7,10	8,61	16,50
660	32,26	40,26	7,10	8,65	16,54
690	32,31	40,31	7,10	8,71	16,60
720	32,51	40,51	6,88	8,75	16,64
750	32,64	40,64	6,88	8,79	16,68

Tabela 6.8:(continuação)

Ensaio no Poço Bombeado			Poço P4P5 (Obsevação)		
TEMPO	REBAIX	N. DINÂMICO	vazão	REBAIX	N. DINÂMICO
(min)	(m)	(m)	(l/s)	(m)	(m)
780	32.73	40.73	6.88	8.83	16.72
810	32.80	40.80	6.88	8.87	16.76
840	32.88	40.88	6.88	8.91	16.80
870	32.93	40.93	6.88	8.95	16.84
900	32.99	40.99	6.88	8.98	16.87
930	33.04	41.04	6.88	9.01	16.90
960	33.28	41.28	6.88	9.04	16.93
990	33.28	41.28	6.67	9.13	17.02
1020	33.28	41.28	6.67	9.15	17.04
1050	33.28	41.28	6.67	9.16	17.05
1080	33.28	41.28	6.67	9.19	17.08
1110	33.28	41.28	6.67	9.22	17.11
1140	33.28	41.28	6.67	9.25	17.14
1170	33.28	41.28	6.67	9.29	17.18
1200	33.28	41.28	6.67	9.31	17.20
1230	33.28	41.28	6.67	9.34	17.23
1260	33.28	41.28	6.67	9.44	17.33
1290	33.28	41.28	6.67	9.46	17.35
1320	33.28	41.28	6.67	9.49	17.38
1350	33.28	41.28	6.67	9.58	17.47
1380	33.28	41.28	6.67	9.58	17.47
1410	33.28	41.28	6.67	9.59	17.48
1440	33.28	41.28	6.67	9.59	17.48
1441	25.43	33.43		9.59	17.48
1442	21.64	29.64		9.59	17.48
1443	18.83	26.83		9.59	17.48
1444	15.55	23.55		9.59	17.48
1445	13.38	21.38		9.59	17.48
1446	12.16	20.16		9.59	17.48
1448	10.91	18.91		9.53	17.42
1450	10.37	18.37		9.33	17.22
1452	9.83	17.83		9.41	17.30
1454	9.23	17.23		9.35	17.24
1456	8.62	16.62		9.28	17.17
1458	8.02	16.02		9.20	17.09
1460	7.49	15.49		9.10	16.99
1465	6.85	14.85		8.92	16.81
1470	6.39	14.39		8.74	16.63
1480	5.94	13.94		8.41	16.30
1500	5.52	13.52		7.70	15.59
1530	4.79	12.79		6.48	14.37
1560	3.93	11.93		5.98	13.87
1590	3.50	11.50		5.32	13.21
1620	3.08	11.08		4.78	12.67
1650	2.38	10.38		4.38	12.27
1680	1.79	9.79		4.08	11.97

Tabela 6.9: Teste de bombeamento no poço P5.

TESTE DE BOMBEAMENTO							
Poço bombeado :	P5			Vazão de teste (l/s):	1,20		
Local :	Campus da UFMG			Vazão média (l/s):	1,25		
Nível Estático (m) :	8,70			Profundidade final do poço (m):	91,00		
Nível Dinâmico (m) :	48,22			Tempo Bombeamento (min) :	1440		
Espessura saturada do				Tempo de recuperação (min) :	60		
Aquífero poroso (m) :	41,30			Raio do poço (cm)	7,62		
Poço de Observação :	Não houve			Distância ao poço Bombeado (m) :			
Local :				Profundidade final do poço (m):			
Nível Estático :				Tempo Bombeamento (min) :			
Nível Dinâmico :							
Ensaio no Poço Bombeado							
TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)
1	6,02	14,72	1,62	780	39,43	48,13	1,20
2	9,10	17,80	1,62	810	39,48	48,18	1,20
3	10,72	19,42	1,62	840	39,50	48,20	1,20
4	12,56	21,26	1,62	870	39,52	48,22	1,20
5	14,76	23,46	1,62	900	39,52	48,22	1,20
6	17,00	25,70	1,62	930	39,52	48,22	1,20
8	20,38	29,08	1,62	960	39,52	48,22	1,20
10	23,62	32,32	1,62	990	39,52	48,22	1,20
12	26,19	34,89	1,62	1020	39,52	48,22	1,20
14	28,37	37,07	1,62	1050	39,52	48,22	1,20
16	30,01	38,71	1,62	1080	39,52	48,22	1,20
18	31,54	40,24	1,62	1110	39,52	48,22	1,20
20	32,54	41,24	1,62	1140	39,52	48,22	1,20
25	34,04	42,74	1,62	1170	39,52	48,22	1,20
30	34,74	43,44	1,62	1200	39,52	48,22	1,20
40	34,76	43,46	1,62	1230	39,52	48,22	1,20
60	34,78	43,48	1,62	1260	39,52	48,22	1,20
90	35,19	43,89	1,41	1290	39,52	48,22	1,20
120	35,33	44,03	1,41	1320	39,52	48,22	1,20
150	35,62	44,32	1,41	1350	39,52	48,22	1,20
180	35,81	44,51	1,41	1380	39,52	48,22	1,20
210	36,09	44,79	1,22	1410	39,52	48,22	1,20
240	36,26	44,96	1,22	1440	39,52	48,22	1,20
270	37,22	45,92	1,22	1441	35,42	44,12	
300	37,52	46,22	1,22	1442	31,55	40,25	
330	37,81	46,51	1,22	1443	28,05	36,75	
360	38,24	46,94	1,22	1444	24,71	33,41	
390	38,35	47,05	1,22	1445	21,59	30,29	
420	38,56	47,26	1,22	1446	18,88	27,58	
450	38,66	47,36	1,20	1448	14,29	22,99	
480	38,97	47,67	1,20	1450	11,30	20,00	
510	39,01	47,71	1,20	1452	9,39	18,09	
540	39,05	47,75	1,20	1454	7,42	16,12	
570	39,10	47,80	1,20	1456	6,09	14,79	
600	39,19	47,89	1,20	1458	5,19	13,89	
630	39,20	47,90	1,20	1460	4,58	13,28	
660	39,23	47,93	1,20	1465	3,61	12,31	
690	39,29	47,99	1,20	1470	3,18	11,88	
720	39,32	48,02	1,20	1480	2,82	11,52	
750	39,41	48,11	1,20	1500	2,21	10,91	

Tabela 6.10: Teste de bombeamento no poço P8.

TESTE DE BOMBEAMENTO							
Poço bombeado :	P8		Vazão de teste (l/s):	6,11			
Local :	Campus da UFMG		Vazão média (l/s):	6,22			
Nível Estático (m) :	8,00		Profundidade final do poço (m):	80,00			
Nível Dinâmico (m) :	34,11		Tempo Bombeamento (min) :	1440			
Espessura saturada do			Tempo de recuperação (min) :	180			
Aqüífero poroso (m) :	38,00		Raio do poço (cm) :	7,62			
Poço de Observação :	Não houve		Distância ao poço Bombeado (m) :				
Local :			Profundidade final do poço (m):				
Nível Estático :			Tempo Bombeamento (min) :				
Nível Dinâmico :							
Ensaio no Poço Bombeado							
TEMPO (min)	REBAIX (m)	N. DINÂMICO (m)	Vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX (m)	N. DINÂMICO (m)	Vazão (l/s)
1	11,88	19,88	6,88	840	26,11	34,11	6,11
2	15,16	23,16	6,67	870	26,11	34,11	6,11
3	16,91	24,91	6,67	900	26,11	34,11	6,11
4	17,83	25,83	6,67	930	26,11	34,11	6,11
5	18,68	26,68	6,67	960	26,11	34,11	6,11
6	19,06	27,06	6,67	990	26,11	34,11	6,11
8	19,65	27,65	6,67	1020	26,11	34,11	6,11
10	20,49	28,49	6,67	1050	26,11	34,11	6,11
12	20,90	28,90	6,67	1080	26,11	34,11	6,11
14	21,20	29,20	6,67	1110	26,11	34,11	6,11
16	21,61	29,61	6,67	1140	26,11	34,11	6,11
18	21,99	29,99	6,67	1170	26,11	34,11	6,11
20	22,70	30,70	6,67	1200	26,11	34,11	6,11
25	23,12	31,12	6,67	1230	26,11	34,11	6,11
30	23,61	31,61	6,67	1260	26,11	34,11	6,11
40	23,68	31,68	6,67	1290	26,11	34,11	6,11
60	24,16	32,16	6,67	1320	26,11	34,11	6,11
90	24,49	32,49	6,67	1350	26,11	34,11	6,11
120	25,12	33,12	6,67	1380	26,11	34,11	6,11
150	25,55	33,55	6,47	1410	26,11	34,11	6,11
180	26,11	34,11	6,47	1440	26,11	34,11	6,11
210	26,11	34,11	6,47	1441	10,89	18,89	
240	26,11	34,11	6,29	1442	9,39	17,39	
270	26,11	34,11	6,29	1443	8,85	16,85	
300	26,11	34,11	6,29	1444	8,58	16,58	
330	26,11	34,11	6,29	1445	8,23	16,23	
360	26,11	34,11	6,29	1446	8,11	16,11	
390	26,11	34,11	6,29	1448	7,88	15,88	
420	26,11	34,11	6,29	1450	7,70	15,70	
450	26,11	34,11	6,29	1452	7,49	15,49	
480	26,11	34,11	6,29	1454	7,37	15,37	
510	26,11	34,11	6,29	1456	7,24	15,24	
540	26,11	34,11	6,11	1458	7,18	15,18	
570	26,11	34,11	6,11	1460	7,01	15,01	
600	26,11	34,11	6,11	1465	6,79	14,79	
630	26,11	34,11	6,11	1470	6,44	14,44	
660	26,11	34,11	6,11	1480	6,14	14,14	
690	26,11	34,11	6,11	1500	5,42	13,42	
720	26,11	34,11	6,11	1530	4,89	12,89	
750	26,11	34,11	6,11	1560	4,43	12,43	
780	26,11	34,11	6,11	1590	4,12	12,12	
810	26,11	34,11	6,11	1620	3,97	11,97	

Tabela 6.11: Teste de bombeamento no poço P9.

TESTE DE BOMBEAMENTO			
Poço bombeado :	P9	Vazão de teste (l/s):	2,53
Local :	Campus da UFMG	Vazão média (l/s):	2,74
Nível Estático (m) :	6,09	Profundidade final do poço (m):	80,00
Nível Dinâmico (m) :	44,21	Tempo Bombeamento (min) :	1440
Espessura saturada do		Tempo de recuperação (min) :	90
Aqüífero poroso (m) :	41,91	Raio do poço (cm) :	7,62
Poço de Observação :	Não houve	Distância ao poço Bombeado (m) :	
Local :		Profundidade final do poço (m):	
Nível Estático :		Tempo Bombeamento (min) :	
Nível Dinâmico :			

Ensaio no Poço Bombeado

TEMPO (min)	REBAIX (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)
1	10,29	16,38		810	37,89	43,98	2,78
2	16,60	22,69		840	37,89	43,98	2,78
3	21,53	27,62		870	38,06	44,15	2,78
4	24,82	30,91		900	38,06	44,15	2,78
5	27,50	33,59		930	38,06	44,15	2,78
6	29,91	36,00		960	38,06	44,15	2,78
8	31,37	37,46		990	38,12	44,21	2,78
10	32,68	38,77	3,44	1020	38,12	44,21	2,65
12	34,37	40,46		1050	38,12	44,21	2,65
14	35,07	41,16		1080	38,12	44,21	2,65
16	35,29	41,38		1110	38,12	44,21	2,65
18	35,31	41,40		1140	38,12	44,21	2,65
20	35,32	41,41	3,19	1170	38,12	44,21	2,65
25	35,35	41,44		1200	38,12	44,21	2,65
30	35,82	41,91	3,14	1230	38,12	44,21	2,65
40	36,35	42,44	3,01	1260	38,12	44,21	2,65
60	36,59	42,68	3,01	1290	38,12	44,21	2,65
90	36,84	42,93	2,97	1320	38,12	44,21	2,65
120	37,03	43,12	2,89	1350	38,12	44,21	2,65
150	37,15	43,24	2,89	1380	38,12	44,21	2,53
180	37,27	43,36	2,86	1410	38,12	44,21	2,53
210	37,29	43,38	2,86	1440	38,12	44,21	2,53
240	37,32	43,41	2,82	1441	22,14	28,23	
270	37,35	43,44	2,82	1442	18,98	25,07	
300	37,38	43,47	2,82	1443	15,26	21,35	
330	37,40	43,49	2,82	1444	13,18	19,27	
360	37,44	43,53	2,82	1445	10,88	16,97	
390	37,49	43,58	2,82	1446	9,14	15,23	
420	37,56	43,65	2,82	1448	7,19	13,28	
450	37,66	43,75	2,82	1450	5,63	11,72	
480	37,69	43,78	2,82	1452	4,81	10,90	
510	37,73	43,82	2,82	1454	4,27	10,36	
540	37,76	43,85	2,82	1456	3,97	10,06	
570	37,78	43,87	2,82	1458	3,67	9,76	
600	37,80	43,89	2,82	1460	3,46	9,55	
630	37,80	43,89	2,78	1465	3,16	9,25	
660	37,80	43,89	2,78	1470	2,88	8,97	
690	37,80	43,89	2,78	1480	2,64	8,73	
720	37,89	43,98	2,78	1500	2,27	8,36	
750	37,89	43,98	2,78	1530	2,12	8,21	
780	37,89	43,98	2,78				

Tabela 6.12: Teste de bombeamento no poço P10.

TESTE DE BOMBEAMENTO							
Poço bombeado :	P10		Vazão de teste (l/s):	2,78			
Local :	Campus da UFMG		Vazão média (l/s):	2,78			
Nível Estático (m) :	8,20		Profundidade final do poço (m):	100,00			
Nível Dinâmico (m) :	30,00		Tempo Bombeamento (min) :	1440			
Espessura saturada do			Tempo de recuperação (min) :	720			
Aqüífero poroso (m) :	31,80		Raio do poço (cm)	7,62			
Poço de Observação :	Não houve		Distância ao poço Bombeado (m) :				
Local :			Profundidade final do poço (m):				
Nível Estático :			Tempo Bombeamento (min) :				
Nível Dinâmico :							
Ensaio no Poço Bombeado							
TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINÂMICO (m)	vazão (l/s)
1	9,80	18,00		1080	21,80	30,00	2,78
2	13,80	22,00		1110	21,80	30,00	2,78
3	14,80	23,00		1140	21,80	30,00	2,78
4	16,80	25,00		1170	21,80	30,00	2,78
5	16,95	25,15		1200	21,80	30,00	2,78
6	17,80	26,00		1230	21,80	30,00	2,78
8	18,10	26,30		1260	21,80	30,00	2,78
10	18,80	27,00		1290	21,80	30,00	2,78
12	19,80	28,00		1320	21,80	30,00	2,78
14	19,95	28,15		1350	21,80	30,00	2,78
16	20,10	28,30		1380	21,80	30,00	2,78
18	20,15	28,35	3,18	1410	21,80	30,00	2,78
20	20,16	28,36		1440	21,80	30,00	2,78
25	20,17	28,37		1441	19,12	27,32	
30	19,18	27,38		1442	13,87	22,07	
40	20,20	28,40		1443	11,89	20,09	
60	20,50	28,70		1444	9,95	18,15	
90	20,80	29,00	2,93	1445	8,98	17,18	
120	20,82	29,02	2,78	1446	7,21	15,41	
150	20,83	29,03	2,78	1448	6,94	15,14	
180	20,84	29,04	2,78	1450	6,09	14,29	
210	20,90	29,10	2,78	1452	5,51	13,71	
240	20,95	29,15	2,78	1454	5,10	13,30	
270	21,00	29,20	2,78	1456	4,55	12,75	
300	21,05	29,25	2,78	1458	4,33	12,53	
330	21,10	29,30	2,78	1460	4,07	12,27	
360	21,15	29,35	2,78	1465	3,67	11,87	
390	21,23	29,43	2,78	1470	3,33	11,53	
420	21,26	29,46	2,78	1480	2,89	11,09	
450	21,28	29,48	2,78	1500	2,32	10,52	
480	21,32	29,52	2,78	1530	1,95	10,15	
510	21,36	29,56	2,78	1560	1,69	9,89	
540	21,65	29,85	2,78	1590	1,45	9,65	
570	21,70	29,90	2,78	1620	1,35	9,55	
600	21,75	29,95	2,78	1650	1,24	9,44	
630	21,78	29,98	2,78	1680	1,14	9,34	
660	21,75	29,95	2,78	1710	1,06	9,26	
690	21,75	29,95	2,78	1740	0,99	9,19	
720	21,75	29,95	2,78	1770	0,91	9,11	
750	21,80	30,00	2,78	1800	0,84	9,04	
780	21,80	30,00	2,78	1830	0,77	8,97	
810	21,80	30,00	2,78	1860	0,66	8,86	
840	21,80	30,00	2,78	1890	0,61	8,81	
870	21,80	30,00	2,78	1920	0,55	8,75	
900	21,80	30,00	2,78	1950	0,53	8,73	
930	21,80	30,00	2,78	1980	0,44	8,64	
960	21,80	30,00	2,78	2010	0,33	8,53	
990	21,80	30,00	2,78	2040	0,22	8,42	
1020	21,80	30,00	2,78	2100	0,16	8,36	
1050	21,80	30,00	2,78	2160	0,00	8,20	

Tabela 6.13: Teste de bombeamento no poço P11.

TESTE DE BOMBEAMENTO			
Poço bombeado :	P11	Vazão de teste (l/s):	2,20
Local :	Campus da UFMG	Vazão média (l/s):	2,23
Nível Estático (m) :	3,28	Profundidade final do poço (m):	60,00
Nível Dinâmico (m) :	40,24	Tempo Bombeamento (min) :	1440
Espessura saturada do		Tempo de recuperação (min) :	240
Aquífero poroso (m) :	40,72	Raio do poço (cm) :	7,62
Poço de Observação :	Não houve	Distância ao poço Bombeado (m) :	
Local :		Profundidade final do poço (m):	
Nível Estático :		Tempo Bombeamento (min) :	
Nível Dinâmico :			

Ensaio no Poço Bombeado

TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINAMICO (m)	vazão (l/s)	TEMPO (min)	REBAIX. (m)	N. DINAMICO (m)	vazão (l/s)
1	6,78	10,06	2,44	870	36,96	40,24	2,20
2	10,46	13,74	2,44	900	36,96	40,24	2,20
3	13,25	16,53	2,44	930	36,96	40,24	2,20
4	15,47	18,75	2,44	960	36,96	40,24	2,20
5	17,05	20,33	2,44	990	36,96	40,24	2,20
6	18,47	21,75	2,44	1020	36,96	40,24	2,20
8	20,43	23,71	2,44	1050	36,96	40,24	2,20
10	21,89	25,17	2,44	1080	36,96	40,24	2,20
12	23,03	26,31	2,44	1110	36,96	40,24	2,20
14	23,99	27,27	2,39	1140	36,96	40,24	2,20
16	24,88	28,16	2,39	1170	36,96	40,24	2,20
18	25,73	29,01	2,39	1200	36,96	40,24	2,20
20	26,04	29,32	2,37	1230	36,96	40,24	2,20
25	27,59	30,87	2,37	1260	36,96	40,24	2,20
30	28,58	31,86	2,37	1290	36,96	40,24	2,20
40	29,89	33,17	2,37	1320	36,96	40,24	2,20
60	31,21	34,49	2,37	1350	36,96	40,24	2,20
90	32,61	35,89	2,37	1380	36,96	40,24	2,20
120	33,80	37,08	2,37	1410	36,96	40,24	2,20
150	34,26	37,54	2,37	1440	36,96	40,24	2,20
180	34,34	37,62	2,37	1441	30,03	33,31	
210	34,75	38,03	2,27	1442	25,73	29,01	
240	34,92	38,20	2,27	1443	23,73	27,01	
270	35,09	38,37	2,27	1444	22,85	26,13	
300	35,22	38,50	2,24	1445	21,46	24,74	
330	35,46	38,74	2,24	1446	19,76	23,04	
360	35,70	38,98	2,24	1448	17,80	21,08	
390	35,94	39,22	2,24	1450	16,68	19,96	
420	36,19	39,47	2,20	1452	15,68	18,96	
450	36,44	39,72	2,20	1454	14,80	18,08	
480	36,55	39,83	2,20	1456	14,05	17,33	
510	36,65	39,93	2,20	1458	13,26	16,54	
540	36,75	40,03	2,20	1460	12,97	16,25	
570	36,85	40,13	2,20	1465	11,72	15,00	
600	36,96	40,24	2,20	1470	11,20	14,48	
630	36,96	40,24	2,20	1480	10,20	13,48	
660	36,96	40,24	2,20	1500	8,94	12,22	
690	36,96	40,24	2,20	1530	8,21	11,49	
720	36,96	40,24	2,20	1560	7,96	11,24	
750	36,96	40,24	2,20	1590	7,74	11,02	
780	36,96	40,24	2,20	1620	7,60	10,88	
810	36,96	40,24	2,20	1650	7,47	10,75	
840	36,96	40,24	2,20	1680	7,39	10,67	

O método da Recuperação de Theis é um dos mais indicados para ensaios em poço único (Domenico & Schwartz, 1990), possibilitando o cálculo da transmissividade T através da Equação (3.15), e da condutividade hidráulica horizontal Kh , pela razão entre T e a espessura b da zona saturada.

Uma vez que o sistema aquífero local é constituído tanto por um meio poroso granular, de espessura saturada razoavelmente conhecida, e por um meio fraturado, sotoposto ao primeiro, e sobre o qual ainda é difícil estimar até que profundidade ocorrem fraturas/fissuras saturadas, chega-se a seguinte questão: Qual é o valor da espessura da zona saturada que deve ser utilizada nos cálculos dos parâmetros hidrodinâmicos? Embora os resultados obtidos nos testes de bombeamento, tais como os dados de rebaixamento x tempo e recuperação x tempo, reflitam as condições hidrodinâmicas dos dois aquíferos (poroso e fissural), como um sistema único em íntima comunicação hidráulica, concluiu-se, com base nas observações feitas durante a perfuração dos poços, que o aquífero poroso granular contribui mais significativamente na produção de água do que o aquífero fissural. Este fato trouxe subsídios necessários para a decisão em utilizar, ainda que de forma aproximada, a espessura saturada do aquífero poroso como sendo a espessura total da zona saturada b , utilizada no cálculo da condutividade hidráulica horizontal Kh , como também no de outros parâmetros, como será visto mais adiante, na aplicação do Método de Neuman.

Nas Figuras 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19, encontram-se os resultados gráficos da aplicação do método da Recuperação de Theis, para cada um dos poços tubulares. Estes resultados foram obtidos com o processamento dos dados de rebaixamento residual x tempo, contidos nas Tabelas 6.7 a 6.13. Pode-se observar, nestas Figuras, que os dados iniciais da recuperação não caem numa linha reta. Este fato é devido ao comportamento particular dos aquíferos livres nos momentos imediatos ao bombeamento cessar. Devido a esta particularidade, Neuman (1975) recomenda que sejam priorizados os dados mais tardios para o ajuste da reta, o que foi adotado nesta dissertação.

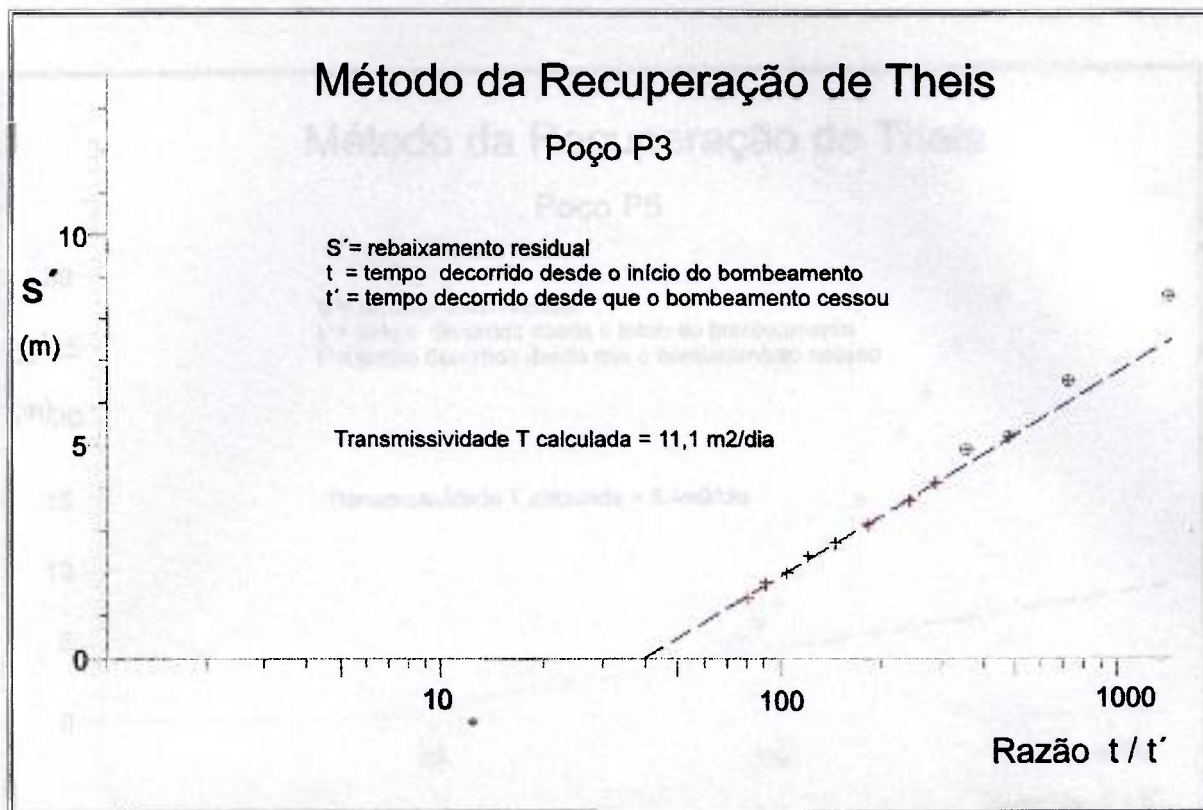


Figura 6.12: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P3.

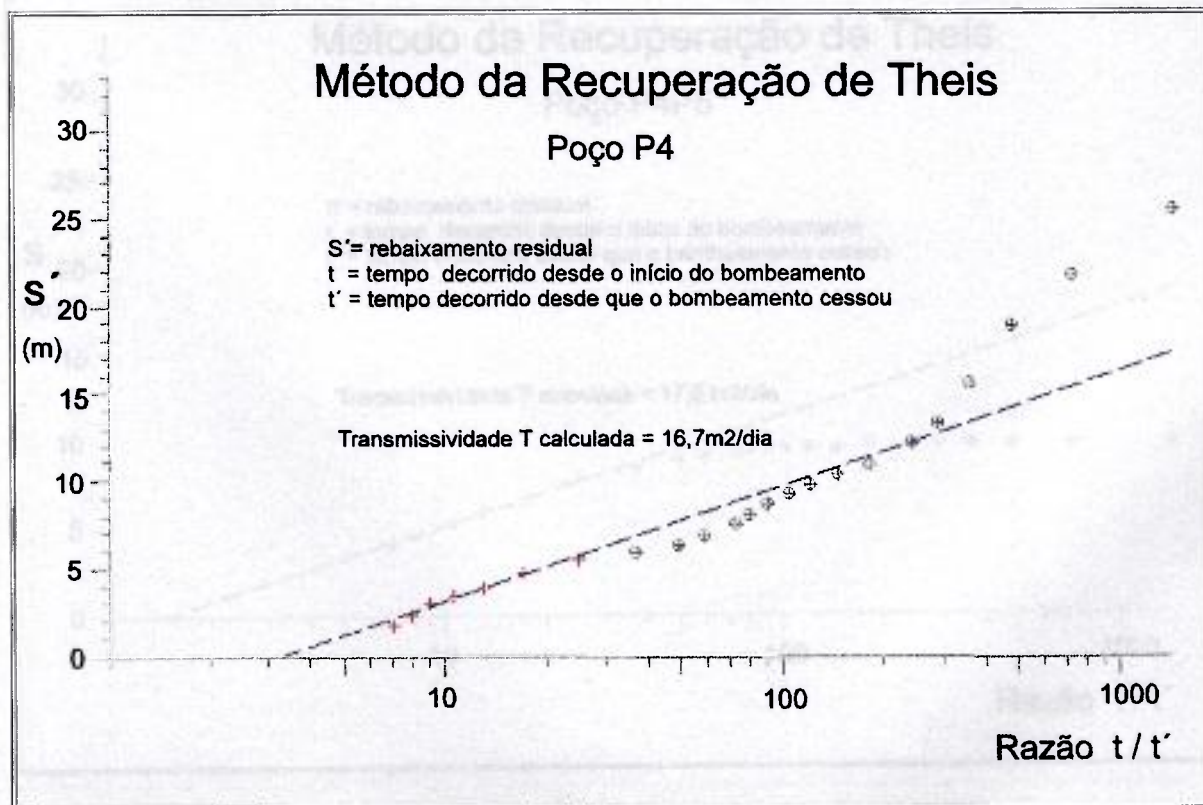


Figura 6.13: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P4.

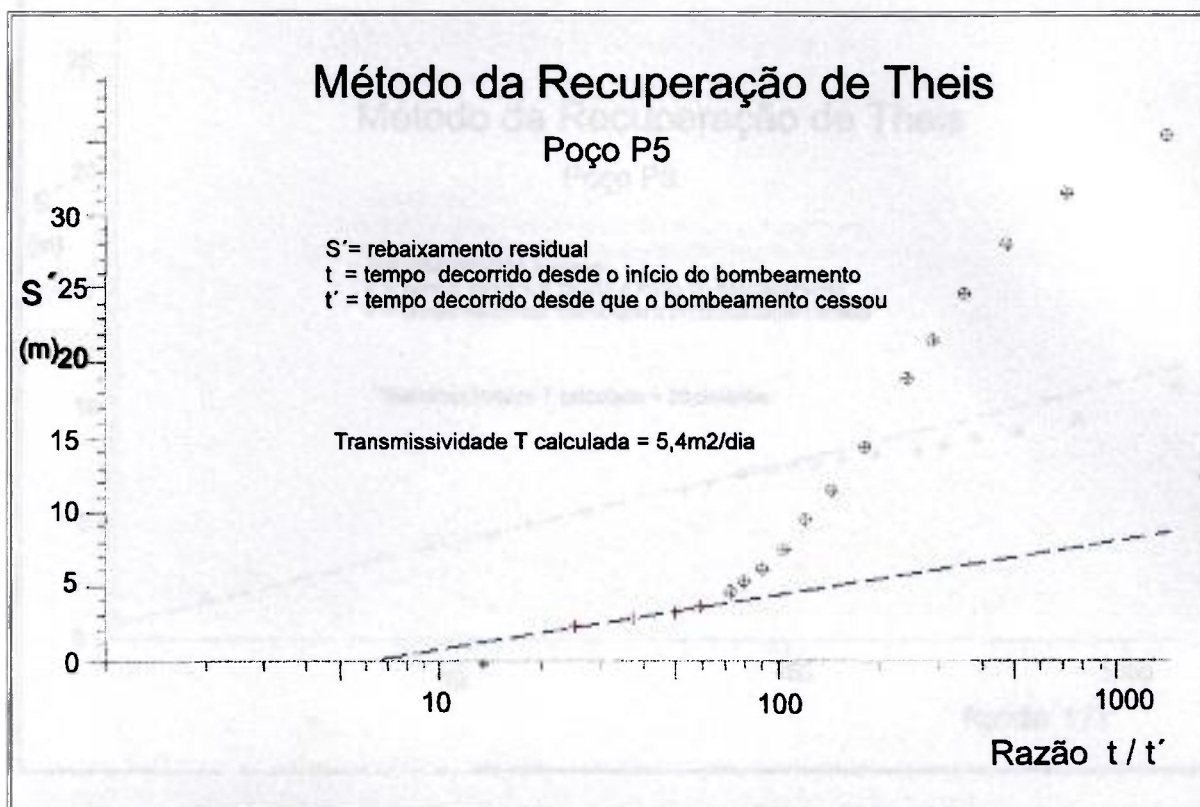


Figura 6.14: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P5.

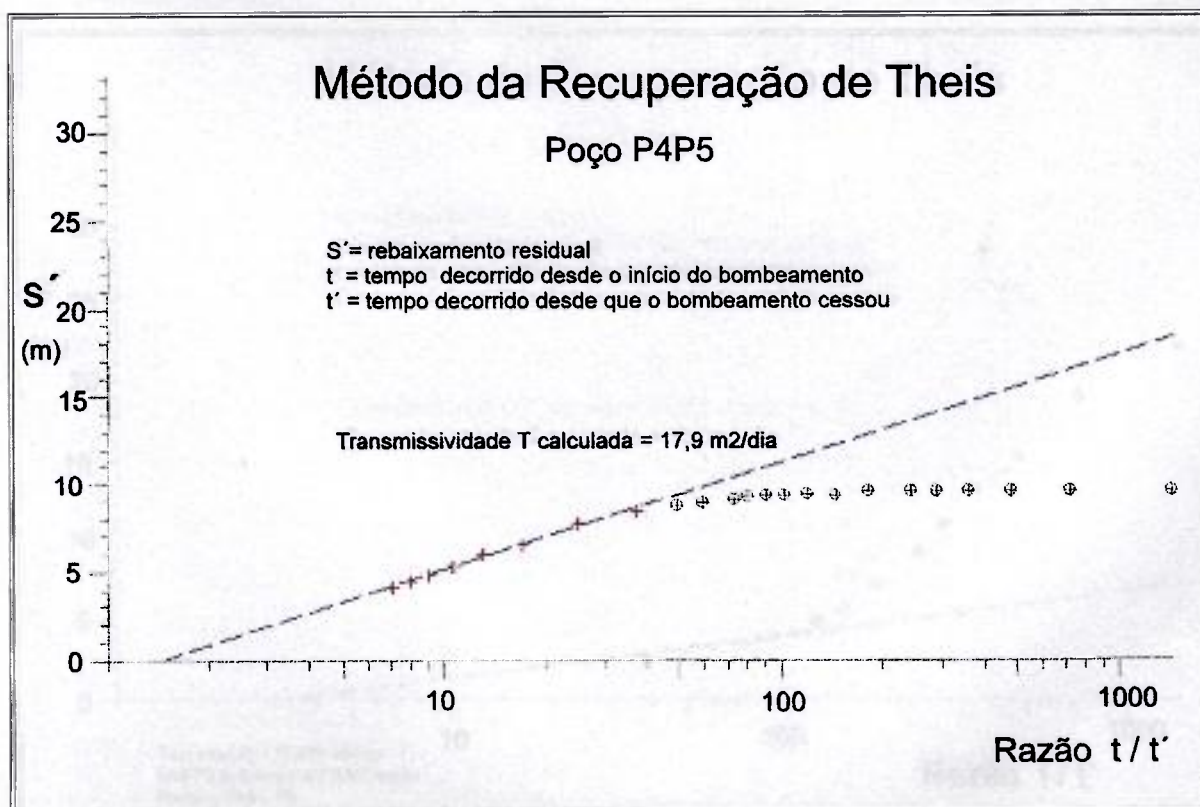


Figura 6.15: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Bombeamento no poço P4 e medições de rebaixamento no poço P5.

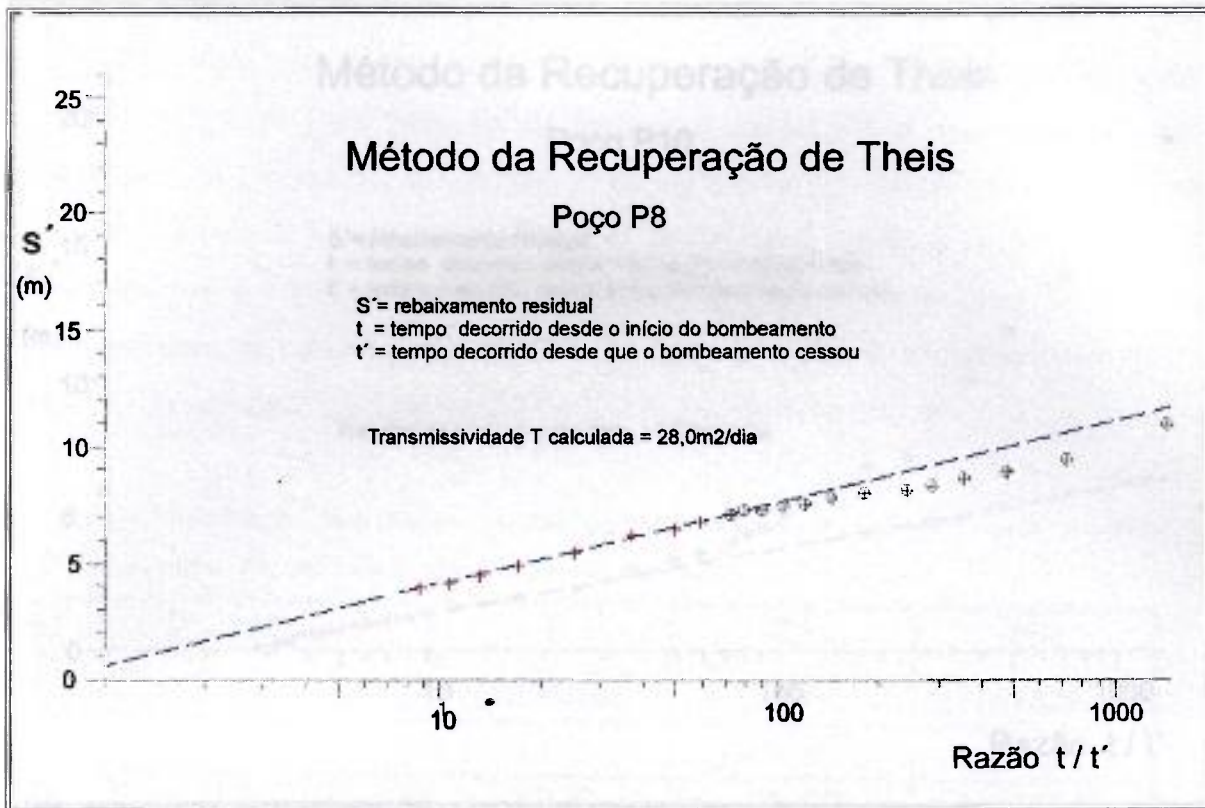


Figura 6.16: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P8.

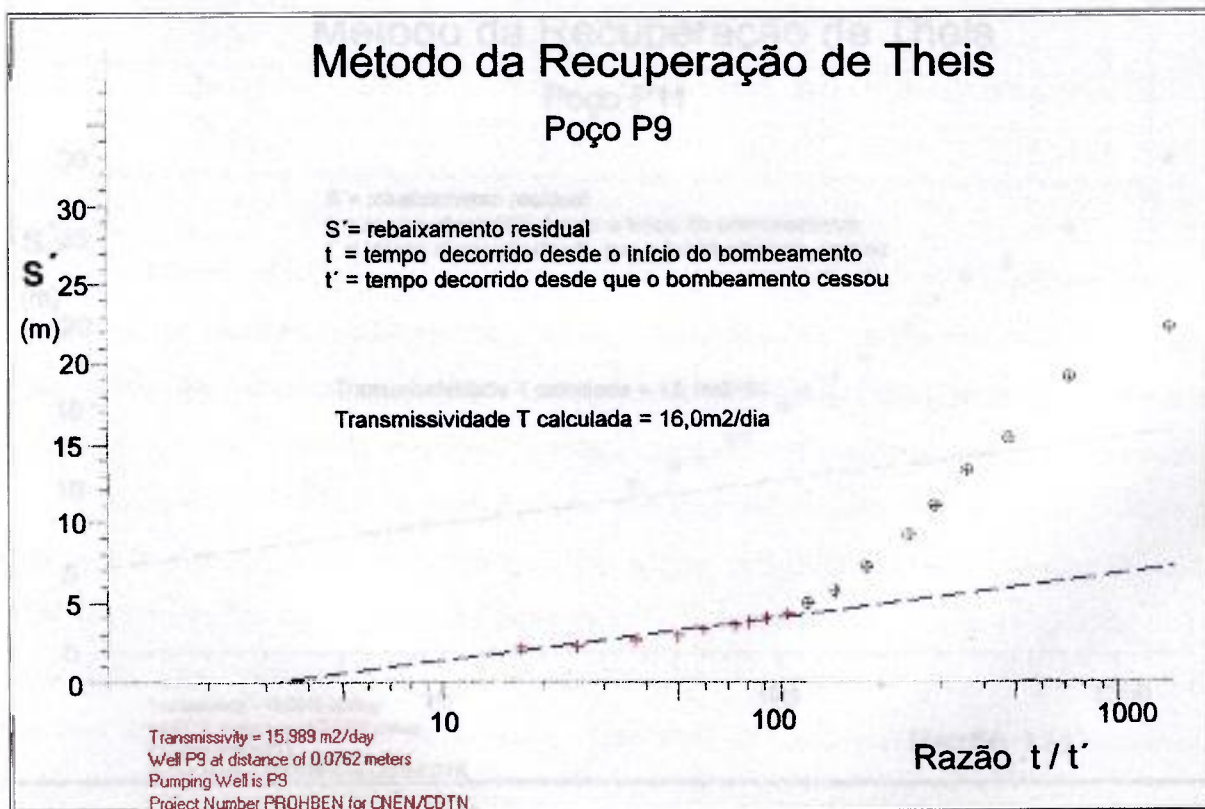


Figura 6.17: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P9.

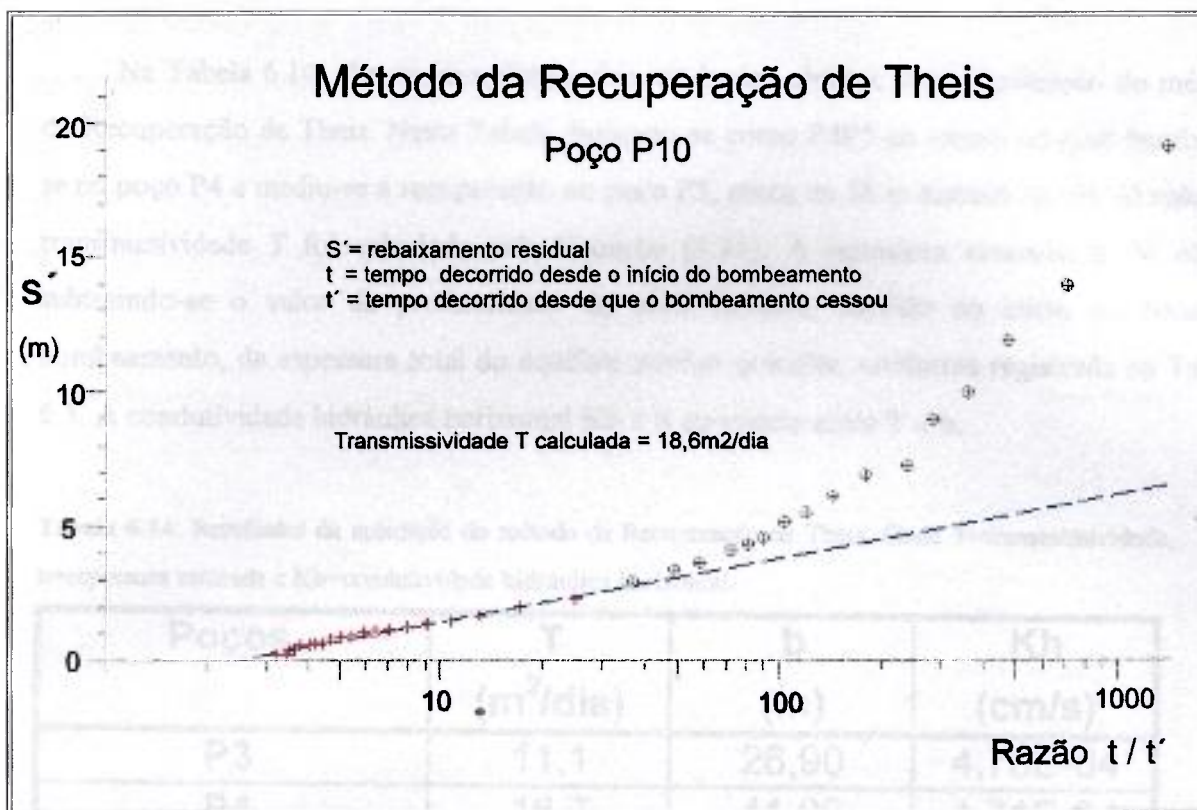


Figura 6.18: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P10.

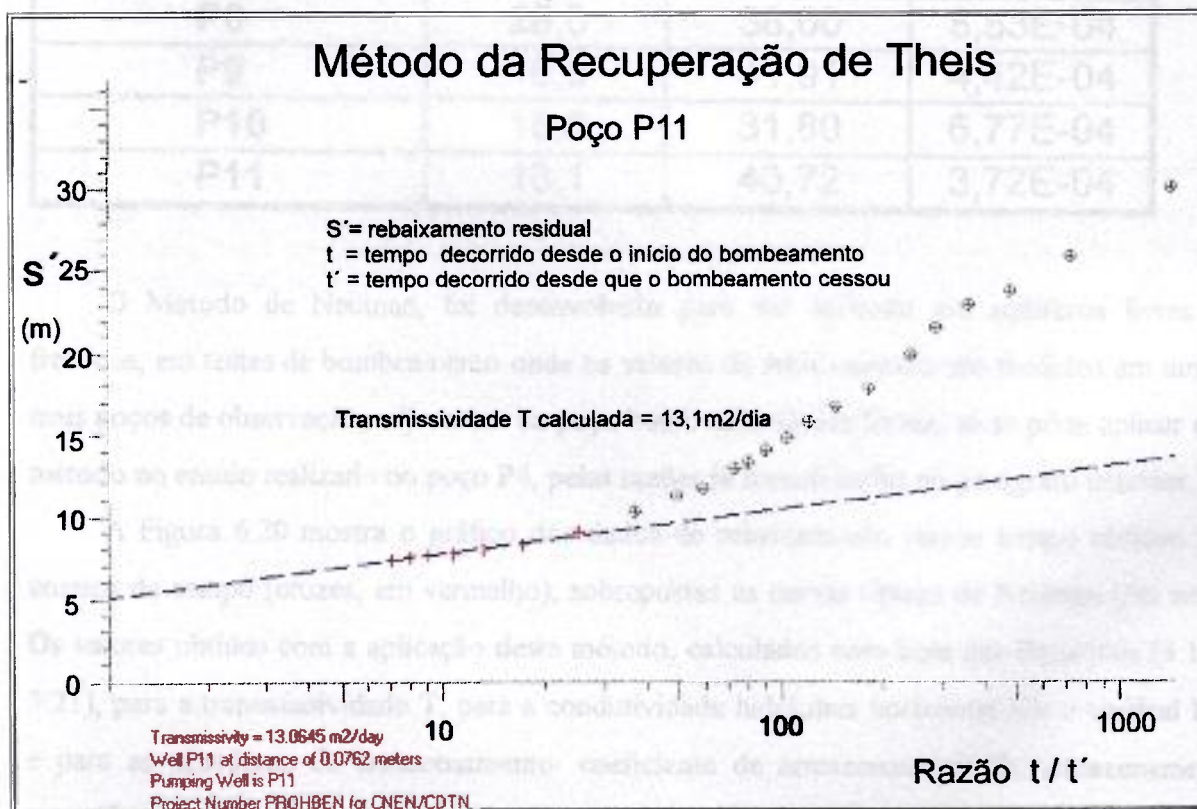


Figura 6.19: Resultado gráfico da aplicação do método da Recuperação de Theis. Poço P11.

Na Tabela 6.14, têm-se uma síntese dos resultados obtidos com a aplicação do método da Recuperação de Theis. Nesta Tabela designou-se como P4P5 ao ensaio no qual bombeou-se no poço P4 e mediu-se a recuperação no poço P5, cerca de 38 m distante de P4. O valor da transmissividade T foi calculado pela Equação (3.15). A espessura saturada b foi obtida subtraindo-se o valor da profundidade do nível estático, medido no início do teste de bombeamento, da espessura total do aquífero poroso granular, conforme registrada na Tabela 6.5. A condutividade hidráulica horizontal K_h é o quociente entre T e b .

Tabela 6.14: Resultados da aplicação do método da Recuperação de Theis. Onde T =transmissividade, b =espessura saturada e K_h =condutividade hidráulica horizontal.

Poços	T (m^2/dia)	b (m)	K_h (cm/s)
P3	11,1	26,90	4,78E-04
P4	16,7	41,00	4,71E-04
P4P5	17,9	41,00	5,05E-04
P5	5,4	41,30	1,51E-04
P8	28,0	38,00	8,53E-04
P9	16,0	41,91	4,42E-04
P10	18,6	31,80	6,77E-04
P11	13,1	40,72	3,72E-04

O Método de Neuman, foi desenvolvido para ser aplicado em aquíferos livres ou freáticos, em testes de bombeamento onde os valores de rebaixamento são medidos em um ou mais poços de observação, adjacentes ao poço bombeado. Dessa forma, só se pôde aplicar este método no ensaio realizado no poço P4, pelas razões já mencionadas no parágrafo anterior.

A Figura 6.20 mostra o gráfico dos dados de rebaixamento versus tempo obtidos nos ensaios de campo (cruzes, em vermelho), sobrepostas às curvas típicas de Neuman (em azul). Os valores obtidos com a aplicação deste método, calculados com base nas Equações (3.17 a 3.21), para a transmissividade T , para a condutividade hidráulica horizontal K_h e vertical K_v , e para as grandezas de armazenamento: coeficiente de armazenamento S ; armazenamento específico S_s , e; produção específica S_y , estão mostrados na Tabela 6.15. Nesta Tabela, apresenta-se tanto os valores inerentes aos tempos inicial e final do teste, como os resultados

finais, constituído pelos valores médios calculados entre estes dois instantes. O valor empregado para a espessura da zona saturada foi de 41 m, que corresponde a espessura saturada encontrada para o poço P4. Na Tabela 6.16, apresenta-se uma consolidação dos resultados obtidos no cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos, com base nos dois métodos empregados - Método da Recuperação de Theis e Método de Neuman.

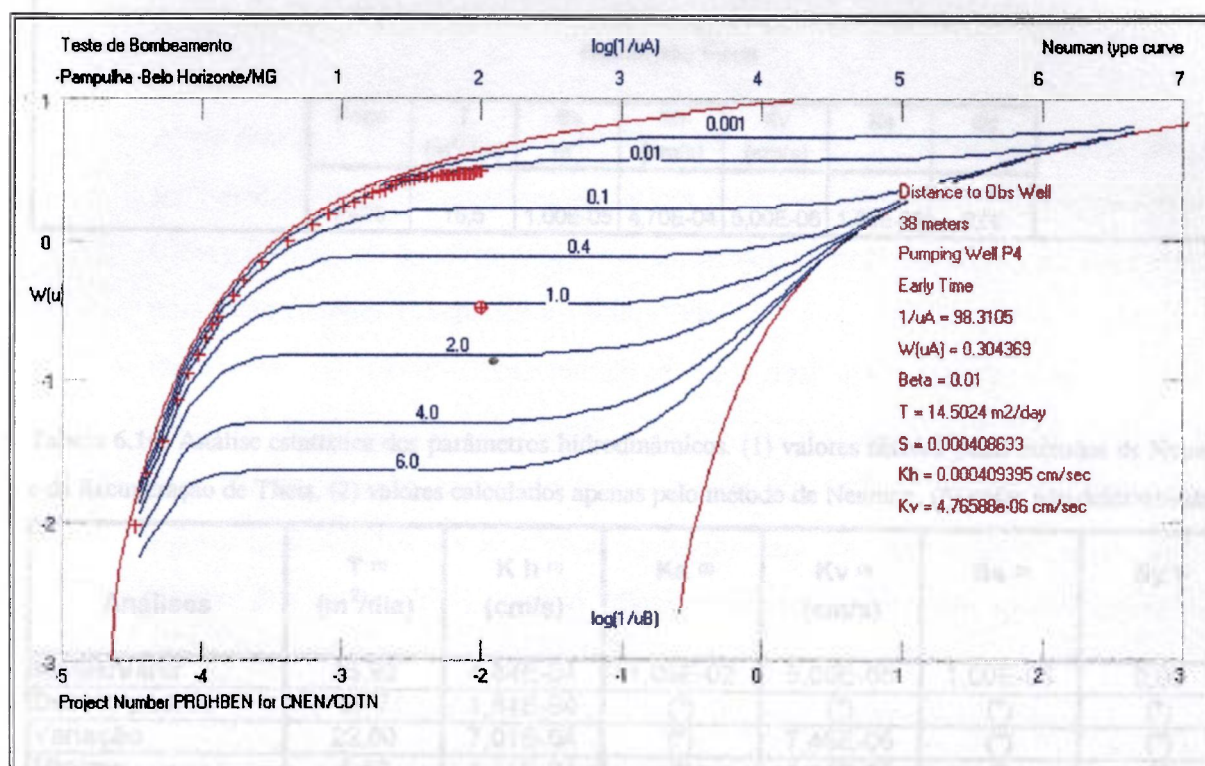


Figura 6.20: Resultado gráfico da aplicação do método de Neuman, mostrando a sobreposição dos pontos obtidos no campo, representados pelas cruzes em vermelho, com uma das curvas do tipo A, para tempos iniciais do ensaio. Bombeamento no poço P4 e medições no poço P5.

Tabela 6.15: Parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir da aplicação do método de Neuman T = Transmissividade, Ss = armazenamento específico, Kh = condutividade hidráulica horizontal, Kv = condutividade hidráulica vertical, Ka = grau de anisotropia (Kv/Kh) e Sy = produção específica, S=coeficiente de armazenamento.

Poço	TEMPO INICIAL						TEMPO FINAL				
	T (m ² /dia)	S	Ss m ⁻¹	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	Ka	T (m ² /dia)	Sy	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	Ka
P4P5	14,5	4,10E-04	1,00E-05	4,10E-04	4,40E-06	1,10E-02	18,4	0,09	5,10E-04	5,50E-06	1,10E-02
Resultado Final											
	Poço	T (m²/dia)	Ss m⁻¹	Kh (cm/s)	Kv (cm/s)	Ka	Sy				
	P4P5	16,5	1,00E-05	4,70E-04	5,00E-06	1,06E-02	0,09				

Tabela 6.16: Análise estatística dos parâmetros hidrodinâmicos. (1) valores obtidos pelos métodos de Neuman e da Recuperação de Theis, (2) valores calculados apenas pelo método de Neuman, (*) valor não determinado.

Análises	T ⁽¹⁾ (m ² /dia)	Kh ⁽¹⁾ (cm/s)	Ka ⁽²⁾	Kv ⁽²⁾ (cm/s)	Ss ⁽²⁾	Sy ⁽²⁾
Média/Valor	15,92	4,84E-04	1,06E-02	5,00E-06	1,00E-05	0,09
Desvio padrão	5,77	1,84E-04	(*)	(*)	(*)	(*)
Variação	22,60	7,01E-04	(*)	7,46E-06	(*)	(*)
Mínimo	5,40	1,51E-04	(*)	1,61E-06	(*)	(*)
Máximo	28,00	8,53E-04	(*)	9,07E-06	(*)	(*)
No. de entradas	9	9	1	1	1	1

Considerações sobre os testes de bombeamento e os resultados obtidos:

- Em quase todos os testes de bombeamento, constatou-se uma certa ineficiência na execução dos mesmos, por parte do pessoal operacional. No caso específico do único ensaio com poço de observação, P4P5, houve um momento em que parte da água bombeada do poço P4 reentrou no aquífero através do poço P5.
- Quando se compara os valores de T e Kh da Tabela 6.15 (resultado final), respectivamente 16,5 m²/dia e 4,70x10⁻⁴ cm/s, com os da Tabela 6.14 (para o ensaio P4P5), respectivamente de 17,9 m²/dia e 5,05x10⁻⁴ cm/s, observa-se que os dois

métodos utilizados obtiveram resultados muito próximos, o que reforça a acertiva dos mesmos.

- Comparando-se os resultados obtidos nos testes realizados em cada um dos poços, pode-se constatar que, de forma geral, não houve grandes variações nos valores da transmissividade T , com exceção do valor calculado para P5, e da condutividade hidráulica Kh . As variações locais nos parâmetros hidrodinâmicos podem refletir a heterogeneidade do meio, as diferenças construtivas dos poços, e/ou variações na sistemática de execução dos testes, de poço para poço.
- A transmissividade média, $15,92 \text{ m}^2/\text{dia}$, indica que o sistema aquífero local não pode ser conceituado como excelente em termos de exploração de água. Segundo Freeze & Cherry (1979), um aquífero para ser considerado um ótimo produtor de água deve ter uma transmissividade superior a $1300 \text{ m}^2/\text{dia}$.
- Os valores da condutividade hidráulica horizontal apresentaram uma variação de $7,01 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ entre o valor máximo, $8,53 \times 10^{-4}$ e o mínimo, $1,51 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Este intervalo de variação, incluindo o valor médio de $4,88 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, corresponde aos valores de condutividade hidráulica esperados para um meio arenoso, areno-argiloso (Freeze & Cherry, 1979) e representariam um estágio limítrofe entre o conceito de aquífero e aquífero
- A condutividade hidráulica vertical, $5 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, é da ordem de 100 vezes menor que a horizontal. Este grau de anisotropia reflete a heterogeneidade do sistema aquífero, e indica uma subhorizontalização das descontinuidades texturais ou dos bandamentos composicionais, o que é esperado. Recentemente, Segura (1997), ao aplicar[©] formulações específicas, que levam em conta aspectos texturais e outras características físicas do meio, obteve o valor médio de 10^{-6} cm/s para a condutividade hidráulica vertical, a partir da análise de amostras do solo retiradas da área de estudo. O valor obtido por este autor vem ratificar o valor calculado pelo Método de Neuman, nesta dissertação.
- O valor obtido para o armazenamento específico (Ss), $1 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, é representativo de um meio arenoso e denso (Anderson & Woessner, 1992), mas pode-se também interpretá-lo, neste presente caso, como indicativo de um ambiente aquífero misto, com a água subterrânea sendo liberada do armazenamento, tanto proveniente do meio saturado poroso, como das fissuras das rochas cristalinas fraturadas.

- O parâmetro que caracteriza o armazenamento de água num aquífero livre é a produção específica (S_y). Ele é tipicamente muito maior que o coeficiente de armazenamento S dos aquíferos confinados. O valor obtido para este parâmetro, 0,09 ou 10^{-1} , é baixo, mas é bem superior ao obtido para S , 10^{-4} , para os momentos iniciais de bombeamento. Segundo Anderson & Woessner (1992), valores de S_y na ordem de 10^{-1} são característicos de vários materiais, tais como areia fina, silte e argila. Usualmente S_y varia de 0,01 até 0,30 (Freeze & Cherry, 1979).

6.5.5 - Programa de Medição dos Níveis da Água Subterrânea / Mapa Potenciométrico

A partir de setembro de 1995, iniciou-se um programa de medições sistemáticas dos níveis da água subterrânea nos poços tubulares da área de estudo (vide Apêndice E, Foto 16). A princípio, só foram monitorados os poços P0, P1 e P2. Os demais poços, ou seja, aqueles que foram perfurados em 1995, foram sendo integrados ao programa à medida em que eram concluídos. Dessa forma, os níveis freáticos foram monitorados em 9 poços, P0, P1, P2, P4, P5, P8, P9, P10 e P11. Nos poços P3 e P6 não foram feitas medições, por estes estarem em produção, e no poço P7 não houve condições técnicas para a execução de medidas.

Este programa se estende até os dias de hoje, dentro de uma periodicidade semanal. Na Tabela 6.17 apresentam-se os valores médios mensais referentes à profundidade, à cota e à oscilação dos níveis da água subterrânea, em cada um dos poços monitorados, para o período de dezembro de 1995 a novembro de 1996. A partir da posição do poço em relação à superfície do terreno, e conhecendo-se a altitude do terreno em relação ao nível do mar,[©] obtêm-se a profundidade e a cota do nível freático no poço. A oscilação refere-se à diferença entre a posição do nível de um mês para outro, onde um valor negativo significa que este sofreu um descenso, e vice-versa.

Tabela 6.17: Variação mensal dos níveis freáticos nos poços, para o período de dezembro de 1995 a novembro de 1996.

POÇOS	Dez-95	Jan-96	Fev-96	Mar-96	Abr-96	Mai-96	Jun-96	Jul-96	Ago-96	Set-96	Out-96	Nov-96	
P0	profundidade (m)	5,16	3,97	4,85	4,97	5,25	5,56	5,86	5,95	6,22	6,42	6,48	5,59
	cota (m)	811,85	813,03	812,15	812,03	811,76	811,44	811,14	811,05	810,78	810,59	810,52	811,41
	oscilação (m)		1,18	-0,88	-0,12	-0,27	-0,31	-0,30	-0,09	-0,27	-0,19	-0,07	0,89
P1	profundidade (m)	0,92	0,23	0,54	0,60	0,64	0,73	0,79	0,95	1,13	1,44	1,51	1,04
	cota (m)	805,09	805,77	805,46	805,40	805,36	805,27	805,21	805,05	804,87	804,57	804,49	804,96
	oscilação (m)		0,68	-0,31	-0,06	-0,04	-0,09	-0,06	-0,16	-0,18	-0,30	-0,08	0,47
P2	profundidade (m)	3,72	1,70	2,99	3,21	3,36	3,65	3,90	4,07	3,91	4,48	4,77	3,89
	cota (m)	804,29	806,30	805,01	804,79	804,65	804,35	804,11	803,93	804,09	803,53	803,24	804,11
	oscilação (m)		2,01	-1,29	-0,21	-0,15	-0,30	-0,24	-0,18	0,16	-0,57	-0,29	0,88
P4	profundidade (m)	7,42	6,22	7,00	7,26	7,37	7,55	7,70	7,78	8,01	7,58	8,17	7,74
	cota (m)	800,58	801,78	801,00	800,74	800,64	800,45	800,31	800,22	799,99	800,43	799,83	800,26
	oscilação (m)		1,20	-0,78	-0,25	-0,11	-0,19	-0,14	-0,08	-0,23	0,43	-0,59	0,43
P5	profundidade (m)	6,89	5,68	6,39	6,64	6,74	6,85	6,90	6,88	7,08	6,66	7,24	6,86
	cota (m)	800,12	801,32	800,61	800,36	800,26	800,15	800,11	800,12	799,93	800,35	799,76	800,14
	oscilação (m)		1,20	-0,70	-0,25	-0,10	-0,11	-0,04	0,01	-0,20	0,42	-0,59	0,38
P8	profundidade (m)	7,20	5,21	5,65	6,15	6,08	6,23	6,43	6,58	6,71	6,72	6,62	6,49
	cota (m)	794,80	796,79	796,35	795,85	795,92	795,77	795,58	795,42	795,29	795,29	795,39	795,51
	oscilação (m)		1,99	-0,44	-0,50	0,07	-0,15	-0,19	-0,16	-0,13	0,00	0,10	0,13
P9	profundidade (m)	5,65	3,83	4,19	4,58	4,57	4,75	4,94	5,14	5,24	5,31	5,28	5,07
	cota (m)	794,36	796,18	795,81	795,42	795,44	795,25	795,07	794,86	794,76	794,70	794,73	794,93
	oscilação (m)		1,82	-0,37	-0,39	0,02	-0,19	-0,18	-0,21	-0,10	-0,06	0,03	0,21
P10	profundidade (m)	6,24	4,75	4,90	5,23	5,33	5,55	5,83	6,03	6,16	6,36	6,32	6,04
	cota (m)	792,77	794,25	794,10	793,77	793,68	793,45	793,17	792,98	792,85	792,64	792,68	792,96
	oscilação (m)		1,49	-0,15	-0,33	-0,09	-0,22	-0,28	-0,19	-0,13	-0,21	0,04	0,28
P11	profundidade (m)	2,45	2,22	2,54	2,60	2,70	2,87	2,96	3,13	3,23	3,21	3,23	2,87
	cota (m)	791,56	791,78	791,46	791,40	791,31	791,13	791,04	790,87	790,78	790,79	790,78	791,13
	oscilação (m)		0,23	-0,32	-0,06	-0,10	-0,18	-0,09	-0,17	-0,10	0,01	-0,01	0,36

Com os dados da Tabela 6.17, realizou-se uma análise estatística, cujos resultados encontram-se na Tabela 6.18, e sobre a qual faz-se as seguintes observações:

- Para o período em questão, o mês de janeiro se caracterizou como o mês em que o nível freático esteve mais próximo à superfície do terreno. Não há uma unanimidade dos resultados quanto ao mês em que o nível esteve mais profundo. Considerando os dados dos poços P0, P1, P2, P4 e P5, as maiores profundidades do nível foram alcançadas em outubro de 1996. Já nos poços P8 e P9, a profundidade máxima foi atingida em dezembro de 1995, o mesmo ocorrendo em setembro de 1996 e outubro de 1996 respectivamente nos poços P10 e P11.
- A maior variação do nível freático, registrada para o período em questão, foi de 3,07 m no poço P2. As maiores oscilações do nível freático, de um mês para outro, foram observadas, em todos os poços, na passagem de dezembro de 1995 para janeiro de 1996, o que era de se esperar, ao se analisar os dados de chuva da Tabela 6.1.

Tabela 6.18: Análise estatística das oscilações mensais do nível da água subterrânea.

POÇOS	Média	Máximo		Mínimo		Variação	
		Valor	Mês/ano	Valor	Mês/ano		
P0 profundidade (m)	5,52	6,48	Out/96	3,97	Jan/96	2,51	
	cota (m)	811,48	813,03	Jan/96	810,52	Out/96	2,51
	oscilação (m)	0,42	1,18	Jan/96	0,07	Out/96	-
P1 profundidade (m)	0,88	1,51	Out/96	0,23	Jan/96	1,28	
	cota (m)	805,12	805,77	Jan/96	804,49	Out/96	1,28
	oscilação (m)	0,22	0,68	Jan/96	0,04	Abr/96	-
P2 profundidade (m)	3,64	4,77	Out/96	1,70	Jan/96	3,07	
	cota (m)	804,36	806,30	Jan/96	803,24	Out/96	3,06
	oscilação (m)	0,57	2,01	Jan/96	0,15	Abr/96	-
P4 profundidade (m)	7,48	8,17	Out/96	6,22	Jan/96	1,95	
	cota (m)	800,52	801,78	Jan/96	799,83	Out/96	1,95
	oscilação (m)	0,41	1,20	Jan/96	0,08	Jul/96	-
P5 profundidade (m)	6,73	7,24	Out/96	5,68	Jan/96	1,56	
	cota (m)	800,27	801,32	Jan/96	799,76	Out/96	1,56
	oscilação (m)	0,36	1,20	Jan/96	0,01	Jul/96	-
P8 profundidade (m)	6,34	7,20	Dez/95	5,21	Jan/96	1,99	
	cota (m)	795,66	796,79	Jan/96	794,80	Dez/95	1,99
	oscilação (m)	0,35	1,99	Jan/96	0,00	Abr/96	-
P9 profundidade (m)	4,88	5,65	Dez/95	3,83	Jan/96	1,82	
	cota (m)	795,12	796,18	Jan/96	794,36	Dez/96	1,82
	oscilação (m)	0,32	1,82	Jan/96	0,02	Abr/96	-
P10 profundidade (m)	5,73	6,36	Set/96	4,75	Jan/96	1,61	
	cota (m)	793,27	794,25	Jan/96	792,64	Set/96	1,61
	oscilação (m)	0,31	1,49	Jan/96	0,04	Out/96	-
P11 profundidade (m)	2,83	3,23	Out/96	2,22	Jan/96	1,01	
	cota (m)	791,17	791,78	Jan/96	790,78	Out/96	1,01
	oscilação (m)	0,15	0,36	Nov/96	0,01	Out/96	-

A Tabela 6.19 apresenta uma análise estatística final, da variação do nível freático observada no sistema aquífero local, tendo por base o conjunto geral dos dados deste parâmetro, medidos em cada um dos poços monitorados, para o período em questão.

Tabela 6.19: Análise estatística da variação do nível freático, observada para o período de dezembro -1995 a novembro-1996, levando-se em conta o conjunto total de dados dos poços monitorados.

Análises	Profundidade (m)	Cota (m)	Variação da profundidade máxima-mínima (m)	Oscilação mês a mês (m)
Média	4,89	799,66	1,87	0,35
Máximo	8,17	813,03	3,07	2,01
Mínimo	0,23	790,78	1,01	0,00
Variação	7,94	22,25	2,06	2,01

Analisando-se em conjunto as Tabelas 6.18 e 6.19, faz-se as seguintes considerações:

- O nível freático situou-se a uma profundidade média de 4,89 m, atingindo os 8,17 m de profundidade máxima (poço P4/outubro-1996). Estes valores indicam que a zona saturada ocorre muito próxima à superfície, ou seja, a superfície potenciométrica do aquífero é rasa.
- Em média, o nível freático situou-se na cota altimétrica 800 m. Os 22,25 m de variação de cota não tem muito significado em termos de gradiente hidráulico, uma vez que as cotas máxima, 813,03 m (poço P0-janeiro de 1996), e mínima, 790,78 m (poço P11-outubro de 1996), referem-se a períodos distintos e extremos em termos de quantidade de chuva. Por outro lado, tomando-se, na Tabela 6.18, as cotas médias do nível freático para os poços P4, 800,52 m, e P11, 791,17 m, e tendo-se 1400 m de distância aproximada, em planta, entre estes poços, pode-se estimar um gradiente hidráulico entre eles de 0,7 %. Quando se compara este valor com os 0,9 % de declividade do terreno, para o trecho em questão, pode-se concluir que a superfície freática na área de várzea tende a acompanhar a declividade do relevo.
- O valor obtido para a variação média (máxima-mínima), da profundidade do nível freático, 1,87 m, e para os valores de variação máxima, 3,07 m (poço P2), e mínima 1,01 m (poço P11), indicam que o nível freático não possui grandes variações de profundidade, entre as estações chuvosa e seca.
- Da análise da oscilação mês a mês, do nível freático, conclui-se que este tanto responde prontamente ao aumento das chuvas, subindo até 2,01 m no poço P2, na passagem de dezembro-1996, mês muito chuvoso, para janeiro-1997, como pode se manter inalterado no período de seca: oscilação zero no poço P8, entre maio e abril de 1996.

Ficou evidente que os dados relativos à variação do nível freático são espacialmente esparsos e, portanto, insuficientes para a elaboração precisa do mapa potenciométrico, ou seja, do mapa de distribuição deste parâmetro em todo o domínio da área de estudo. Há, nitidamente, uma carência de informação sobre o comportamento do nível freático nas regiões elevadas e na porção sul da área. Com base no exposto optou-se pela criação de 23 poços virtuais, localizados em regiões estratégicas, cujos níveis freáticos foram estimados segundo os

seguintes critérios: (a) o nível freático tende a acompanhar a declividade do terreno na faixa de várzea; (b) sob as colinas a zona saturada ocorre a maiores profundidades; e (c) os limites laterais do sistema aquífero são coincidentes com os divisores de água da bacia hidrográfica.

A partir dos valores médios das profundidades dos níveis freáticos, medidos nos poços tubulares para o período em questão, e dos valores inferidos para os poços virtuais, conforme apresentado na Tabela 6.20, elaborou-se o mapa potenciométrico e o mapa de distribuição da profundidade do topo da zona saturada. Estes mapas estão mostrados nas Figuras 6.21 e 6.22, respectivamente. Na construção destes mapas aplicou-se o método de interpolação denominado *Kriging*. A localização dos poços virtuais indica exatamente os locais onde há limitações do modelo conceitual, quanto ao conhecimento da oscilação do nível freático, sugerindo ser imperioso a busca de novas informações sobre este parâmetro para se aumentar a confiabilidade no modelo.

Esta expectativa de distribuição da superfície potenciométrica, mostrada nas Figuras 6.21 e 6.22, será ratificada ou retificada, em função dos resultados obtidos para a distribuição de carga hidráulica na modelagem numérica.

Tabela 6.20: Fonte de dados para a o mapa potenciométrico Os dados relativos aos pontos P0 a P11 foram medidos, enquanto os demais, Pv1 a Pv21, foram inferidos.

PONTOS	Profundidade Nível Freático. médio (m)	Altitude Nível Freático. médio (m)	PONTOS	Profundidade Nível Freático. médio (m)	Altitude Nível Freático. médio (m)
P0	5,52	811,48	PV7	20	855
P1	0,88	805,12	PV8	20	840
P2	3,64	804,36	PV9	10	830
P4	7,48	800,52	PV10	0	815
P5	6,73	800,27	PV11	10	845
P8	6,34	795,66	PV12	5	810
P9	4,88	795,12	PV13	0	810
P10	5,73	793,27	PV14	5	800
P11	2,83	791,17	PV15	15	825
PV1	10	840	PV16	10	820
PV2	5	820	PV17	0	814
PV3	5	810	PV18	10	825
PV4	10	825	PV19	10	825
PV5	15	835	PV20	10	825
PV6	15	830	PV21	10	825

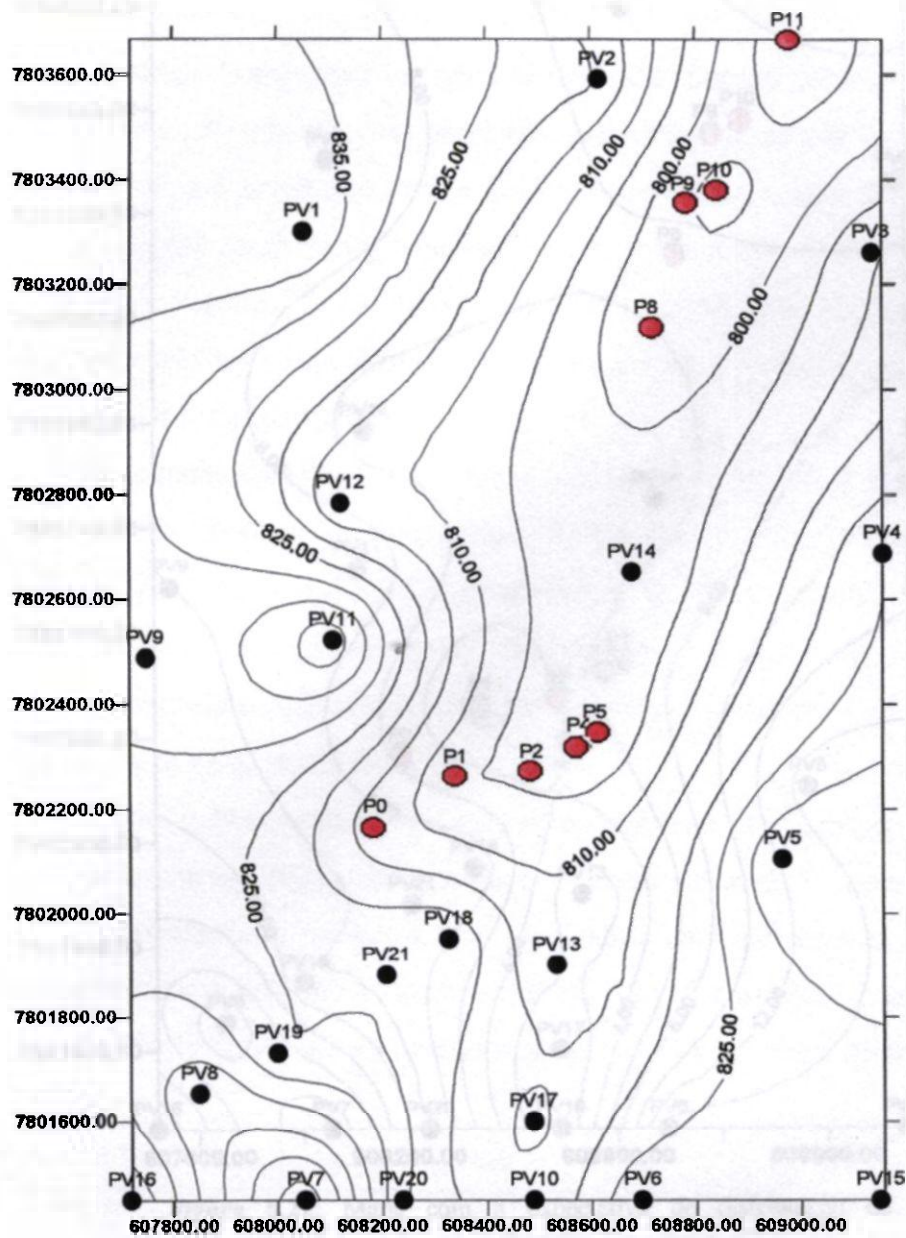


Figura 6.21: Mapa com a configuração esperada para a superfície potenciométrica, elaborado com os valores médios para o período de dezembro/95 a novembro/96. Isolinhas de 5 em 5 metros. Em vermelho estão os pontos medidos.

6.5.6 - Sistema de Drenos

Os terrenos da cidade universitária são cortados por um sistema de drenos, construídos não se sabe ao certo quando, mas provavelmente no fim da década de 50 ou início da de 60. Estes drenos foram projetados com a finalidade de drenar a água subterrânea na região da várzea do córrego do Engenho Nogueira e de seus tributários (vide Apêndice E, Fotos 17 e 18), visando a implantação da cidade Universitária da UFMG. Ainda hoje, a zona saturada ocorre muito próxima à superfície do terreno, e a presença de lentes de argila no local dificulta a infiltração das águas pluviais.

Teve-se muita dificuldade em adquirir informações sobre estes drenos. As únicas fontes de dados foram cinco mapas, pertencentes ao DPFO da UFMG (Guimarães Junior, 1966a-1966e). A partir da análise destes documentos, pode-se reconstituir aproximadamente o traçado dos drenos. Não se obteve informações sobre detalhes do projeto. A declividade do sistema foi estimada com base nas cotas altimétricas existentes em 4 caixas de visitas. Apenas foram considerados os ramos maiores do sistema.

Na Figura 6.23 apresenta-se a localização do sistema de drenos, o qual possui cerca de 3 km de comprimento. A fim de facilitar a posterior localização deste sistema no modelo numérico computacional, decidiu-se por subdividi-lo em 4 subsistemas menores, interligados, cujas características estão mostradas na Tabela 6.21. Cabe ressaltar que os engenheiros do DPFO não têm dúvidas quanto à operacionalidade atual, e eficiente, destes drenos.

Tabela 6.21: Dados gerais do sistema de drenos.

Subsistema	Início	Fim	Altitude inicial estimada (m)	Altitude final estimada (m)	Comprimento (m)	Declividade (%)
SD1	Reitoria	Horto	794,6	789,1	920	0,6
SD2	Veterinária	Reitoria	798,6	794,6	700	0,6
SD3	CDTN	Reitoria	800,6	794,6	980	0,6
SD4	COLTEC	Icex-velho	799,1	797,2	390	0,5

6.5.6 - Sistema de Drenos

Os terrenos da cidade universitária são cortados por um sistema de drenos, construídos não se sabe ao certo quando, mas provavelmente no fim da década de 50 ou início da de 60. Estes drenos foram projetados com a finalidade de drenar a água subterrânea na região da várzea do córrego do Engenho Nogueira e de seus tributários (vide Apêndice E, Fotos 17 e 18), visando a implantação da cidade Universitária da UFMG. Ainda hoje, a zona saturada ocorre muito próxima à superfície do terreno, e a presença de lentes de argila no local dificulta a infiltração das águas pluviais.

Teve-se muita dificuldade em adquirir informações sobre estes drenos. As únicas fontes de dados foram cinco mapas, pertencentes ao DPFO da UFMG (Guimarães Junior, 1966a-1966e). A partir da análise destes documentos, pode-se reconstituir aproximadamente o traçado dos drenos. Não se obteve informações sobre detalhes do projeto. A declividade do sistema foi estimada com base nas cotas altimétricas existentes em 4 caixas de visitas. Apenas foram considerados os ramos maiores do sistema.

Na Figura 6.23 apresenta-se a localização do sistema de drenos, o qual possui cerca de 3 km de comprimento. A fim de facilitar a posterior localização deste sistema no modelo numérico computacional, decidiu-se por subdividi-lo em 4 subsistemas menores, interligados, cujas características estão mostradas na Tabela 6.21. Cabe ressaltar que os engenheiros do DPFO não têm dúvidas quanto à operacionalidade atual, e eficiente, destes drenos.

Tabela 6.21: Dados gerais do sistema de drenos.

Subsistema	Início	Fim	Altitude inicial estimada (m)	Altitude final estimada (m)	Comprimento (m)	Declividade (%)
SD1	Reitoria	Horto	794,6	789,1	920	0,6
SD2	Veterinária	Reitoria	798,6	794,6	700	0,6
SD3	CDTN	Reitoria	800,6	794,6	980	0,6
SD4	COLTEC	Icex-velho	799,1	797,2	390	0,5

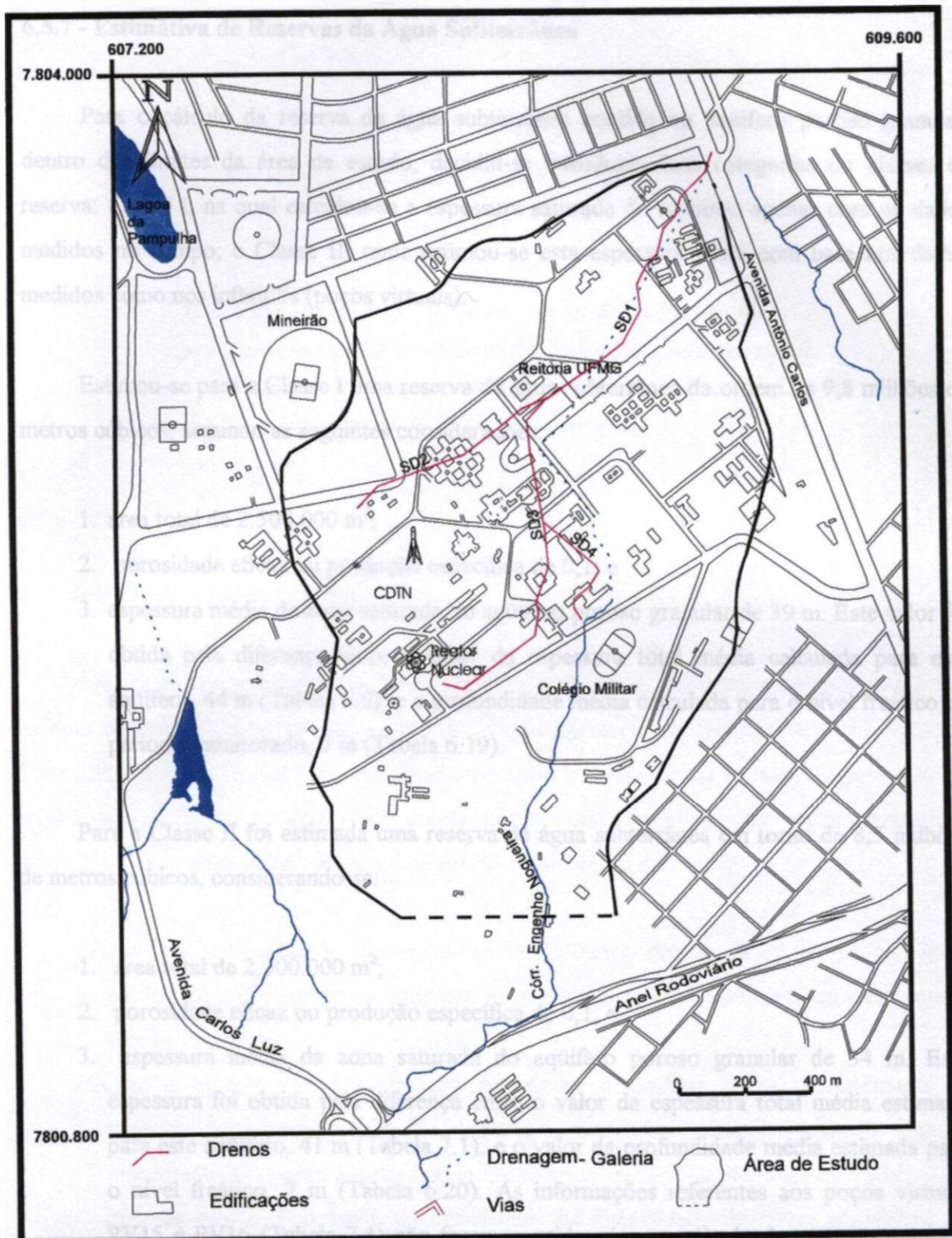


Figura 6.23: Mapa de localização do sistema de drenos. SD1=subsistema de drenos 1, SD2=subsistema de drenos 2, SD3=subsistema de drenos 3, e SD4=subsistema de drenos 4.

6.5.7 - Estimativa de Reservas da Água Subterrânea

Para o cálculo da reserva de água subterrânea contida no aquífero poroso granular, dentro dos limites da área de estudo, decidiu-se introduzir duas categorias ou classes de reserva: Classe I, na qual calculou-se a espessura saturada do aquífero apenas com os dados medidos no campo; e Classe II, onde estimou-se esta espessura tanto com base nos dados medidos como nos inferidos (poços virtuais).

Estimou-se para a Classe I uma reserva de água subterrânea da ordem de 9,8 milhões de metros cúbicos, segundo as seguintes considerações:

1. área total de 2.500.000 m²;
2. porosidade eficaz ou produção específica de 0,1; e
3. espessura média da zona saturada do aquífero poroso granular de 39 m. Este valor foi obtida pela diferença entre o valor da espessura total média calculada para este aquífero, 44 m (Tabela 6.6), e a profundidade média calculada para o nível freático no período monitorado, 5 m (Tabela 6.19).

Para a Classe II foi estimada uma reserva de água subterrânea em torno de 8,5 milhões de metros cúbicos, considerando-se:

1. área total de 2.500.000 m²;
2. porosidade eficaz ou produção específica de 0,1; e
3. espessura média da zona saturada do aquífero poroso granular de 34 m. Esta espessura foi obtida pela diferença entre o valor da espessura total média estimada para este aquífero, 41 m (Tabela 7.1), e o valor da profundidade média estimada para o nível freático, 7 m (Tabela 6.20). As informações referentes aos poços virtuais PV15 e PV16 (Tabela 7.1) não foram consideradas no cálculo da espessura média, pois estes poços se encontram fora dos limites da área de estudo.

CAPÍTULO 7

MODELAGEM MATEMÁTICA DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ZONA SATURADA

“ Uma teoria é considerada boa quando satisfaz dois requisitos: descrever com precisão uma grande categoria de observações, com base num modelo que contenha apenas poucos elementos arbitrários; e fazer previsões definidas quanto aos resultados das futuras observações. “

(Hawking, 1988)

7.1 - Introdução e Objetivos

Apesar de se reconhecer que ainda não há informações o suficiente para se construir um modelo matemático que reproduza, dentro de uma aproximação satisfatória, a dinâmica da água subterrânea na área de estudo, concluiu-se pela necessidade de se iniciar o processo de modelagem, ainda que o modelo final apresente incertezas. Tomou-se esta decisão buscando-se atingir os seguintes objetivos com a construção e aplicação do modelo:

- (a) que seja implementado um modelo calibrado para o regime estacionário e se avalie, em função das incertezas verificadas, as condições de calibração deste modelo para o regime transiente;
- (b) que o modelo venha a ser uma ferramenta de análise crítica, contribuindo na organização e avaliação dos dados ou características definidas para o sistema hidrogeológico e para a dinâmica do escoamento da água subterrânea no aquífero da área de estudo, apontando os locais onde há necessidade de novas aquisições de dados de campo;
- (c) e que venha a ser a base para os estudos de previsão das variações do nível freático e de simulação do transporte de contaminantes no meio poroso, previstos para o PROHBEN (vide Capítulo 1).

Apresenta-se, neste Capítulo, uma descrição do modelo conceitual (item 7.2), como consolidação das informações contidas no Capítulo 6, e do código *MODFLOW* (item 7.3), empregado na modelagem numérica. Além destes itens, encontram-se neste Capítulo a descrição do projeto do modelo numérico (item 7.4), e os resultados obtidos com a calibração e execução do modelo em regime estacionário (item 7.5).

7.2 - Modelo Conceitual

O modelo conceitual contém os pilares necessários à construção do modelo numérico. Todo o universo de dados empregados na elaboração do modelo numérico estão descritos no modelo conceitual. No modelo conceitual, os dados encontram-se representados num formato intermediário entre a realidade física, de campo, e a representação numérica, computacional. Ele deve consolidar e descrever as informações de campo, de uma maneira simplificada mas representativa o bastante, para que o modelo numérico, construído a partir dele, seja o mais acurado possível.

O modelo conceitual foi sendo construído, passo a passo, conforme descrito no Capítulo 6. No presente Capítulo, apresenta-se uma síntese dos dados que constituem o modelo conceitual, tais como os parâmetros hidrodinâmicos, a configuração geológica/hidrogeológica, os limites do sistema aquífero e os dados de contorno (rio, dreno, recarga). Com a finalidade de permitir uma visão integrada de todas estas informações, apresenta-se também neste Capítulo uma representação gráfica sinóptica do modelo conceitual, sob a forma de bloco diagrama. ©

7.2.1 - Unidades Hidrogeológicas

O sistema hidrogeológico local é constituído por um aquífero poroso granular sobreposto a um aquífero fissural. Estes dois aquíferos encontram-se em íntima comunicação hidráulica, constituindo portanto um único aquífero, freático ou livre e do tipo misto.

O aquífero poroso granular é arenoso a argilo-arenoso, sendo constituído pelos sedimentos aluviais das drenagens locais, pelos depósitos coluviais de encosta, e pelos produtos de alteração (Manto de Alteração) das rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte. No extremo norte da área de estudo, individualizou-se espessa lente de aluvião argiloso. O aquífero poroso possui profundidade média de 44 metros sob a calha do córrego

do Engenho Nogueira. Este valor médio foi obtido a partir dos dados dos poços P0 a P11 que constam da Tabela 7.1. O contorno dos limites do aquífero poroso em profundidade (fundo do aquífero) podem ser visto na Figura 7.1. Nesta Figura observa-se o relevo esperado para a superfície de contato entre o aquífero poroso granular e as rochas fraturadas do aquífero fissural. Esta Figura foi gerada a partir dos dados da Tabela 7.1, na qual pode-se observar que foram utilizadas tanto informações provenientes da perfuração dos poços tubulares, portanto dados medidos, como dos chamados poços virtuais (vide Capítulo 6, Item 6.5.5), onde os valores foram inferidos com base numa expectativa, segundo os seguintes critérios:

1. para os poços virtuais localizados na região de várzea, atribuiu-se inicialmente o valor calculado para a profundidade média do aquífero poroso granular nesta região específica, 44 m. Posteriormente, como consequência dos ajustes nos dados, causados pela calibração do modelo numérico computacional, o valor da profundidade do fundo do aquífero poroso variou, nos poços virtuais, entre 40 e 50 m;
2. para os poços virtuais localizados nos topos das colinas, adotou-se inicialmente para o fundo do aquífero poroso granular, profundidades variando entre 30 e 40 m, em função da declividade do terreno e de observações de campo. Posteriormente, alterou-se os valores desta profundidade em alguns destes poços, como resultado dos ajustes efetuados durante a calibração do modelo.

©

Os limites laterais do aquífero poroso granular são coincidentes com os limites da bacia hidrográfica do córrego do Engenho Nogueira.

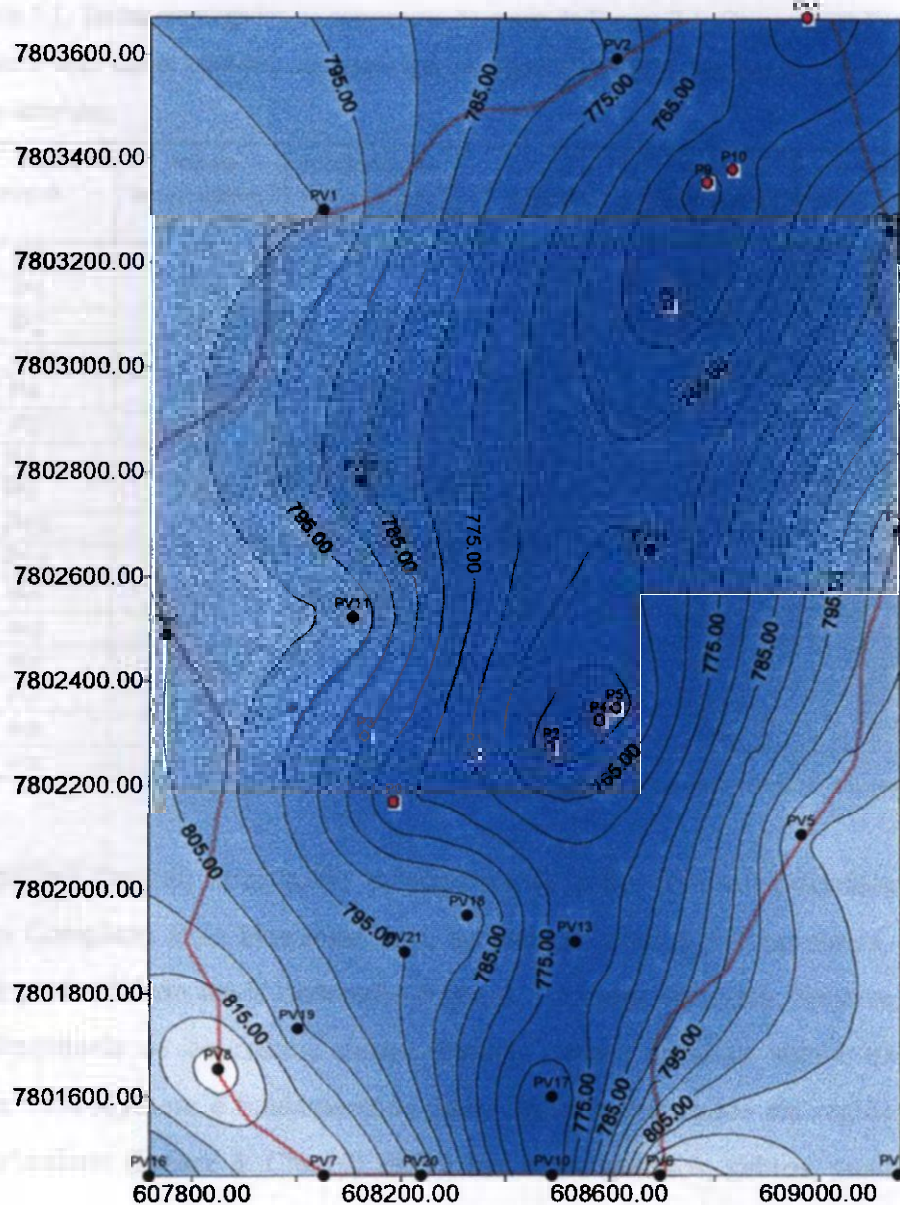


Figura 7.1: Mapa de contorno iso-altimétrico do fundo do aquífero poroso granular. A coloração mais escura indica tendência de maiores profundidade e espessura. Os valores estão em metros. Os poços em vermelho são os que têm dados medidos, enquanto os que estão em preto possuem dados inferidos (poços virtuais). Nota-se, em marrom, os limites da área de estudo.

Tabela 7.1: Dados empregados na construção do mapa da Figura 7.1. Os poços P0-P11 são tubulares com dados medidos, enquanto que os poços PV1-PV21 são poços virtuais com dados inferidos.

POÇOS	Altitude fundo aquífero poroso (m)	Profundidade fundo aquífero poroso (m)	POÇOS	Altitude fundo aquífero poroso (m)	Profundidade fundo aquífero poroso (m)
P0	775	42	PV7	820	55
P1	770	36	PV8	830	30
P2	758	51	PV9	805	35
P3	785	36	PV10	765	50
P4	759	49	PV11	800	55
P5	757	50	PV12	785	30
P8	756	46	PV13	770	40
P9	752	48	PV14	765	40
P10	759	40	PV15	810	30
P11	750	44	PV16	800	30
PV1	800	50	PV17	764	50
PV2	780	45	PV18	795	40
PV3	780	35	PV19	805	30
PV4	805	30	PV20	805	30
PV5	810	40	PV21	795	40
PV6	825	20			

Do aquífero fissural, constituído principalmente pelas fraturas existentes nas rochas cristalinas do Complexo Belo Horizonte, não se pode precisar a sua espessura, pois não se sabe até que profundidade ainda ocorrerão fraturas saturadas em água. Sabe-se, sim, que a abertura e frequência de ocorrência destas fraturas devem diminuir significativamente em profundidade. Esta hipótese é fundamentada pelos estudos realizados em regiões compostas por rochas cristalinas (Freeze & Cherry, 1979), tais como granitos, gabros, gnaisses e xistos, onde se observou que a frequência de ocorrência de fraturamentos é muito maior sob os sistemas de drenagem do que sob as vertentes e topos das colinas, e que as fraturas tendem a rarear à medida que se aprofunda no substrato cristalino.

Para fins da modelagem numérica, e substanciado no que foi exposto no parágrafo anterior, considerou-se, dentro de uma aproximação, os limites em profundidade do aquífero fissural como sendo a superfície gerada pela interpolação dos dados presentes na Tabela 7.2, conforme pode ser visto na Figura 7.2.

Na Tabela 7.2, pode-se observar que em relação aos poços tubulares adotou-se a própria profundidade final destes como sendo a profundidade do fundo do aquífero. Esta atitude se baseou no valor da profundidade final destes poços, 80 m (Tabela 6.5), que é característica dos poços tubulares localizados em terrenos do Complexo Belo Horizonte no Município de Belo Horizonte (Silva et al., 1995). Em relação aos poços virtuais empregou-se dois critérios:

1. para aqueles situados em áreas de drenagem utilizou-se o valor do menor nível altimétrico (maior profundidade) alcançado pelos poços tubulares, o que corresponde a cota altimétrica de 699 m; e,
2. nos demais poços virtuais, estabeleceu-se que o fundo do aquífero fissural situa-se a 20 metros abaixo do fundo do aquífero poroso sobreposto.

As profundidades adotadas para a base do aquífero fissural nos poços virtuais não sofreram alterações decorrentes do processo de calibração do modelo numérico computacional. Estabeleceu-se que os limites laterais do aquífero fissural são aproximadamente coincidentes com os limites das áreas da drenagem sobrejacente, principalmente no que diz respeito ao córrego do Engenho Nogueira. Como consequência, as porções deste aquífero que estão localizadas sob as áreas de vertentes e topos das colinas se comportariam como divisores hidrogeológicos, em relação ao fluxo da água subterrânea.

Tabela 7.2 : Dados empregados na construção do mapa da Figura 7.2. Os poços P0-P11 são tubulares com dados medidos, enquanto que os poços PV1-PV21 são poços virtuais com dados inferidos.

POÇOS	Altitude fundo aquífero fissural (m)	Profundidade fundo aquífero fissural (m)	POÇOS	Altitude fundo aquífero fissural (m)	Profundidade fundo aquífero fissural (m)
P0	750	67	PV7	800	75
P1	726	80	PV8	785	50
P2	716	92	PV9	699	55
P3	741	80	PV10	699	116
P4	728	80	PV11	780	75
P5	716	91	PV12	699	116
P8	722	80	PV13	699	111
P9	720	80	PV14	699	106
P10	699	100	PV15	790	50
P11	734	60	PV16	780	50
PV1	780	70	PV17	699	115
PV2	760	65	PV18	775	60
PV3	760	55	PV19	785	50
PV4	785	50	PV20	785	50
PV5	790	60	PV21	775	60
PV6	805	40			

Com base nas Tabelas 7.1 e 7.2, estimou-se as dimensões para o sistema aquífero em toda a área de estudo, as quais foram utilizadas na modelagem numérica computacional. Ressalta-se que os valores referentes aos poços virtuais PV15 e PV16 não foram computados

para efeito de cálculo dos dados apresentados à seguir, uma vez que estes poços encontram-se fora dos limites da área de estudo:

1. aquífero poroso granular:

- cota altimétrica média do fundo do aquífero = 784 m;
- espessura média total (zona saturada + não saturada) do aquífero = 41 m;

2. aquífero fissural:

- cota altimétrica média do fundo do aquífero = 745 m;
- profundidade média do fundo do aquífero = 75 m;
- espessura média = 39 m;

3. sistema misto (aquífero poroso granular + aquífero fissural):

- cota altimétrica média do fundo do sistema aquífero = 745 m;
- profundidade média do sistema aquífero = 75 m;
- espessura média do sistema aquífero = 75 m.

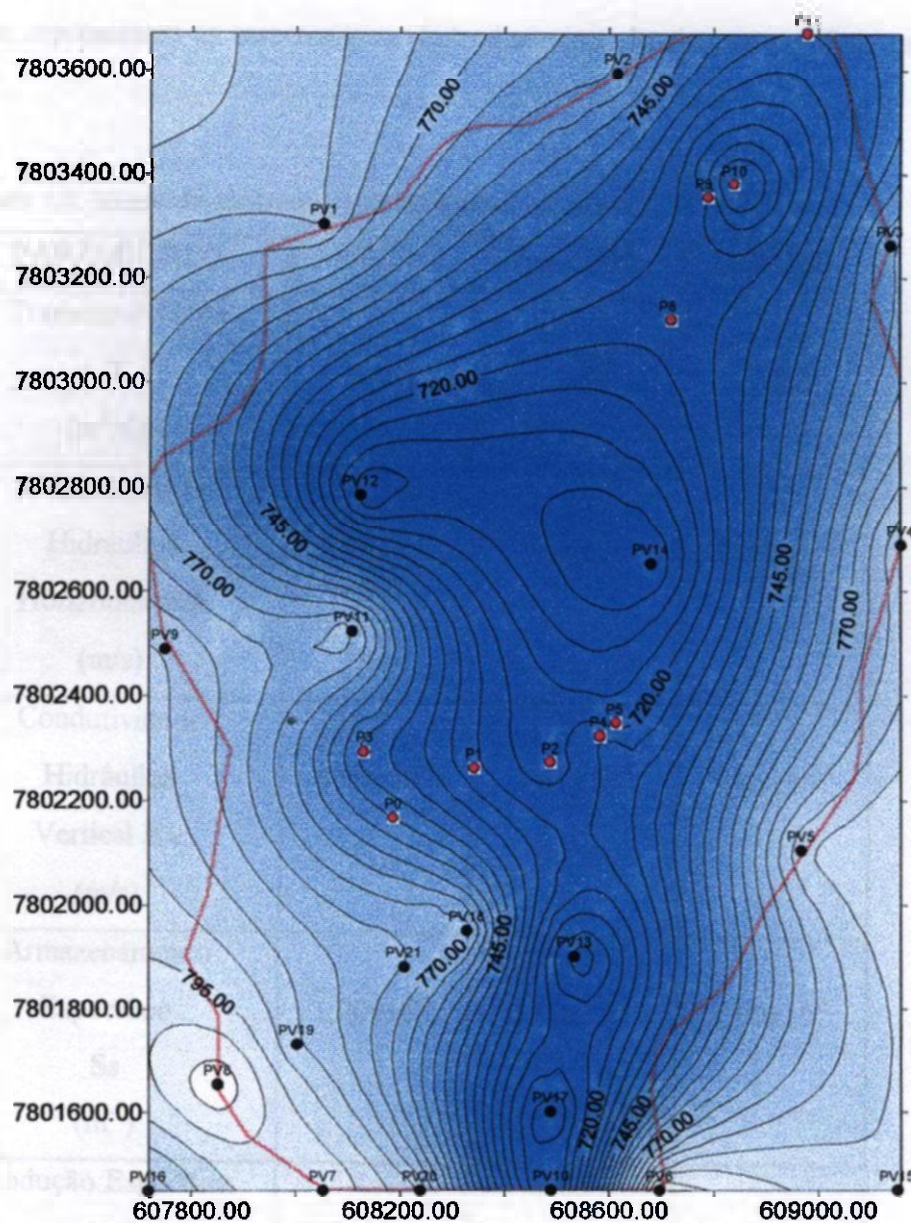


Figura 7.2: Mapa de contorno iso-altimétrico do fundo do aquífero fissural. As cotas altimétricas estão em metros. A coloração mais escura indica tendência de maiores profundidade e espessura. Os poços em vermelho são os que têm dados medidos, enquanto os que estão em preto os dados foram inferidos (poços virtuais). Nota-se, em marrom, os limites da área de estudo

7.2.2 - Propriedades Hidrodinâmicas

Os valores das principais propriedades hidrodinâmicas encontram-se na Tabela 7.3, elaborada a partir da Tabela 6.16. Esses dados foram obtidos dos testes de bombeamento, nos quais foram ensaiados os dois aquíferos conjuntamente. Portanto, os valores da Tabela 7.3, a

princípio, representam as características hidrodinâmicas do sistema aquífero misto: granular e fissural.

Tabela 7.3: Síntese dos parâmetros hidrodinâmicos calculados.

PARÂMETROS	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
Transmissividade T (m ² /dia)	15,92	5,40	28,00
Condutividade Hidráulica Horizontal Kh (m/s)	4,84x10 ⁻⁶	1,51x10 ⁻⁶	8,53x10 ⁻⁶
Condutividade Hidráulica Vertical Kv (m/s)	5,00x10 ⁻⁸	1,61x10 ⁻⁸	9,07x10 ⁻⁸
Armazenamento Específico Ss (m ⁻¹)	1,00x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻⁵
Produção Específica Sy	0,09	0,09	0,09

7.2.3 - Dados de Contorno

Os dados referentes às condições de contorno estão mostrados nas Tabelas 7.4 (recarga), 7.5 (rio) e 6.21 (dreno). A Tabela 7.5 apresenta os valores da variação do nível da água no córrego do Engenho Nogueira, supondo-se três situações particulares - período chuvoso, período de seca e valores médios esperados. Estes dados foram estimados com base no mapa planialtimétrico usado neste estudo (vide Capítulo 5, Item 5.1). O valor do comprimento do córrego, mostrado na Tabela 7.5, refere-se apenas ao trecho não canalizado

do mesmo, já que no ramo canalizado entende-se, com base em informações não referenciadas, que não há nenhuma comunicação hidráulica entre a água do canal e a do sistema aquífero.

Tabela 7.4: Valores de recarga médias mensais e totais no período compreendido entre Dez/95 e Nov/96. Os rótulos Rc.10, Rc.20 e Rc.30 correspondem aos valores de recarga calculados, respectivamente, supondo-se escoamentos superficiais de 10, 20 e 30% da precipitação total (pp). Esta Tabela foi montada a partir da Tabela 6.4. Todos os valores estão em mm.

Recarga	Dez/95	Jan/96	Fev/96	Mar/96	Abr/96	Mai/96	
Rc.10	392,1	61,9	75,6	152,6	16,2	0,0	
Rc.20	337,4	40,8	55,1	123,1	4,9	0,0	
Rc.30	282,6	19,7	34,6	93,5	0,0	0,0	
Recarga	Jun/96	Jul/96	Ago/96	Set/96	Out/96	Nov/96	ANO
Rc.10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	119,2	817,6
Rc.20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	82,1	643,4
Rc.30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,1	475,5

Tabela 7.5: Dados do córrego do Engenho Nogueira. O rótulo "Início" refere-se aos valores estimados para o córrego no ponto em que este entra na área de estudo. O rótulo "Fim" refere-se ao ponto onde começa a canalização do córrego.

Situação	Nível da água (m)		Comprimento (m)
	Início	Fim	
seca	812,5	802	1000
chuvosa	814,5	804	1000
média	813,5	803	1000

Em relação aos poços tubulares P3 e P6, atualmente em funcionamento, estimou-se uma exploração diária de 48 m³ e 76 m³, respectivamente. Esta estimativa se baseou nos dados de vazão obtidos nos testes de bombeamento, como mostrado na Tabela 6.5. Para os dois poços supôs-se 4 horas/dia de operação, já que foi impossível determinar o regime real de operação destes poços devido às características de distribuição de água aos quais eles estão ligados.

Na Figura 7.3 apresenta-se uma representação gráfica sinóptica do modelo conceitual. Nela estão assinalados as camadas hidrogeológicas, suas propriedades hidrodinâmicas médias e alguns dados referentes às condições de contorno. Com base nestes dados fez-se a implementação do modelo numérico através da transferência dos dados do modelo conceitual, expostos no bloco diagrama, para o formato computacional da modelagem numérica.

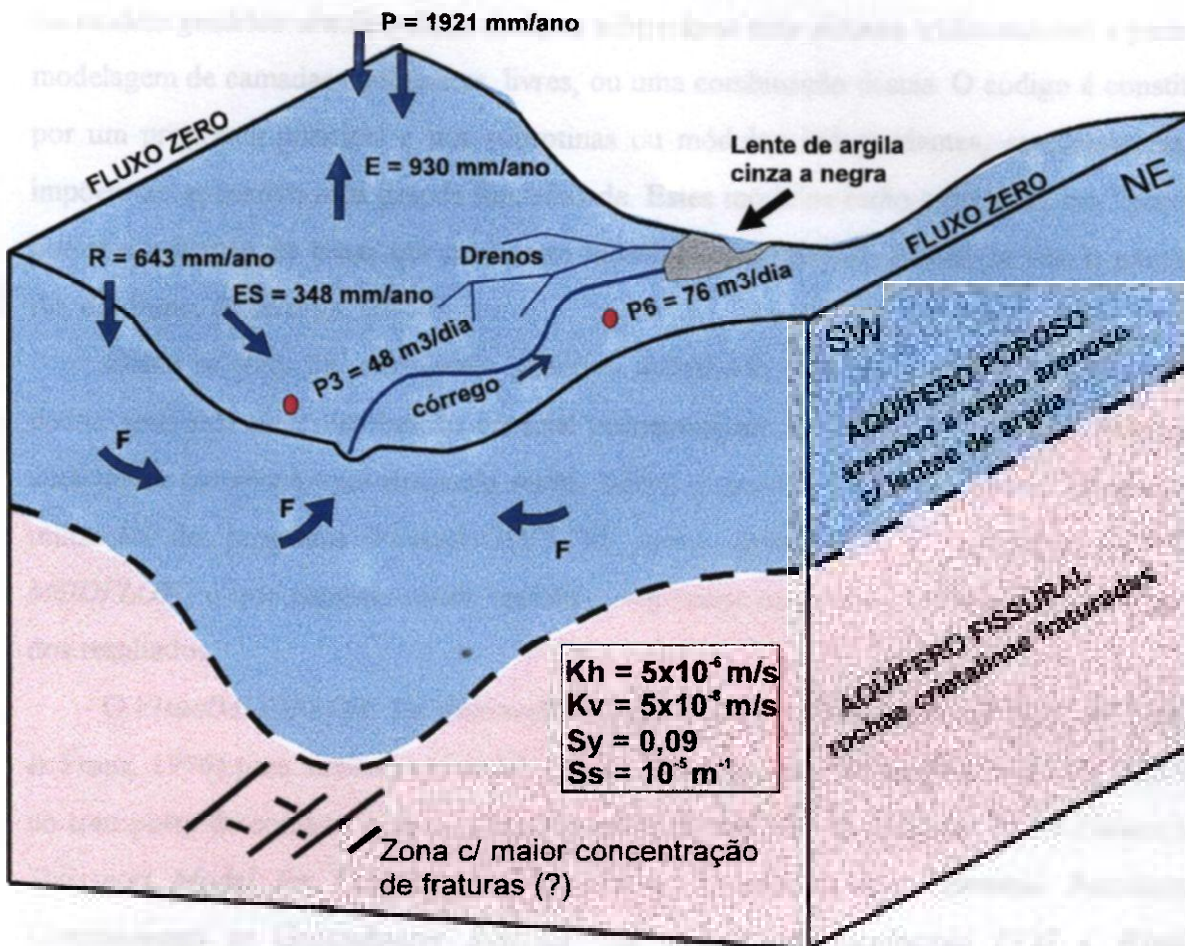


Figura 7.3: Representação sinóptica do modelo conceitual, onde K_h = condutividade hidráulica horizontal, K_v = condutividade hidráulica vertical, S_y = produção específica, S_s = armazenamento específico, F = fluxo provável da água subterrânea, R = recarga, ES = escoamento superficial, E = evapotranspiração, P = precipitação, P_3 e P_6 são poços tubulares. Não se teve preocupação com a proporcionalidade entre as dimensões.

7.3 - Código de Computador - MODFLOW

Para resolver numericamente o modelo matemático, optou-se por empregar o código de computador denominado *MODFLOW - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model* (McDonald & Harbaugh, 1988). Trata-se de um código largamente utilizado pelos profissionais que atuam na modelagem do fluxo da água subterrânea.

O *MODFLOW* utiliza o método das diferenças finitas com bloco centrado. Este código ou modelo genérico simula o fluxo da água subterrânea num sistema tridimensional e permite a modelagem de camadas confinantes, livres, ou uma combinação destas. O código é constituído por um programa principal e por subrotinas ou módulos independentes, características que impõem ao aplicativo uma grande flexibilidade. Estes módulos estão agrupados em “pacotes”, que têm a função de tratar um parâmetro hidrológico específico. Assim, se tem o pacote do rio, do dreno, da recarga, etc.

Como se trata de um modelo genérico sofisticado, que permite o processamento dos dados dentro de uma distribuição espacial tridimensional, a entrada de dados no programa é uma tarefa complexa, que demanda muito tempo e atenção. Neste contexto, optou-se pela utilização do programa *VisualMODFLOW* como gerenciador da aplicação do código *MODFLOW*, o que garantiu maior rapidez e segurança na entrada de dados e no tratamento dos resultados.

O *VisualMODFLOW* foi desenvolvido pela *Waterloo Hydrogeologic Software* (Guiguer & Franz, 1996) para auxiliar na modelagem do fluxo da água subterrânea, via *MODFLOW*, e no transporte de contaminantes no meio poroso, via *MT3D - A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems*. Ele opera nas plataformas *DOS* e *Windows*, permitindo a entrada de dados graficamente, a execução dos códigos *MODFLOW*, *MT3D* e *MODPATH* (código de simulação do caminhamento de uma partícula ou soluto na água subterrânea), e a visualização dos resultados tanto sob a forma de relatório como num modo gráfico. Ele possibilita ao usuário a aplicação de vários procedimentos e funções, tais como a importação e exportação de dados, a análise do processo de calibração, a superposição (*overlay*) de mapas, o balanço de massa ou de água no sistema, a visualização dos dados de entrada e de saída em planta ou em seções verticais, entre outros.

7.4 - Projeto do Modelo Propriamente Dito ou Modelo de Local

Como já foi descrito anteriormente no Capítulo 3, Item 3.4.4, é durante o projeto do modelo numérico que são definidos os passos de tempo, o desenho da malha, as condições de contorno e iniciais, seleciona-se o conjunto de valores preliminares (antes da calibração) dos parâmetros hidrogeológicos/hidrológicos, e realiza-se a transferência de todos os dados do modelo conceitual (Item 7.2) para a malha do modelo numérico computacional.

7.4.1 - Definição da Malha.

Tendo-se por base o modelo conceitual, dimensionou-se a malha do modelo numérico num formato compreendido por 110 células ou colunas na direção X (oeste-leste), 142 células ou linhas na direção Y (norte-sul) e duas camadas na direção z, em profundidade. A camada superior ou camada 1, corresponde ao aquífero poroso granular, enquanto que a camada 2 representa o aquífero fissural. Estas dimensões da malha resultaram num conjunto de 31240 células, de tamanhos variados, perfazendo 1665 m na direção X, 2290 m na Y e média aproximada de 74 metros na z, compondo em planta uma área retangular de 3,8 km². Na Tabela 7.6 estão mostradas as principais características da malha e na Figura 7.4 a sua configuração em planta. A malha possui maior refinamento nos locais onde se dispõe de maiores informações ou se deseja um maior detalhamento nos resultados da simulação.

Tabela 7.6: Características da malha quanto as suas dimensões em planta.

Composição das colunas					Composição das linhas				
Coluna	No. de células	Comprimento p/ célula	Intervalo (m)	Coordenada X a partir de 607615	Linha	No. de células	Comprimento p/ célula	Intervalo (m)	Coordenada Y a partir de 7803740
1	1	65	65	607680	1 - 2	2	15	30	7803710
2 - 9	8	45	360	608040	3 - 65	63	10	630	7803080
10	1	30	30	608070	65 - 67	2	15	30	7803050
11	1	20	20	608090	68	1	20	20	7803030
12	1	15	15	608105	69 - 84	16	30	480	7802550
13 - 103	91	10	910	609015	85	1	20	20	7802530
104	1	15	15	609030	86 - 87	2	15	30	7802500
105	1	20	20	609050	88 - 125	38	10	380	7802120
106	1	30	30	609080	126 - 127	2	15	30	7802090
107 - 109	3	45	135	609215	128	1	20	20	7802070
110	1	65	65	609280	129	1	30	30	7802040
Total =>	110		1665		130 - 141	12	45	540	7801500
					142	1	50	50	7801450
					Total =>	142		2290	

Em profundidade, a malha encontra-se dimensionada segundo a própria configuração das camadas. O topo da camada 1 é o relevo da superfície do terreno, enquanto que o seu fundo tem a configuração mostrada na Figura 7.1. A distribuição espacial do fundo da camada 2 pode ser vista na Figura 7.2. Os limites laterais da camada 1 correspondem aos limites hidrológicos da Bacia. A camada 2 tem sua ocorrência restrita às áreas posicionadas abaixo das faixas de drenagem presentes no terreno. Este critério adotado para os limites laterais do aquífero fissural já foi discutido anteriormente no Item 7.2 do presente Capítulo, e se baseia no pressuposto de que a densidade do fraturamento tenderia a diminuir significativamente sob as colinas, caracterizando estas regiões como divisores hidrogeológicos para o aquífero, em

relação ao fluxo subterrâneo. Trata-se de uma inferência que deve ser alvo de investigação futura. A Figura 7.5 ilustra a distribuição areal da camada 2.

Na Figura 7.6 apresenta-se uma seção vertical oeste-leste da malha, onde se pode observar o relevo das duas camadas e os seus limites laterais definidos como condições de contorno do tipo 2 (fluxo zero).

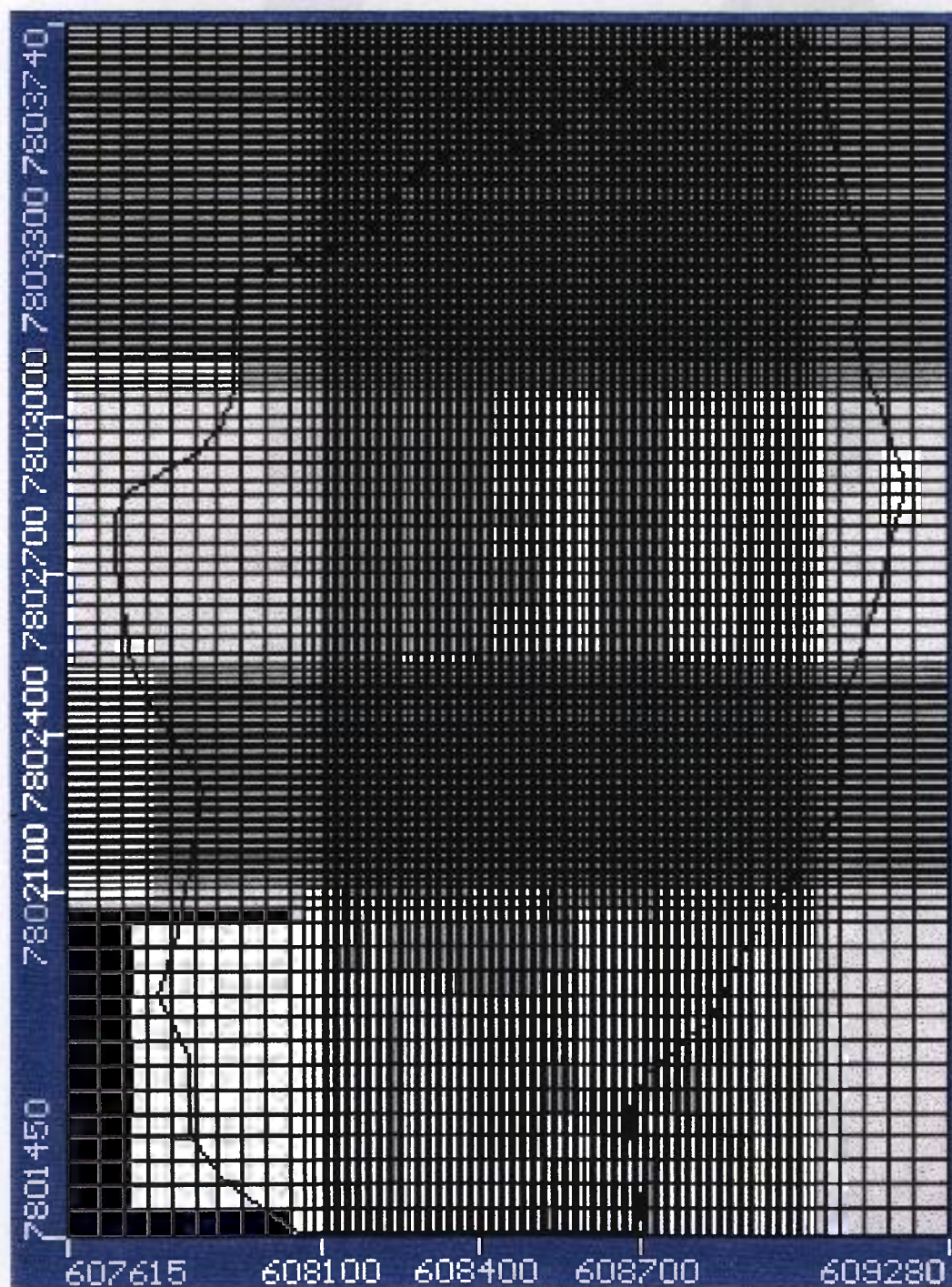


Figura 7.4: Desenho da malha utilizada no modelo numérico. Imagem gerada pelo *VisualMODFLOW*. Nota-se o traçado do contorno da área de estudo.

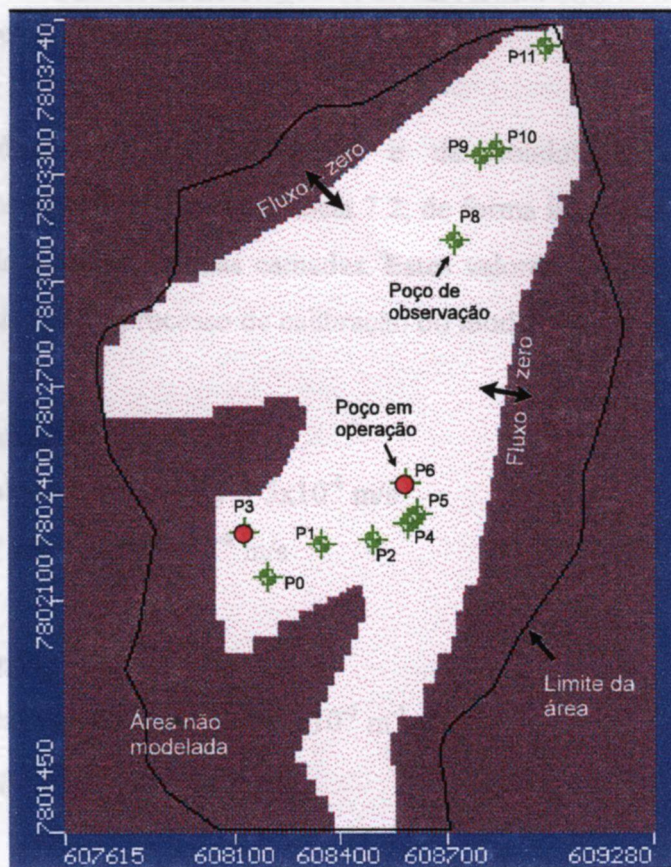


Figura 7.5: Configuração em planta da camada 2 - aquífero fissural. Nota-se a restrição imposta à área de ocorrência (em branco) desta camada, limitando-a à região sob as áreas de drenagem.

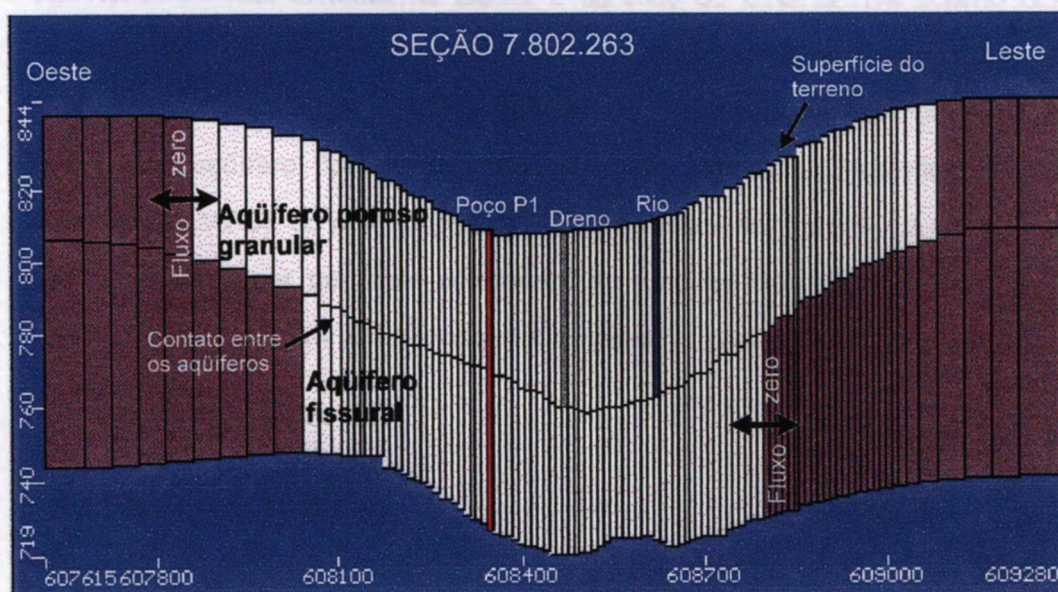


Figura 7.6: Seção vertical mostrando os limites das duas camadas aquíferas, o poço P1, uma célula contendo um dreno e outra o córrego do Engenho Nogueira.

7.4.2 - Parâmetros Hidrodinâmicos.

Para os dados de armazenamento e da condutividade hidráulica utilizou-se preliminarmente os valores médios da Tabela 7.2, de forma invariável para todas as células da malha, abrangendo portanto as duas camadas. Estes valores são dados iniciais que poderiam sofrer alterações durante o processo de calibração do modelo.

Condutividade Hidráulica

na horizontal = $K_h = K_x = K_y = 5 \times 10^{-6}$ m/s

na vertical = $K_v = K_z = 5 \times 10^{-8}$ m/s

Armazenamento

armazenamento específico = $S_s = 1 \times 10^{-5}$ m⁻¹

produção específica = $S_y = 0,09$

A modelagem do fluxo no meio fraturado requer algumas considerações. Sabe-se que o aquífero fissural é composto por uma matriz rochosa densa com porosidade primária baixa ou nula, cortada por um sistema de microfissuras, fraturas e juntas que geram uma porosidade secundária e formam uma rede de fluxo quando interconectadas. As propriedades hidráulicas têm características distintas na matriz e na rede de fraturas. De acordo com Anderson e Woessner (1992), o meio fraturado é normalmente modelado segundo um destes conceitos: meio poroso equivalente (MPE); fraturas discretizadas; e dupla porosidade. No presente trabalho, o aquífero fissural foi modelado pelo método de aproximação do meio poroso equivalente (MPE), no qual as porosidades primária e secundária e a condutividade hidráulica são substituídas por um meio *continuum* de propriedades hidráulicas equivalentes, e que à princípio receberam os valores expostos acima, e portanto iguais aos estabelecidos para a camada 1.

7.4.3 - Poços em Operação

Os poços tubulares P3 e P6, atualmente em operação, foram locados na malha, respectivamente nas células (linha/coluna) 08/31 e 70/61. Na Figura 7.7 mostra-se o mapa de localização dos poços em operação, assim como de outros parâmetros definidos para o modelo

numérico, os quais serão discutidos nos itens subsequentes. Como não se tem informação sobre a posição dos filtros nos poços P3 e P6, optou-se posicioná-los de forma contínua, ao longo de toda as suas extensões. As taxas de bombeamento utilizadas foram de $48 \text{ m}^3/\text{dia}$ no poço P3 e $76 \text{ m}^3/\text{dia}$ no poço P6 (vide Item 7.2).

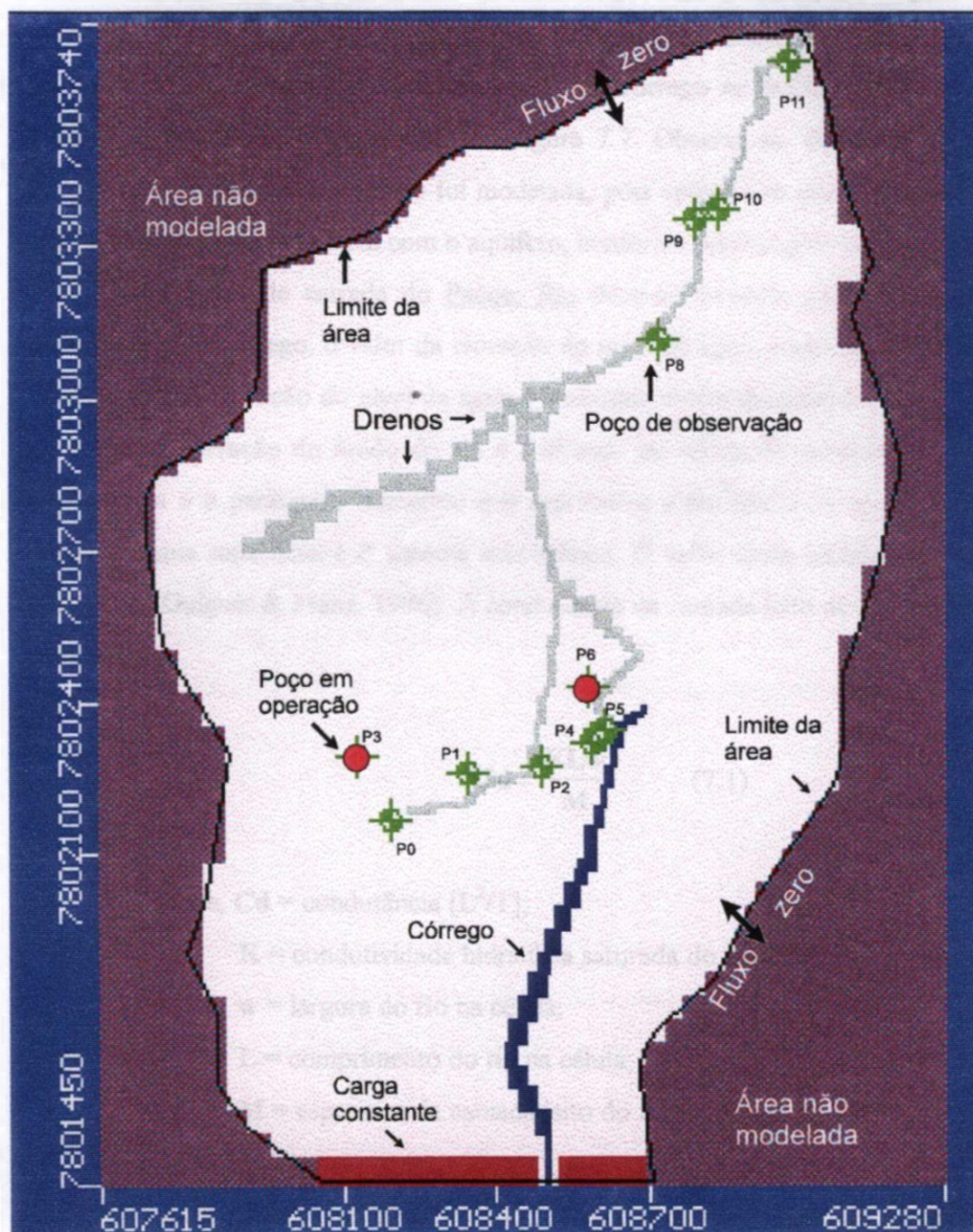


Figura 7.7: Mapa gerado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a localização dos principais parâmetros utilizados na modelagem numérica. A ilustração representa a camada 1- aquífero poroso granular.

7.4.4 - Dados de Contorno

7.4.4.1 - Rio

Para a simulação do fluxo de água entre o córrego do Engenho Nogueira e o sistema aquífero, utilizou-se o Pacote do Rio (*River Package*) do *MODFLOW*. O primeiro passo para a implementação deste pacote é a localização do córrego na malha, apenas nos domínios da camada 1, conforme pode ser visto na Figura 7.7. Observa-se, nesta Figura, que apenas a porção não canalizada do córrego foi modelada, pois entende-se que o trecho canalizado não possui comunicação hidráulica com o aquífero, conforme informações não referenciadas.

Como dados de entrada do Pacote Rio deve-se fornecer para cada uma das células abrangidas pelo córrego, o valor da elevação do nível da água, a elevação do fundo do rio e a condutância. A elevação do nível da água é a altitude média da superfície da água do córrego na célula. A elevação do fundo do rio é a altitude do fundo da camada leito do córrego. A condutância é o parâmetro numérico que representa a facilidade da água em fluir entre um corpo de água superficial e o sistema subterrâneo. O valor deste parâmetro é tipicamente de calibração (Guiguer & Franz, 1996). A condutância da camada leito de um rio é calculada pela equação:

$$Cd = \frac{KLw}{M} \quad (7.1)$$

onde, **Cd** = condutância [L^2/T];

K = condutividade hidráulica saturada do material constituinte do leito;

w = largura do rio na célula;

L = comprimento do rio na célula;

M = espessura da camada leito do rio na célula.

Na Tabela 7.7 encontram-se os dados utilizados na modelagem do córrego do Engenho Nogueira. Fornecendo-se os valores da célula mais a montante do córrego, ou célula inicial, e a célula mais a jusante, ou célula final, as demais células tiveram seus valores altimétricos calculados automaticamente pelo *VisualMODFLOW*.

Tabela 7.7: Dados utilizados na modelagem do córrego do Engenho Nogueira.

Posição	Localização (linha/coluna)	Elevação do nível da água (m)	Elevação do fundo da camada leito (m)	Condutância (m ² /dia)
início	142/52	813,5	811	1,4
fim	98/72	803	800,5	1,4

Os valores da elevação do nível da água foram estimados a partir da análise dos mapas topográficos disponíveis, e representam os valores médios da Tabela 7.4. A elevação do fundo da camada leito foi calculada supondo-se 0,5 m de lâmina d'água no córrego e 2 m de espessura para a sua camada leito. O valor de 1,4 m²/dia atribuído para a condutância em cada célula do córrego foi estimado com base nos seguintes critérios: (1) as observações de campo mostraram ser bastante razoável adotar uma largura média de 4 m para o córrego; (2) como a configuração final do córrego na malha resultou em 910 m de comprimento, subdivididos em 56 células, calculou-se um comprimento médio do córrego por célula de 16 m, e; (3) para a camada leito estabeleceu-se uma espessura média de 2 m, o que é razoável, e uma condutividade hidráulica igual à média dos valores das condutividades hidráulicas horizontal e vertical calculadas para o sistema aquífero, ou seja, 5×10^{-7} m/s. Reconhece-se a dificuldade em definir um valor para a condutância, mas sabe-se que ele é um valor tido como de calibração (Guiguer & Franz, 1996), e, portanto, sofrem normalmente ajustes durante o processo de calibração do modelo.

7.4.4.2 - Drenos

Para a modelagem do sistema de drenos utilizou-se o Pacote do Dreno (*Drain Package*) do *MODFLOW*. A implementação numérica do dreno é muito semelhante com a do rio. A localização dos drenos dentro da malha pode ser vista na Figura 7.7. Eles foram implantados apenas na camada 1. Para cada célula dos drenos forneceu-se o valor da elevação do mesmo e de sua condutância. A condutância do dreno pode ser calculada de forma similar àquela calculada para o rio, bastando aplicar a Equação (7.1) no contexto do dreno. A elevação do dreno é entendida como sendo a própria elevação do nível da água dentro do dreno. Na Tabela 7.8 estão mostrados os dados empregados para cada um dos subsistemas de drenos definidos na área (vide Capítulo 6, Item 6.5.6). Os rótulos “Inicial” e “Final” referem-se respectivamente

aos valores definidos para as células localizadas nos extremos opostos dos drenos, no sentido altimétrico decrescente.

O valor de 1,0 m²/dia, atribuído para a condutância em todas as células dos drenos, foi estimado supondo-se que os drenos teriam uma condutância cerca de 30 % menor do que o córrego. Da mesma maneira como já foi exposto para o córrego, este valor da condutância do dreno será retificado ou ratificado durante a calibração do modelo.

Tabela 7.8: Dados dos drenos empregados na simulação. SD1 = subsistema Reitoria-Horto, SD2 = subsistema Veterinária-Reitoria, SD3 = subsistema CDTN-Reitoria e SD4 = subsistema COLTEC-ICEX velho.

Subsistema de drenos	Localização inicial (linha/coluna)	Localização final (linha/coluna)	Elevação Inicial (m)	Elevação Final (m)	Condutância (m ² /dia)
SD1	69/54	2/104	794,6	789,1	1,0
SD2	79/07	69/53	798,6	794,6	1,0
SD3	119/25	70/54	800,6	794,6	1,0
SD4	102/64	82/55	799,1	797,2	1,0

7.4.4.3 - Carga Constante

Um dos pontos considerados críticos no modelo, devido à ausência de informações, é o extremo sul da área, particularmente a sua seção de entrada, compreendida entre os divisores hidrológicos da bacia e constituída pelas células da linha 142, que é a primeira linha no sul da malha. Todo o volume de água, superficial ou subterrâneo, proveniente do escoamento à montante, entra na área através desta seção. Optou-se por colocar, neste local, uma condição de contorno do tipo 1, com carga especificada. Esta condição foi implementada através do © Pacote da Carga Constante (Constant Head Package) do MODFLOW.

Os valores da carga hidráulica definidos para cada uma das células localizadas na seção de entrada da área são resultados de uma expectativa baseada nos níveis da água subterrânea observados nos poços tubulares monitorados e na declividade do terreno. Portanto, estes dados ainda serão retificados ou ratificados durante o processo de calibração.

Na Figura 7.7 apresenta-se a localização das células onde se definiu carga constante, enquanto que na Tabela 7.9 encontram-se os dados de entrada utilizados no Pacote da Carga Constante. Fornecendo-se os valores da carga nos extremos da seção, as células intermediárias têm seus valores calculados automaticamente pelo programa.

Tabela 7.9: Dados de entrada para a carga hidráulica constante.

Posição	Localização inicial (linha/coluna)	Carga hidráulica inicial (m)	Localização final (linha/coluna)	Carga hidráulica final (m)
Margem esquerda do Córrego	142 / 22	822	142 / 51	815
Margem direita do Córrego	142 / 53	815	142 / 72	822,5

7.4.4.4 - Recarga

A recarga da água subterrânea é tratada no *MODFLOW* pelo Pacote da Recarga (*Recharge Package*). Empregou-se uma recarga anual de 643 mm/ano para todas as células da malha. Este valor corresponde a uma taxa de recarga aproximadamente equivalente à cerca de 33% da precipitação total verificada no período avaliado, que vai de dezembro de 1995 a novembro de 1996 (vide Tabelas 6.4 e 7.4).

7.5 - Calibração e Resultados Obtidos com a Execução do Modelo em um Regime Estacionário.

7.5.1 - Objetivos da Simulação em Regime Estacionário

Numa simulação estacionária todos os parâmetros definidos para o modelo se mantêm invariáveis ao longo do tempo. Os principais objetivos desta simulação foram:

- estabelecer um modelo calibrado com base nos níveis freáticos estáticos observados nos poços de observação para um determinado período;
- avaliar os dados de campo e o modelo hidrogeológico proposto;
- verificar a sensibilidade do modelo em função da variação de parâmetros;
- produzir, como resultado da simulação, um banco de dados contendo a distribuição espacial final das cargas hidráulicas, calculadas na simulação, as quais serão empregadas como as cargas iniciais para a futura simulação em regime transiente.

7.5.2 - Parâmetros Empregados na Execução do Modelo em Regime Estacionário.

Para a execução do modelo, o *VisualMODFLOW* oferece um grupo de opções (*Run Options*) que devem ser definidas pelo usuário. Apresenta-se a na Tabela 7.10 as opções empregadas na execução do modelo para o regime estacionário. Para maiores informações sobre cada uma destas opções de execução, deve-se consultar o Apêndice D e/ou o manual do *VisualMODFLOW* (Guiger & Franz, 1996).

Tabela 7.10: Opções de execução (*Run Options*) adotadas para a execução do modelo no regime estacionário. Estas opções estão disponibilizadas no *VisualMODFLOW* e são requisitos do código *MODFLOW*.

PARÂMETROS	OPÇÕES SELECIONADAS
Tipo de Execução	estacionária
Cargas Iniciais	830 m, para as duas camadas
Resolvedor	WHIS (Waterloo Hydrogeologic Solver)
Número Máximo de Iterações mais Externas	50
Número Máximo de Iterações mais Internas	500
Critério de Variação de Carga p/ Convergência	0,01 m
Critério do Residual para Convergência	0,001
Fator de <i>Dampening</i> p/ Iteração mais Externa	1
Critério para o Residual	0
Nível de fatorização	1
Opção de Recarga	recarga na célula mais elevada de cada coluna vertical
Tipo de Camada Aquífera	camada 1: tipo 1, não confinada ou livre camada 2: tipo 3, confinada/não confinada
Opções BCF (Block-Centered Flow Package)	
Ativação do Molhamento da Célula	não
Anisotropia	camada 1: 1.00 ; camada 2: 1.00

7.5.3 - Calibração e Resultados Obtidos.

O processo de calibração do modelo consistiu na realização de ajustes no conjunto de valores inicialmente definidos (Item 7.4) para os parâmetros hidrodinâmicos e condições de contorno, de modo a se estabelecer um novo conjunto de valores, capazes de permitir ao modelo uma melhor reprodução das alturas médias dos níveis freáticos observadas nos poços monitorados no período de dezembro-95 a novembro-96 (vide Tabela 6.18 e Item 6.5.5 do Capítulo 6). Durante a calibração, os valores foram alterados, a princípio, dentro de uma faixa de variação pré-estabelecida. Por exemplo, para a condutividade hidráulica, os limites de variação foram estabelecidos pelos seus valores máximo e mínimo, conforme estão apresentados na Tabela 7.3.

O programa *VisualMODFLOW* possui um pacote especial para auxiliar na calibração do modelo. Este pacote, denominado de Pacote de Calibração (*Calibration Package*), possibilita que os valores de carga hidráulica ou nível freático, definidos para cada um dos poços de observação, sejam armazenados e posteriormente comparados e correlacionados estatisticamente com as cargas hidráulicas calculadas na simulação.

A calibração foi realizada segundo o método de tentativa e erro. O modelo foi julgado calibrado quando os dados empregados na simulação foram coerentes e o valor calculado para o desvio padrão pela Equação 3.25 (vide Capítulo 3, Item 3.4.5), após tentar-se minimizá-lo, foi menor ou igual a 5 % da diferença entre o maior e o menor valor de carga hidráulica calculada para a área, como mostrado na Tabela 7.11.

Tabela 7.11: Análise dos resultados finais da calibração do modelo em regime estacionário.

Carga hidráulica máxima calculada	835 m
Carga hidráulica mínima calculada	785 m
Varição de Carga Hidráulica	50 m
Erro Admissível (5%)	2,5 m
Desvio Padrão Calculado	1,65 m

Na Tabela 7.12 encontram-se os valores de carga hidráulica calculados e observados para cada um dos poços de observação utilizados na simulação. Na Figura 7.8 apresenta-se o gráfico da correlação entre estes valores, cujo o coeficiente de correlação calculado foi de 0,935.

Tabela 7.12: Comparação entre os valores do nível freático ou carga hidráulica, calculadas pelo modelo computacional nos poços de monitoração, para um regime estacionário, com os valores médios do nível freático medidos nestes poços, para o período de Dez/95 a Nov/96.

Poços	Carga Hidráulica Calculada (m)	Carga Hidráulica Observada (m)	Calculada menos Observada (m)
P0	811,17	811,48	-0,31
P1	803,06	805,12	-2,06
P2	801,00	804,36	-3,36
P4	802,60	800,52	2,08
P5	801,86	800,27	1,59
P8	795,66	795,66	0
P9	793,97	795,12	-1,15
P10	793,02	793,27	-0,25
P11	790,31	791,17	-0,86

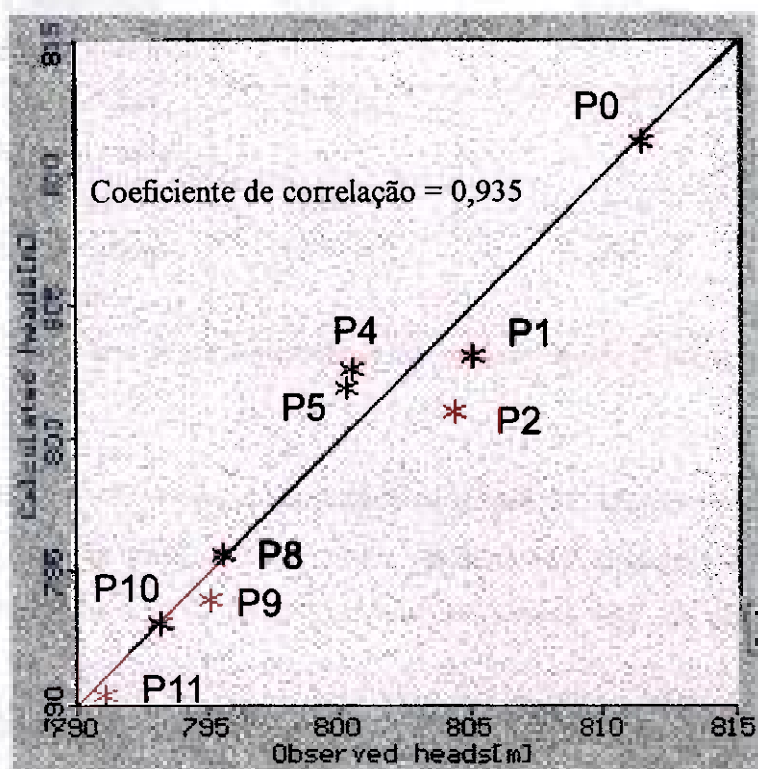


Figura 7.8: Gráfico elaborado pelo *VisualMODFLOW*, mostrando a correlação entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo, em regime estacionário, versus os valores médios observados para o período de Dez/95 a Nov/96, em cada um dos poços monitorados.

A Tabela 7.13 apresenta uma comparação entre o conjunto de valores atribuídos aos parâmetros hidrodinâmicos e às condições de contorno (vide Item 7.4) antes e após a calibração do modelo. Os parâmetros de armazenamento (S_s e S_y) não têm influência sobre os resultados da simulação em regime estacionário.

Tabela 7.13: Comparação entre o conjunto de valores definidos no projeto do modelo, antes do processo de calibração, com aqueles resultantes dos ajustes realizados durante a calibração do modelo.

Camadas	Parâmetros	Valores pré-calibração	Valores pós-calibração	Pós-calibração / pré-calibração
Aqüífero poroso granular (camada 1)	Condutividade hidráulica horizontal	5×10^{-6} m/s no geral e na lente de argila*	5×10^{-6} m/s no geral e 3×10^{-6} m/s na lente de argila	1 0,6
	Condutividade hidráulica vertical	5×10^{-8} m/s no geral e na lente de argila	5×10^{-8} m/s no geral e 3×10^{-8} m/s na lente de argila	1 0,6
	Produção específica	0,09	0,09	1
	Condutância no rio	1,4 m ² /dia	14 m ² /dia	10
	Condutância dreno	1,0 m ² /dia	10 m ² /dia	10
	Recarga	643 mm/ano	600 mm/ano	0,9
Aqüífero fissural (camada 2)	Condutividade hidráulica horizontal	5×10^{-6} m/s	5×10^{-8} m/s	0,01
	Condutividade hidráulica vertical	5×10^{-8} m/s	5×10^{-10} m/s	0,01
	Produção específica	0,09	0,09	1
	Armazenamento específico	1×10^{-5} m ⁻¹	1×10^{-5} m ⁻¹	1

Obs.: * trata-se da espessa lente de argila mapeada no extremo norte da área de estudo.

Nas Figuras 7.9 e 7.10 são apresentados os mapas de contorno equipotencial, obtidos, respectivamente, para as camadas 1 e 2, como resultados da execução do modelo no regime estacionário. As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 mostram seções verticais elaboradas sobre estes mapas.

Em relação às cores adotadas pelo *VisualMODFLOW* e as setas que representam a direção de fluxo da água subterrânea, utilizadas nos mapas e seções verticais com contornos equipotenciais, deve-se entender que:

1. em planta, as setas verdes representam o fluxo no plano horizontal, as vermelhas o fluxo ascendente (de baixo para cima), enquanto que as azuis o fluxo descendente (de cima para baixo), e;
2. em perfil, as setas verdes representam o fluxo no plano da seção, as vermelhas o fluxo de sul para norte, no caso particular da disposição geográfica do modelo em questão, e as azuis de norte para sul.

Quando se analisa conjuntamente as Figuras 7.9, 7.11, 7.12 e 7.13, chega-se as seguintes considerações gerais sobre o escoamento da água no aquífero poroso granular (camada 1):

1. o fluxo da água subterrânea é praticamente sub-horizontal sob o topo e porções mais elevadas das vertentes das colinas;
2. Sob as regiões de meia e baixa encosta, e nas proximidades do córrego do Engenho Nogueira (leito não canalizado), o fluxo “mergulha” para dentro do aquífero, ou seja, se movimenta de forma descendente, e;
3. na região de várzea, dominada pelo sistema de drenos, e localizada nas porções centrais e norte da área de estudo, o fluxo da água subterrânea sofre forte inflexão ascendente.

Ao se analisar as Figuras 7.10, 7.11, 7.12 e 7.13, concluiu-se que as mesmas considerações feitas para o fluxo no aquífero poroso se aplicam para o escoamento da água subterrânea no aquífero fissural (camada 2). A única exceção é que a camada 2 não tem presença significativa sob o topo e porções mais elevadas das vertentes das colinas, resultando na ausência de fluxo sub-horizontal na camada.

As Figuras 7.11 e 7.12 ilustram, com base na distribuição das linhas equipotenciais, o escoamento da água subterrânea indo do aquífero para, respectivamente, o córrego do Engenho Nogueira e o dreno. O efeito que o bombeamento do poço P6 causa sobre o traçado/distribuição das linhas equipotenciais está mostrado na Figura 7.13.

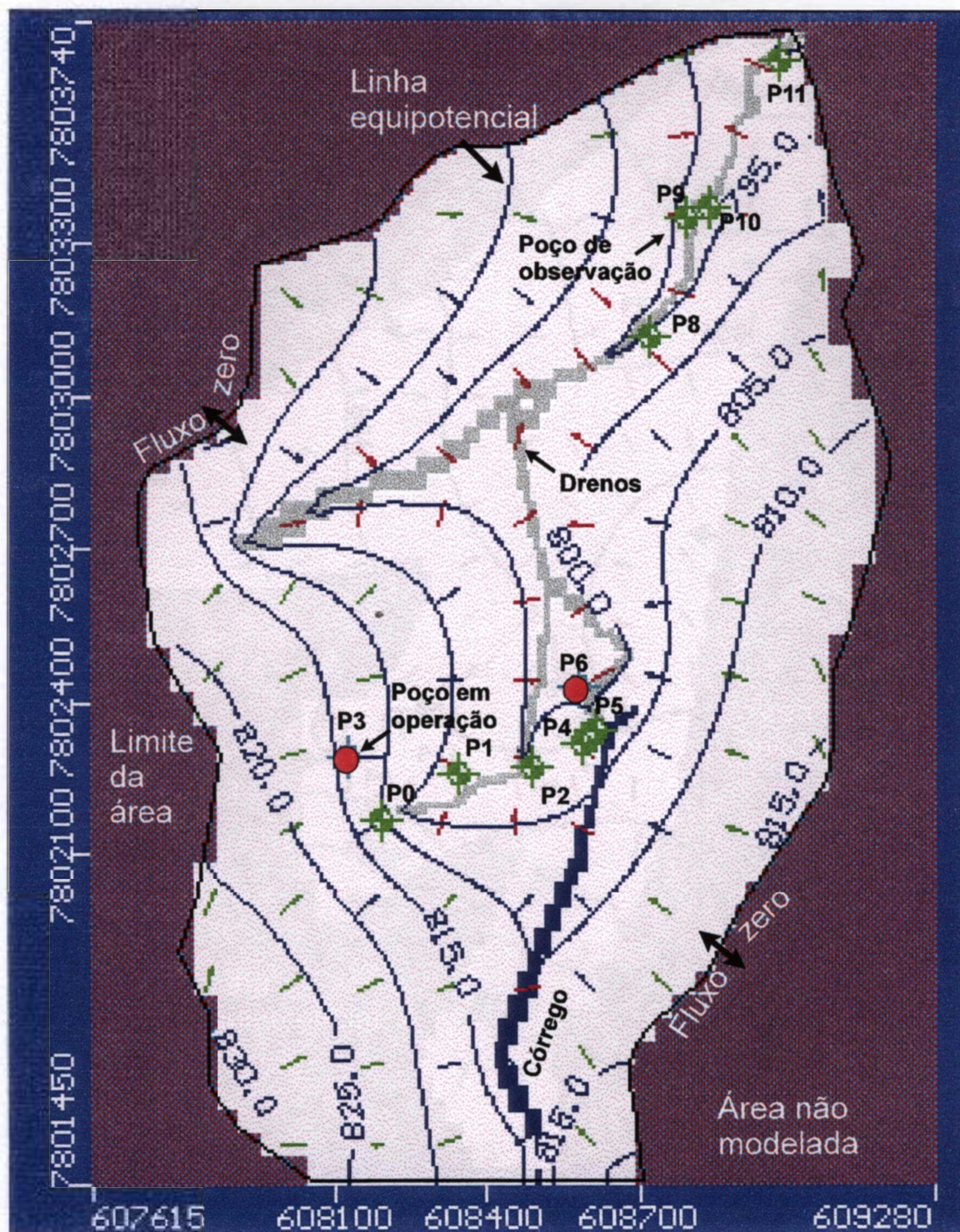


Figura 7.9: Mapa com as linhas equipotenciais na camada 1, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam a direção de fluxo, sendo que as verdes retratam fluxo no plano, as vermelhas o fluxo ascendente (de baixo para cima) e as azuis o contrário.

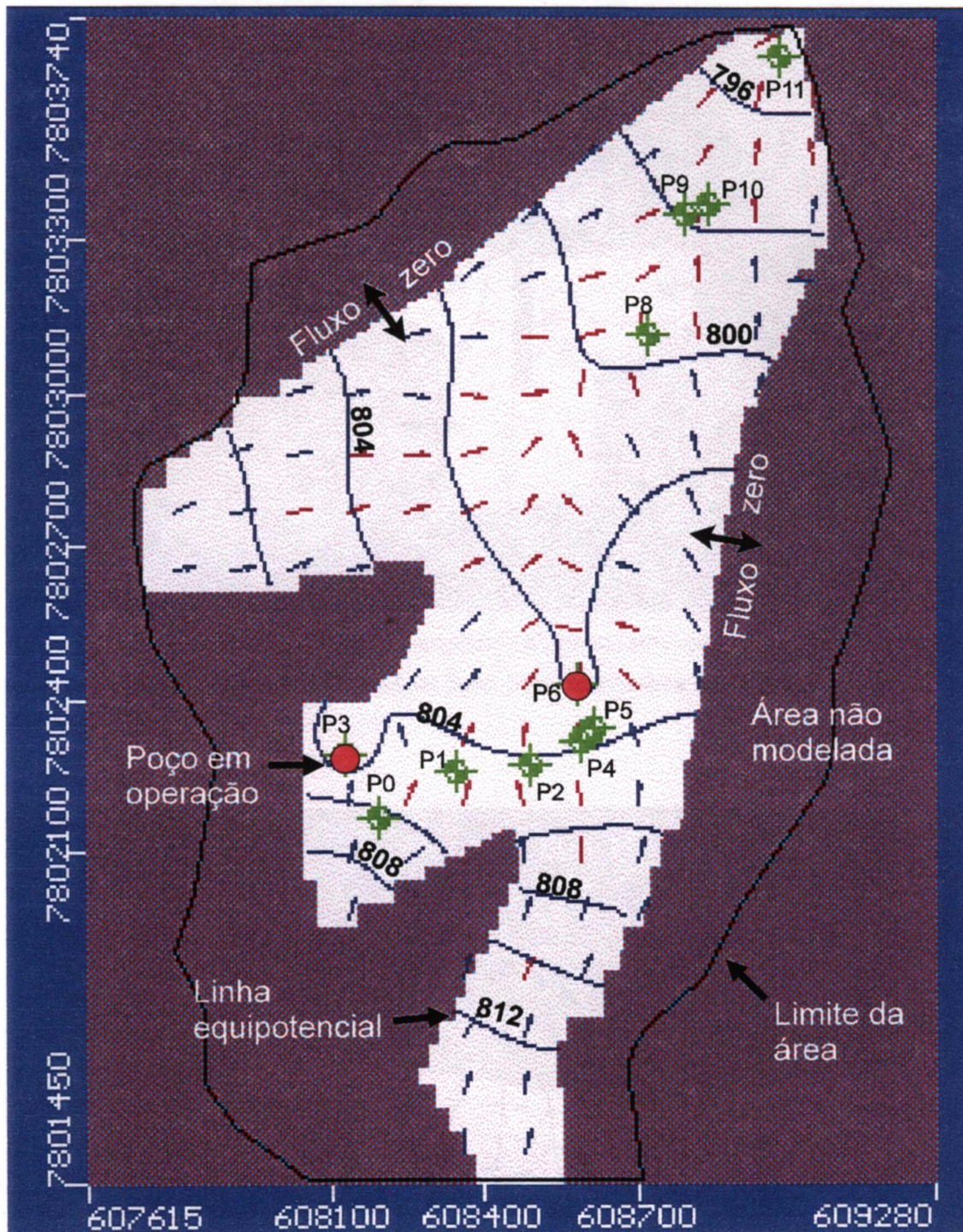


Figura 7.10: Mapa com as linhas equipotenciais na camada 2, resultantes da simulação estacionária. A imagem foi gerada pelo *VisualMODFLOW*. As setas indicam o sentido do fluxo, sendo que as vermelhas de representam o fluxo ascendente (de baixo para cima), e as azuis o contrário, fluxo descendente.

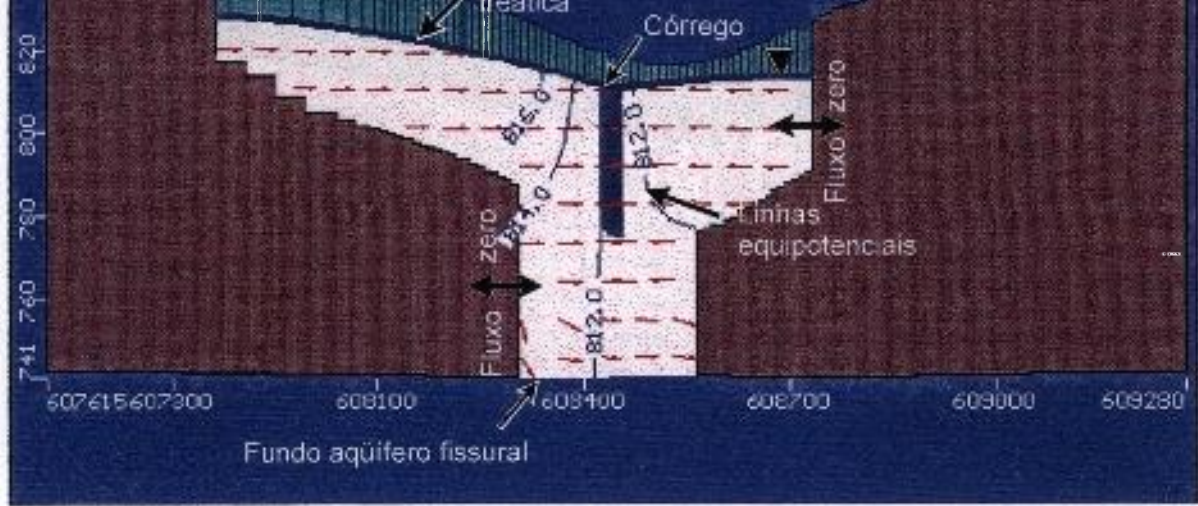


Figura 7.11: Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte.

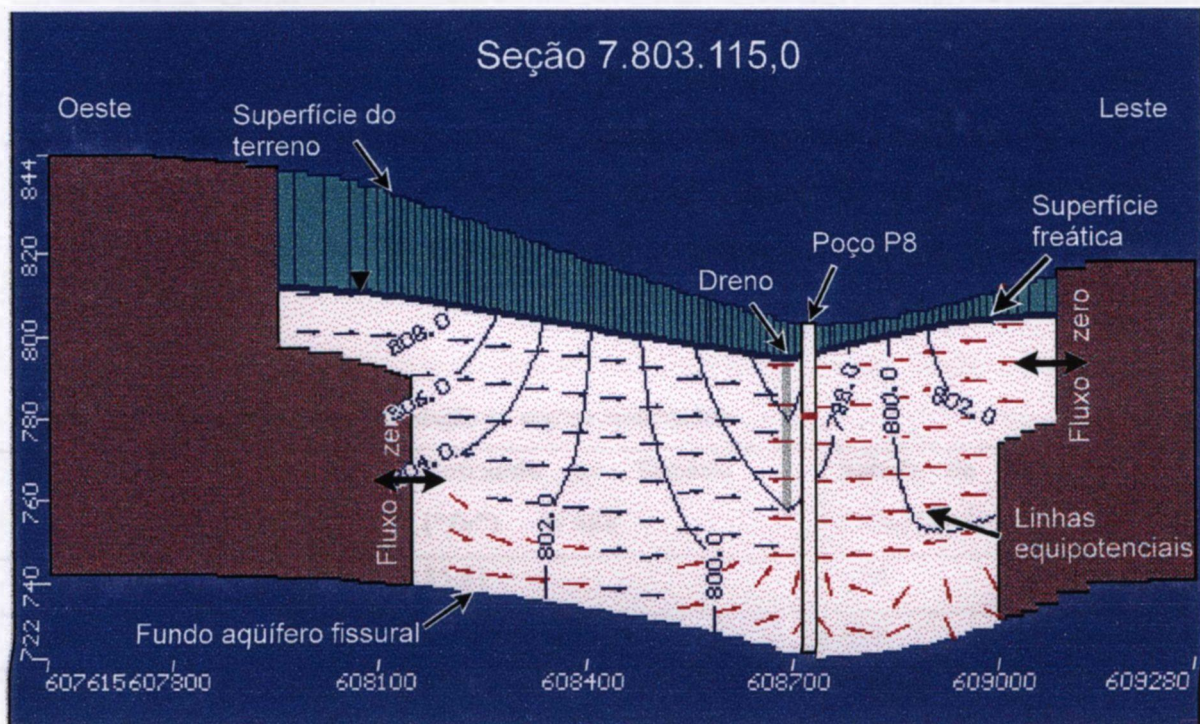


Figura 7.12: Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P8 foi utilizado na calibração do modelo.

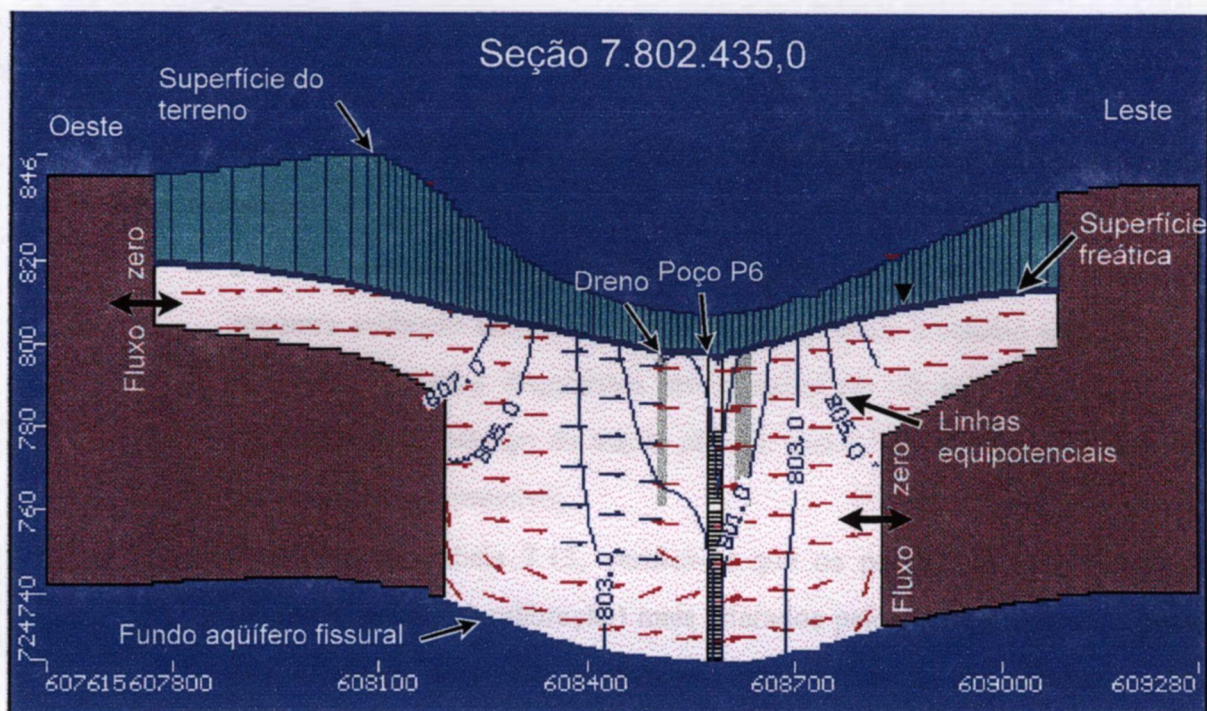


Figura 7.13: Seção vertical com as curvas equipotenciais obtidas com a execução do modelo para um regime estacionário. As setas de cor vermelha indicam fluxo da água subterrânea de sul para norte, enquanto as azuis de norte para sul. O poço P6 encontra-se em operação: 76 m³/dia.

Pode-se observar na Tabela 7.14 que o balanço de massa calculado pelo *MODFLOW*, apresentou um percentual de discrepância bastante satisfatório, -0,01 %, indicando um erro pouco significativo na solução numérica, já que valores de discrepância em torno de 1% são usualmente considerados aceitáveis (Anderson & Woessner, 1992).

Tabela 7.14: Balanço de massa. Simulação no regime estacionário.

Parâmetro	Entrando no Sistema ("In") m ³ /dia	Saindo do Sistema ("Out") m ³ /dia
Carga Constante	85,81	6,05
Poços	0	124
Drenos	0	3145,60
Recarga	3861,60	0
Drenança do rio	46,82	718,86
Total	3994,23	3994,51
"Entra-Sai"=-0,28 m ³ /dia	Discrepância%= -0,01	

7.5.4 - Considerações sobre a Simulação em Regime Estacionário.

Ressalta-se as seguintes considerações sobre a implementação do modelo numérico no regime estacionário:

- a análise estatística dos resultados da calibração mostrou que o modelo se encontra calibrado em um regime estacionário, para o cenário adotado e tendo por base os dados disponíveis até o momento. O valor calculado para a discrepância no balanço de massa indicou que a solução numérica apresentou um erro pouco expressivo;
- Com base na Tabela 7.13, verifica-se que os parâmetros que tiveram seus valores iniciais (pré-calibração) mais alterados pelos ajustes feitos no processo de calibração, foram a condutância dos drenos e do córrego, as quais aumentaram 10 vezes, e as condutividades hidráulicas horizontal e vertical do aquífero fissural (camada 2), que sofreram uma diminuição de 100 vezes. No caso específico do córrego, admite-se que o aumento verificado no valor da sua condutância corresponde a uma elevação na mesma ordem de grandeza no valor da condutividade hidráulica da camada leito, que passou a ser de 5×10^{-6} m/s, portanto igual ao valor médio calculado para o sistema aquífero. Para tal correspondência, assumiu-se como invariáveis os demais termos da Equação 7.1;
- embora a condutância dos drenos e do córrego, juntamente com a condutividade hidráulica da camada 2, tenham sido os parâmetros que sofreram as variações mais expressivas nos seus valores, como resultado da calibração do modelo, observou-se, no entanto, que em termos comparativos o modelo é muito mais sensível às variações nos valores da condutividade hidráulica da camada 1 e da recarga. Ainda que de forma qualitativa, pôde-se verificar a seguinte sensibilidade paramétrica do modelo, em ordem decrescente de importância:
 1. condutividade hidráulica da camada 1;
 2. recarga;
 3. condutância dos drenos e do córrego;

4. condutividade hidráulica da camada 2;

- de forma geral, e como se esperava, toda a água subterrânea do sistema aquífero local (camadas 1 e 2), escoou preferencialmente das colinas para a várzea, e de sul para norte. A água subterrânea movimentou-se de forma sub-horizontal à descendente sob as colinas e nas proximidades do leito natural do córrego do Engenho Nogueira, sofrendo forte inflexão ascendente na região de várzea dominada pelo sistema de drenos, localizada nas porções central e norte da área de estudo.
- o sistema de drenos exerce forte domínio sobre a dinâmica do fluxo da água subterrânea local. A superfície freática local é controlada pelo sistema de drenos e pelo córrego do Engenho Nogueira;
- o córrego do Engenho Nogueira recebe nitidamente água proveniente do aquífero, nas suas porções central e sul. A situação se altera nas proximidades do trecho canalizado, onde o córrego tanto recebe água do aquífero, na sua margem direita, quando cede ao sistema subterrâneo a partir de sua margem esquerda;
- quando se anula a influência dos drenos, observa-se em simulação o afloramento da água subterrânea em vários locais da área de estudo;
- uma das incertezas significativas do modelo são os valores da condutância definidos para as células dos drenos e do córrego;
- Dispendeu-se muito tempo com a estruturação do modelo, antes mesmo de se iniciar o processo de calibração. Foram criados 32 versões de modelos intermediários até se chegar ao modelo final calibrado. Para cada um destes modelos estima-se ter realizado em média cerca de 20 simulações, perfazendo um total de 640 simulações. O modelo final convergiu após 8 iterações externas. ©

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“Qualquer teoria física é sempre provisória, no sentido de que não passa de uma hipótese: não pode ser comprovada jamais. Não importa quantas vezes os resultados de experiências concordem com uma teoria, não se pode ter certeza de que, na próxima vez, o resultado não vá contradizê-la. Por outro lado, pode-se rejeitar qualquer teoria ao se descobrir uma única observação que contrarie suas previsões.”

(Hawking, 1988).

Diante dos resultados obtidos e das considerações já apresentadas, concluiu-se que:

1. os objetivos propostos para este estudo foram plenamente alcançados, uma vez que:
 - representa uma contribuição ao conhecimento da dinâmica da água subterrânea no sistema aquífero estudado, ampliando e sistematizando as informações sobre a hidrogeologia local;
 - permitiu a qualificação do autor no campo da modelagem, particularmente no domínio da “ferramenta” *MODFLOW*;
 - a modelagem cumpriu seu propósito, na medida que obteve-se pleno êxito na calibração do modelo em regime estacionário, o que possibilitou a reprodução do escoamento da água subterrânea no sistema aquífero estudado. O modelo contribuiu de forma significativa para a organização, visualização espacial e avaliação dos dados medidos e estimados para o sistema hidrogeológico local, além de indicar quais os locais ou parâmetros merecedores de mais investigações de campo, de modo a minimizar as incertezas nos modelos conceitual e numérico;

2. embora se tenha chegado a um conjunto de valores, para os parâmetros hidrodinâmicos e condições de contorno, que possibilitaram uma melhor simulação das alturas dos níveis freáticos observados no campo, reconhece-se que outros conjuntos de valores, distintos do primeiro, poderiam também proporcionar a calibração do modelo. Isto é possível porque ainda existe um número significativo de dados arbitrados ou inferidos no modelo, o que pode ser minimizado com a entrada de mais informações sobre a área de estudo.
3. a complexidade atribuída ao sistema hidrogeológico em estudo é tanto função das características geológicas/hidrogeológicas do terreno, como também, e principalmente, devido à existência no local de obras de engenharia que interferem na dinâmica hídrica subterrânea, tais como o sistema de drenos;
4. o processo e os resultados da modelagem de simulação do escoamento da água subterrânea permitiram identificar algumas incertezas no modelo numérico, que devem ser investigadas para aumentar a confiabilidade no uso do mesmo, tais como:
 - as condições de contorno. Por exemplo, ainda há pouco conhecimento sobre as características dos drenos, as relações hidráulicas entre o córrego do Engenho Nogueira e o sistema aquífero, a distribuição areal da recarga sobre a bacia e as condições na seção de entrada da área de estudo;
 - deficiências operacionais na execução dos testes de bombeamento, colocando sob suspeita os dados de campo e conseqüentemente os valores dos parâmetros hidrodinâmicos; ©
 - ausência de informação adequada sobre as variações espaciais das propriedades físicas (texturais e hidrodinâmicas) do sistema aquífero; e,
 - incertezas quanto à modelagem do aquífero fissural (camada 2), suas reais dimensões, suas propriedades hidrodinâmicas, e a validade ou não da modelagem deste aquífero como um meio poroso equivalente;
5. os trabalhos realizados visando a calibração do modelo em regime transiente, a partir da reprodução dos resultados observados nos testes de bombeamento, mostraram que somente quando se minimizar as incertezas descritas no Item 4, deste Capítulo, será possível realizar uma simulação calibrada, de forma confiável, em regime transiente;

6. como ainda não se calibrou o modelo em uma situação transiente, é prudente que este não seja utilizado em estudos de previsão e de transporte de contaminantes;
7. o *VisualMODFLOW* mostrou ser um gerenciador eficiente do *MODFLOW*, otimizando as operações de entrada de dados, edição e construção do modelo, além de possibilitar uma análise gráfica dos resultados e da calibração. Uma restrição que se faz ao *VisualMODFLOW* é o fato deste código não ter implementado o pacote do *stream* (*Streamflow - Routing Package* do *MODFLOW*), que poderia simular de forma mais realista a interação entre o córrego do Engenho Nogueira e o sistema aquífero.

Tendo por objetivo complementar os conhecimentos sobre o sistema aquífero local e, por consequência, contribuir para aumentar a representatividade do modelo, faz-se as seguintes recomendações:

1. implementação de pesquisas relativas às condições de contorno, priorizando: a) o sistema de drenos; b) o córrego do Engenho Nogueira; c) a distribuição areal da recarga em função das características do solo, vegetação e da impermeabilização do terreno devido a ocupação urbana; d) e as condições na seção de entrada da área de estudo.
2. instalação de poços de observação nas proximidades dos poços tubulares existentes, e realização de novos testes de bombeamento, dentro dos procedimentos técnicos[©] apropriados, possibilitando um novo cálculo para os parâmetros hidrodinâmicos;
3. perfuração de pelo menos dois poços tubulares profundos, os quais devem atravessar os dois aquíferos, e de dois poços rasos de observação adjacentes aos primeiros, visando principalmente:
 - a realização de ensaios de bombeamento independentes nas duas camadas aquíferas, com o objetivo de se obter informações sobre as propriedades hidrodinâmicas individuais destes aquíferos;
 - a aplicação de técnicas especiais, como o uso de traçadores, convencionais ou radioativos, e de sondas apropriadas, com a finalidade

de se verificar, no campo, o comportamento do fluxo da água subterrânea;

4. complementação dos poços de monitoração, de preferência do tipo multinível, de modo a permitir o registro das oscilações do nível freático, a identificação de variações verticais no valor da carga hidráulica e a coleta de amostras da água subterrânea para estudos hidroquímicos;
5. realização de sondagens no aquífero poroso visando o detalhamento espacial de suas variações texturais;
6. execução de sondagens profundas na região limítrofe da bacia hidrográfica, de modo a verificar o comportamento do aquífero fissural nestas regiões;
7. realização de análise de sensibilidade paramétrica do modelo;
8. e investigação geofísica do subsolo visando subsidiar a caracterização geológica/hidrogeológica da área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. 1992 - Applied Groundwater Modeling - Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, INC. U.S.A., 381p.
- ARCOS (Arquitetura - Construções - Ltda.) 1991 - Resultados de Sondagens de Reconhecimento do Subsolo realizadas na obra do Prédio da Escola de Música, Campus da UFMG, Pampulha.
- BARBOSA, G.V. & RODRIGUES, D.M.S. 1965 - O Quadrilátero Ferrífero e seus problemas geomorfológicos. Boletim Mineiro de Geografia, Belo Horizonte: V.6, n.10-11, pp.3-35.
- BRANCO, J.J.R. & BRANCO, W.S.R. 1969? - Estudo hidrogeológico da Região da Cidade Universitária. Belo Horizonte: UFMG.
- CHALFOUN, L. 1974 - Relatório Sobre Serviço de Recuperação dos Poços Artesianos pela CIA. T. JANER. UFMG, Belo Horizonte, 2p. Anexos: relatórios de testes de bombeamento.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. 1976 - Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, S. A. Barcelona, Espanha, 2359p 2v. ©
- DOMENICO, P. A. & SCHWARTZ, F. W. 1990 - Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, 824p.
- E.G.F. (Engenharia Geotecnia e Fundações Ltda) 1992 - Resultados das Sondagens Executadas na Obra do Prédio do Icx, Campus da UFMG, Pampulha.
- ENGESONDA (Engenharia de Sondagem Ltda.) 1979 - Relatório das Sondagens de Reconhecimento Executadas no Prédio Novo do ICEX, Campus da UFMG, Pampulha.

ENNES, Y. 1973 - Extração da Água Subterrânea: Projeto de instalações típicas. Belo Horizonte: UFMG, apostila da Escola de Engenharia/DESA.

EQUIPOÇOS 1995a - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.3 do setor I-Belas Artes/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 9p.

EQUIPOÇOS 1995b - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.2 do setor I-Belas Artes/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 12p.

EQUIPOÇOS 1995c - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.1 do setor I-Belas Artes/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 12p.

EQUIPOÇOS 1995d - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.4A do setor I-Belas Artes/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 6p.

EQUIPOÇOS 1995e - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.1 do setor I-Coltec/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 13p.

EQUIPOÇOS 1995f - Boletim de Perfuração do Poço Tubular no.2A do setor I-Coltec/UFMG, com teste de bombeamento e resultados analíticos. Belo Horizonte, 9p.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979 - Groundwater. Prentice Hall, Inc. U.S. 604p. ©

GUIGUER, N. & FRANZ, T. 1996 - VISUAL MODFLOW version 2.00. User's manual. Waterloo Hydrogeologic, Ontario, Canada.

GUIMARÃES JUNIOR, E. M. 1966a - Drenagem da Bacia "2", Folha no. "4". Escritório Técnico da Cidade Universitária da UFMG, Belo Horizonte, desenho no. 02.566, escala 1:5000.

GUIMARÃES JUNIOR, E. M. 1966b - Drenagem da Bacia "2", Folha no. "2". Escritório Técnico da Cidade Universitária da UFMG, Belo Horizonte, desenho no. 02.567, escala 1:5000.

GUIMARÃES JUNIOR, E. M. 1966c - Drenagem da Bacia "2", Folha no. "1". Escritório Técnico da Cidade Universitária da UFMG, Belo Horizonte, desenho no. 02.586, escala 1:5000.

GUIMARÃES JUNIOR, E. M. 1966d - Drenagem da Bacia "3", Folha no. "3". Escritório Técnico da Cidade Universitária da UFMG, Belo Horizonte, desenho no. 02.587, escala 1:5000.

GUIMARÃES JUNIOR, E. M. 1966e - Planta Geral das Drenagens e Bacias Hidrográficas. Escritório Técnico da Cidade Universitária da UFMG, Belo Horizonte, desenho no. 02.668, escala 1:5000.

HAWKING, S. W. 1988 - Uma Breve História do Tempo: Do BIGBANG aos Buracos Negros. Ed. Rocco, Rio de Janeiro 261p.

HIDROMIG 1992 - Carta à UFMG com os resultados obtidos com teste de compressor e certificados de análises físico-química e bacteriológica no poço do colégio técnico. Belo Horizonte 2p.

HIDROPOÇOS 1996 - Relatório do Teste de Vazão e análise bacteriológica do Poço tubular Profundo do CDTN. Belo Horizonte, 1p. ©

JORNAL DO BRASIL 1995 - A Guerra da Água. Rio de Janeiro, 13/08/95, pp10.

KONIKOW, L. F. & BREDEHOEFT, J. D. - Ground-water Models Cannot be Validated. Advances in Water Resources no.15 pp 75-83.

McDONALD, M. G. & HARBAUGH, W. 1988 - A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigation, Book6, chapter A1 USGS. Washington D.C, U.S.A., 576p.

- MENDES, C.M., MENDES, P., BRANCO, J. J. R. & COELHO, I. S. 1960 - Estudo geológico da área da Cidade Universitária., Relatório do Instituto de Pesquisas Radioativas, Belo Horizonte: UFMG, Escola de Engenharia .12p.
- MINASONDA LTDA. 1969 - Carta no. 306/69 à Prefeitura da Cidade Universitária da UFMG A/C Dr. Paulo Furtado, de 16 de dezembro de 1969. Assunto: Perfuração e teste de vazão do poço tubular P1. Belo Horizonte, 2p.
- MINASONDA LTDA. 1970 Carta no. 418/70 à Prefeitura da Cidade Universitária da UFMG A/C Dr Miguel de Souza, de 30 de setembro de 1970. Assunto: Teste de vazão do poço tubular P0. Belo Horizonte, 1p.
- MOURÃO, P. 1994 - Guerras futuras serão pelo uso da água doce. ESTADO DE MINAS, Belo Horizonte, 22/11/94, pp5.
- NEUMAN, S.P. 1975 - Analysis of Pumping Test Data From Anisotropic Unconfined Aquifers Considering Delayed Gravity Response. Water Resource Research, Vol.11, no. 2, pp 329-342.
- NOCE, C.M., MACHADO, N. & TEIXEIRA, W. 1994 - O Complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: 38 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos. Porto Alegre: SBG/DNPM/CPRM, V.1, p.68-69.
- NOGER, P. 1976 - Esboço geológico da área da Cidade Universitária. Instituto de Pesquisas Radioativas - IPR. Monografia de conclusão do Curso do projeto de formação e treinamento-UFMG/IPR, Belo Horizonte.
- NUCLEBRÁS. 1979 - Relatório de Análise de Segurança da Usina Piloto de Enriquecimento. Nuclebrás/CDTN, Belo Horizonte.
- OLIVEIRA, M. G. B. 1997 - Aplicação do Método do Soil Conservation Service para Estimar a Taxa de Recarga na Área do PROHBEN. Belo Horizonte, inédito.

PEIXOTO, C. M. & PÊGO, V. D. 1996 - Relatório de Avaliação dos Resultados Analíticos do Programa de Monitoração Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 1991 e 1992. Publicação CDTN-827/96, Belo Horizonte, 86p.

RAPOSO, C. 1997 - Estimativa de Recarga de Água em Zona não Saturada de Solos Utilizando o Trítio Artificial como Traçador. Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 110p.

REBOUÇAS, A. C. 1996 - Diagnóstico do Setor Hidrogeologia. Caderno técnico da ÁBAS no.3, São Paulo, 43p.

ROMANO, A.W., VIANA, C. S., FANTINEL, L. M. & LAUREANO, F. V. 1994 - Estruturação Geológica do sítio de Belo Horizonte-MG: O papel das estruturas antigas no compartimento neotectônico. In: 38 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos. Porto Alegre: SBG/DNPM/CPRM, V2, pp.260-261.

ROSA, S.A.G. 1976 - Esboço geomorfológico parcial da Cidade Universitária Instituto de Pesquisas Radioativas - IPR Monografia de conclusão do curso do projeto de formação e treinamento-UFMG/IPR, Belo Horizonte.

SALAS, H.T. 1995 - Caracterização mineralógica e litológica de amostra proveniente do poço tubular localizado próximo a Escola de Belas Artes da UFMG-BH. Relatório de estudos No. IN00506/95. CNEN/CDTN, Belo Horizonte, 10p.

SANEAMENTO AMBIENTAL. 1995 - Ano V, janeiro de 1995, revista no. 30, pp 9.

SEGURA, J. E. S. 1997 - Avaliação da Vulnerabilidade da Água Subterrânea À Contaminação com Praguicidas. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Dissertação de Mestrado (em andamento).

- SILVA, A.B., CARVALHÔ, E. T., FANTINEL, L. M., ROMANO, A. W. & VIANA, C. S. 1995 - Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte. Relatório final. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, FAPEMIG/UFMG/IGC, Belo Horizonte 150p, 7 anexos.
- SOUZA, S. M. T. 1995 - Disponibilidades Hídricas Subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Hidrossistemas/Copasa, Belo Horizonte, 525p.
- STARPOINT SOFTWARE. 1995 - Infinite Extent-Aquifer Pump and Recovery Test Analysis Software. User's Guide. U.S.A., 79p.
- UNCED 1992 -United Nations Conference on Environment and Development. Agenda 21, Rio de Janeiro, Vol. II, Cap. 18, 34p.
- VIEIRA, M.A. & DREWS, M.O.P. 1992 - Levantamento geofísico de eletrorresistividade no Campus da UFMG, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, Belo Horizonte, 14p.
- WREGGE, M. 1997 - Termos Hidrogeológicos Básicos. Editado pela ABAS, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, caderno técnico no. 4. 32p.

APÊNDICE A

Fatores de correção da evapotranspiração potencial mensal, dada pelo nomograma de Thornthwaite para ajustá-la ao número de dias do mês e a duração do brilho solar diário, nos vários meses do ano e latitudes entre 15 graus norte e 37 graus sul.

Lat.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Ma.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
15°N.	0,97	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
10°N.	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,05	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
5°N.	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Eq.	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5°S.	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10°S.	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15°S.	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20°S.	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22°S.	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23°S.	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24°S.	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25°S.	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26°S.	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27°S.	1,18	1,02	1,05	0,96	0,93	0,87	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28°S.	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°S.	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°S.	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°S.	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°S.	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23
33°S.	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
34°S.	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,16	1,24
35°S.	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
36°S.	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
37°S.	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

APÊNDICE B

DEFINIÇÃO DE ALGUNS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS

Síntese baseada em Freeze & Cherry (1979) e em Wrege (1997)

“ Existem 6 propriedades físicas básicas, do meio poroso e do fluido, que devem ser conhecidas para que se possa descrever às características hidráulicas do fluxo da água subterrânea no meio saturado. Em relação à água - a densidade ρ , a viscosidade μ e a compressibilidade β . Em relação ao meio - a porosidade total n , a permeabilidade ou permeabilidade intrínseca k e a compressibilidade α . “

Condutividade Hidráulica (*Hydraulic Conductivity*) (K)

Definição

É a constante de proporcionalidade K , presente na Equação de Darcy. Num conceito mais prático, pode ser descrita como a grandeza que representa a facilidade que um aquífero ou uma litologia apresenta, em promover a percolação de água sob um gradiente potencial. Fisicamente é a vazão que passa através de uma área unitária do aquífero, sob a ação de um gradiente hidráulico unitário, na unidade de tempo. Possui as dimensões da velocidade e é função não somente das características do meio físico como também do fluido.

Formulação

Os resultados obtidos com os experimentos realizados por Darcy, em 1856, foram generalizados numa lei empírica denominada de *Lei de Darcy*. Estes experimentos mostraram que:

$$v \propto -\Delta h$$

$$v \propto 1/\Delta l$$

onde, v = descarga específica ou velocidade de Darcy [L/T];

Δh = variação de carga hidráulica [L];

Δl = distância entre os pontos de observação de Δh [L].

Então, a *Lei de Darcy* pode ser escrita como:

$$v = -K \Delta h / \Delta l \quad (1)$$

sendo K a condutividade hidráulica [L/T] e $\Delta h / \Delta l$ o gradiente de carga hidráulica, que é a força motriz do escoamento do fluido.

Do experimento de Darcy se tem também que:

$$v = Q/A \quad (2)$$

onde, $Q = \text{vazão } [L^3/T]$;
 $A = \text{área da seção perpendicular ao fluxo } [L^2]$.

Relacionando as equações (1) e (2), chega-se à:

$$Q = -K \frac{\Delta h}{\Delta l} A \quad (3)$$

Sob a ação de um gradiente hidráulico constante, demonstrou-se (Hubert, 1940, 1956) que a condutividade hidráulica K é função tanto do meio físico como das características do fluido. Chegou-se às seguintes relações:

$$\begin{aligned} v &\propto d^2 \\ v &\propto \rho \\ v &\propto 1/\mu \end{aligned}$$

onde, $d = \text{diâmetro das partículas constituintes do meio}$;
 $\mu \approx \text{viscosidade do fluido, que é a propriedade do fluido resistir à taxa de cisalhamento e pode ser visualizado como um atrito interno}$;
 $\rho = \text{densidade do fluido}$.

Juntando estas três relações com a relação original de Darcy, $v \propto -\Delta h/\Delta l$, se tem que:

$$v = -\frac{C \cdot d^2}{\mu} \rho g \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (4)$$

onde, C é uma constante de proporcionalidade adimensional, que inclui outras propriedades do meio, como por exemplo o grau de seleção, a esferecidade e o arredondamento dos grãos constituintes do meio;
 $g = \text{aceleração da gravidade } [L^2/T]$

Relacionando as equações (1) e (4), se tem que:

$$K = C \cdot d^2 \frac{\rho g}{\mu} \quad (5)$$

na qual o termo $\rho g/\mu$ é função apenas do fluido, sendo por vezes denominado de "fluidez", e o termo Cd^2 é somente função do meio, podendo ser definido como:

$$k = C \cdot d^2 \quad (6)$$

$$\text{então, } K = \frac{k}{\mu} \rho g \quad (7)$$

onde k = permeabilidade específica ou intrínseca. É por vezes denominado apenas de permeabilidade. É função apenas do meio e tem dimensão $[L^2]$.

Finalmente, introduzindo o conceito da permeabilidade k , pode-se também escrever a Equação de Darcy (1) como:

$$v = -\frac{k\rho g}{\mu} \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (8)$$

TRANSMISSIVIDADE (*Transmissivity*) (T)

Definição

É assim denominada a grandeza resultante da integração da condutividade hidráulica K na dimensão vertical do aquífero, de modo a se ter uma transmissão média característica do aquífero em toda a sua espessura saturada. Fisicamente, é a vazão do aquífero por unidade de largura (perpendicular ao fluxo) em função de um gradiente unitário, numa base de área unitária.

Formulação

$$T = K b \quad (9)$$

onde T = transmissividade $[L^2/T]$;

K = condutividade hidráulica;

b = espessura do aquífero confinado, ou espessura saturada do aquífero freático.

ARMAZENAMENTO ESPECÍFICO (*Specific Storage*) (Ss)

Definição

É a grandeza que expressa a capacidade em água do volume unitário do aquífero. O armazenamento específico Ss é definido como o volume de água que um volume unitário do aquífero pode liberar do armazenamento ou receber para armazenamento, em função da variação unitária da carga hidráulica.

Formulação

Dois mecanismos são responsáveis pela liberação da água do armazenamento, quando há um decréscimo na carga hidráulica:

- ◆ compactação do aquífero. Mecanismo controlado pela compressibilidade do meio α ;
- ◆ expansão da água. Mecanismo controlado pela compressibilidade do fluido β .

$$Ss = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (10)$$

onde, S_s = armazenamento específico [L^{-1}];

α = compressibilidade do meio, que é a propriedade que descreve a mudança de volume ou alongamento, induzido no meio sob a ação de um esforço aplicado;

β = compressibilidade do fluido, isto é, a propriedade que descreve a mudança de volume ou alongamento, induzido no fluido sob a ação de um esforço aplicado;

n = porosidade total do meio, definida como a razão entre o volume de espaços vazios e o volume total.

COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (*Storativity*) (S)

Definição

Expressa a capacidade em água do aquífero. O coeficiente de armazenamento S é o volume de água que um aquífero confinado pode liberar do armazenamento ou receber para armazenamento, por superfície unitária de área do aquífero, por variação unitária de carga hidráulica perpendicular à superfície em questão.

Formulação

$$S = S_s b$$

onde S = coeficiente de armazenamento (adimensional);

S_s = armazenamento específico;

b = espessura do aquífero confinado.

PRODUÇÃO ESPECÍFICA (*Specific Yield*) (S_y)

Definição

A produção específica S_y é o volume de água que um aquífero freático libera do armazenamento, por superfície unitária de área do aquífero, por declínio unitário de carga hidráulica perpendicular à superfície em questão. A produção específica S_y é equivalente à porosidade eficaz n_e (*Effective Porosity*), que é definida como o espaço poroso por onde a água subterrânea se movimenta.

Formulação

$$S_y = S_s b$$

onde S_y = produção específica (adimensional);

S_s = armazenamento específico;

b = espessura da zona saturada.

APÊNDICE C

Dados Construtivos dos Poços Tubulares P4, P5, P8, P9, P10 e P11. Fonte: Equipoços (1995a-f)

Características Gerais dos Poços

Equipamento utilizado: perfuratriz marca Juper Modelo GP300.

Método de perfuração: percussão.

Revestimentos: tubos de aço galvanizado, DIN2440, diâmetro 6", e com 4,50 mm de espessura de parede.

Filtros: espiralados, galvanizados, comprimento de 3,00 m, abertura de 0,75 mm.

Pré-filtro: areia selecionada, arredondada e de granulometria variando de 2,00 a 4,00 mm.

Características Particulares dos Poços

1. POÇO P4

Denominação original do poço: Poço 2A/COLTEC - Setor II.

Profundidade final: 80 m

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 34,00 m - 10";
34,00 m a 49,00 m - 08";
49,00 m a 80,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,50 m a 16,00 m;
19,00 m a 31,00 m;
37,00 m a 46,00 m.

Posicionamento dos filtros: 16,00 m a 19,00 m;
31,00 m a 37,00 m;
46,00 m a 49,00 m.

Total de filtros utilizados: 12,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 10,00 m a 49,00 m. Volume de 1,27 m³

Cimentação: traço 1 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,50 m e 10,00 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com bomba submersa.

Vazão de teste: 6,67 l/s.

Nível estático : 8,00 m.

Nível dinâmico: 41,28 m.

2. POÇO P5

Denominação original do poço: Poço 01/COLTEC - Setor II.

Profundidade final: 80 m

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 58,00 m - 10";
58,00 m a 62,00 m - 08";
62,00 m a 80,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,50 m a 18,00 m;
27,00 m a 42,00 m;
45,00 m a 54,00 m;
57,00 m a 62,00 m

Posicionamento dos filtros: 18,00 m a 27,00 m;
42,00 m a 45,00 m;
54,00 m a 57,00 m.

Total de filtros utilizados: 15,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 6,00 m a 62,00 m.

Cimentação: traço 2 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,70 m a 6,00 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com bomba submersa.

Vazão de teste: 1,20 l/s.

Nível estático: 8,70 m.

Nível dinâmico: 48,22 m.

3. POÇO P8

Denominação original do poço: Poço 04/Belas Artes.

Profundidade final: 80 m

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 44,30 m - 10";
44,30 m a 46,30 m - 08";
46,30 m a 80,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,50 m a 24,00 m;
30,00 m a 36,00 m;
39,00 m a 42,00 m;
45,00 m a 46,30 m.

Posicionamento dos filtros: 24,00 m a 30,00 m;
36,00 m a 39,00 m;
42,00 m a 45,00 m.

Total de filtros utilizados: 12,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 10,00 m a 46,30 m. Volume de 1,53 m³

Cimentação: traço 1 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,50 m a 10,00 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com bomba submersa.

Vazão de teste: 6,11 l/s.

Nível estático: 8,00 m.

Nível dinâmico: 34,11 m.

4. POÇO P9

Denominação original do poço: Poço 03/Belas Artes - Setor I.

Profundidade final: 80 m.

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 47,50 m - 10";
47,50 m a 48,70 m - 08";
48,70 m a 80,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,50 m a 14,00 m;
20,00 m a 26,00 m;
29,00 m a 35,00 m;
38,00 m a 44,00 m;
47,00 m a 48,70 m.

Posicionamento dos filtros: 14,00 m a 20,00 m;
26,00 m a 29,00 m;

35,00 m a 38,00 m;
44,00 m a 47,00 m.

Total de filtros utilizados: 15,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 11,50 m a 47,80 m.

Cimentação: traço 1 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,70 m a 11,50 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com bomba submersa.

Vazão de teste: 2,53 l/s.

Nível estático: 6,09 m.

Nível dinâmico: 44,21 m.

5. POÇO P10

Denominação original do poço: Poço 01/Belas Artes - Setor I.

Profundidade final: 100 m

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 36,00 m - 10";
36,00 m a 53,00 m - 08";
53,00 m a 100,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,0 m a 31,00 m;
34,00 m a 36,00 m;
49,00 m a 53,00 m.

Posicionamento dos filtros: 31,00 m a 34,00 m;
46,00 m a 49,00 m.

Total de filtros utilizados: 6,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 17,00 m a 53,00 m.

Cimentação: traço 2 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,00 m a 17,00 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com compressor. de ar

Vazão de teste: 2,78 l/s.

Nível estático: 8,20 m.

Nível dinâmico: 30,00 m.

6. POÇO P11

Denominação original do poço: Poço 02/Belas Artes - Setor II.

Profundidade final: 60 m

Diâmetros de perfuração: 00,00 m a 38,00 m - 10";
38,00 m a 41,00 m - 08";
41,00 m a 60,00 m - 06".

Posicionamento dos revestimentos: 00,50 m a 25,00 m;
28,00 m a 34,00 m;
37,00 m a 41,00 m.

Posicionamento dos filtros: 25,00 m a 28,00 m;
34,00 m a 37,00 m;

Total de filtros utilizados: 6,00 m

Posicionamento do pré-filtro: 10,00 m a 41,00 m.

Cimentação: traço 2 x 1, com cimento, areia e água, posicionado de 0,70 m a 10,00 m.

Teste de bombeamento: efetuado em 24 horas com bomba submersa.

Vazão de teste: 2,20 l/s.

Nível estático: 3,28 m.

Nível dinâmico: 40,24 m.

APÊNDICE D

DESCRIÇÃO SINÓPTICA DAS PRINCIPAIS OPÇÕES DE EXECUÇÃO (*Run Options*) DO MODFLOW, DISPONIBILIZADAS PELO VisualMODFLOW versão 2.00.

Cabe ao usuário editar os valores de cada uma das opções de execução

1. **Tipo de Execução.** Informa ao código MODFLOW se a simulação em curso será no modo transiente ou estacionária.

2. **Opções *BASIC* (*BASIC Package* do *MODFLOW*).** Possibilita a discretização do tempo, se a simulação for transiente, e a atribuição dos valores iniciais de carga hidráulicas.

- **Discretização do Tempo:** necessária para a simulação no regime transiente. Deve-se definir nesta opção o número de períodos de stress, os passos de tempo e o multiplicador de passos de tempo. O Período de stress: é o período de tempo no qual todos os *stress* ou parâmetros da simulação passíveis de variar com o tempo, tais como as condições de contorno, taxas de bombeamento, etc, permanecem constante ou invariáveis. O período de stress é dividido em passos de tempo (*time steps*), os quais formam uma progressão geométrica temporal, segundo o valor atribuído ao multiplicador. ©
- **Cargas Iniciais:** Possibilita a definição dos valores iniciais da carga hidráulica. Em uma simulação no regime estacionário deve-se fornecer uma estimativa inicial para o valor da carga na(s) camada(s), além de se optar por um valor constante por camada ou não. Quando a simulação for no regime transiente pode-se utilizar as cargas resultantes da simulação no regime estacionário como cargas iniciais.

3. **Resolvedor:** Deve-se escolher o método que se deseja utilizar na resolução das equações simultâneas, produzidas pelo código durante a execução do modelo. O *VisualMODFLOW*

oferece 4 tipos de resolvedores, cabendo ao usuário optar por um deles. Para cada um deles será necessário definir uma série de parâmetros.

À seguir descreve-se o conjunto de parâmetros que se deve definir quando se opta pelo resolvedor *WHS*:

Número máximo de iterações mais externas

Este parâmetro determina o limite máximo de iterações externas permitidas. O valor padrão é 50.

Número máximo de iterações mais internas

Este parâmetro determina o limite máximo de iterações internas permitidas. O valor padrão é 500.

Critério de variação da carga para a convergência

Após cada iteração externa o resolvedor verifica se a variação máxima de carga da solução, obtida para cada célula, é inferior ao valor de tolerância para a convergência. Caso afirmativo a solução convergiu e o resolvedor encerra a simulação. O padrão é 0,01 m.

Critério do residual para convergência

Este critério é usado para verificar a convergência das iterações mais internas do resolvedor. O valor padrão é 0,001

Fator de *Dampening* para iteração mais externa

Este fator permite ao usuário reduzir a variação de carga calculada durante cada sucessiva iteração externa. O valor padrão é 1.

Critério para o residual

Trata-se de mais um método de verificação da convergência da iteração interna. O valor padrão é zero (0).

Nível de fatorização

O nível igual a zero requer mais iterações externas e menos memória, enquanto que o nível igual a 1 requer menos iterações externas porém mais memória. O valor padrão é 1.

4. **Opção de Recarga:** deve-se optar entre uma recarga somente aplicada na camada situada no topo da malha, ou uma recarga aplicada à célula mais elevada de cada coluna vertical.

5. **Tipo de Camada Aquífera:** para cada uma das camadas definidas, deve-se caracterizá-las segundo um dos seguintes tipos:
 - Tipo 0 - Confinada com S e T constantes : o valor da transmissividade e do coeficiente de armazenamento da camada permanecem constantes durante toda a simulação.
 - Tipo 1 - Não Confinado : o valor da transmissividade da camada varia, sendo calculada a partir da espessura da camada e da condutividade hidráulica. O valor do coeficiente de armazenamento permanece constante. Este tipo só é válido para camada 1.
 - Tipo 2 - Confinado/Não Confinado com T constante e S variável: Enquanto o valor da transmissividade T da camada permanece constante, o valor do coeficiente de armazenamento S pode alternar entre valores confinados e não confinados. ©
 - Tipo 3 - Confinado/Não Confinado com S e T variáveis: o valor da transmissividade T é variável, sendo calculada a partir da espessura da camada e da condutividade hidráulica. O valor do coeficiente de armazenamento S pode alternar entre valores confinados e não confinados.

6. **Opções BCF (*Block-Centered Flow Package* do *MODFLOW*):** Pode-se optar entre dois menus de entrada de dados: Remolhamento e Anisotropia. O primeiro permitirá ao usuário ativar a opção de remolhamento do pacote BCF. O outro possibilita a definição de um fator de anisotropia horizontal, que é a razão entre o valor da transmissividade ao longo de uma coluna e o seu componente ao longo de cada linha;

APÊNDICE E

FOTOGRAFIAS



Foto 1: Detalhe de gnaiss cinzento com bandamento composicional definido pela alternância de bandas milimétricas a centimétricas de cor clara, quartzofeldspáticas, e bandas escuras, ricas em biotita e anfibólio. Nota-se feições de milonitização. Gnaiss Belo Horizonte. Local: Pedreira no Engenho Nogueira, localizada próxima à área de estudo. (jan./1996).

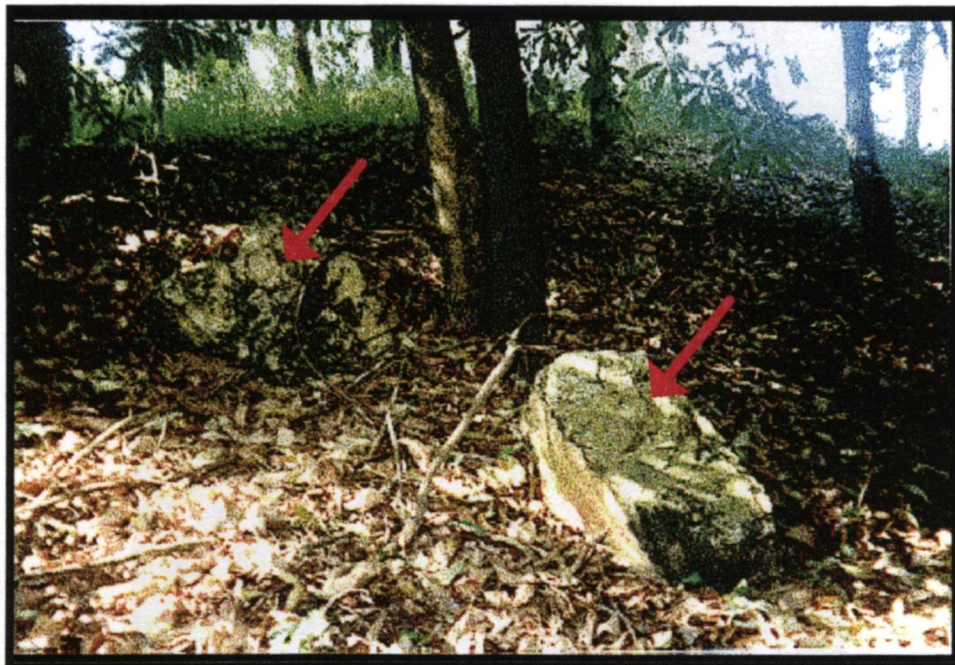


Foto 2: Blocos de quartzo (setas) no local onde foi mapeado um veio de quartzo com espessura significativa, estimada em 10-15 m. Local: proximidades da torre meteorológica do CDTN. (jan./1996).



Foto 3: Vista ao fundo (seta) da colina formada pela ocorrência de veio de quartzo, onde se localiza a torre meteorológica do CDTN. (jan./1996).



Foto 4: Detalhe de rocha alterada, provavelmente gnaisse, arenosa-argilosa, com faixas ricas em quartzo e feldspato (setas). Observa-se a intrusão de rocha básica, já alterada (entre tracejado), concordante com a foliação gnáissica e caracterizada pela cor de alteração marrom avermelhada. Local: Corte em encosta, no limite leste da área, nas proximidades do Col. Militar. (fev./1996).



Foto 5: Saprólito muito arenoso, cinza amarelado. Observa-se (retângulo) vestígios do bandamento metamórfico pretérito. Local: encosta nos terrenos da 4ª Cia. de Comunicação do Exército. (jan./1996).



Foto 6: Idem foto 5, com voçorocamento insipiente. Local: Vertente na área da 4ª Cia. de Comunicação do Exército. (jan./1996).

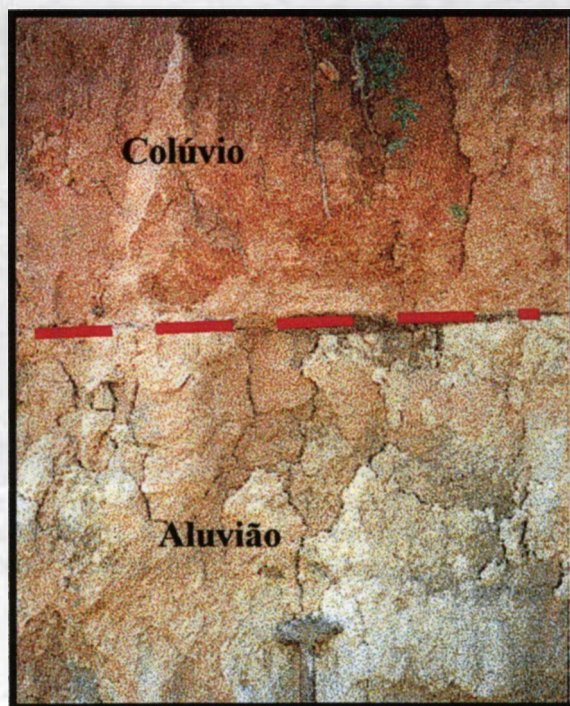


Foto 7: Detalhe do contato (tracejado) entre colúvio, sobreposto à aluvião argiloso, de cor cinza. Local: corte na margem do córrego do Engenho Nogueira. (jan./1996).

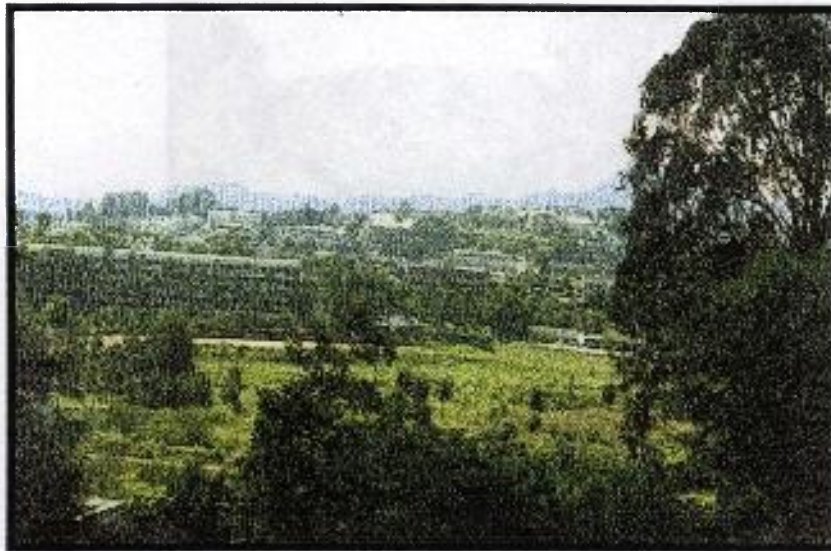


Foto 8: Vista da planície de inundação ou várzea do córrego do Engenho Nogueira, na região em que este não está canalizado, porção sul da área de estudo. O prédio à esquerda é o do Col. Militar. Foto tirada da torre meteorológica do CDTN. (nov./1995).



Foto 9: Vista da várzea do córrego do Engenho Nogueira, dentro dos limites do Campus da UFMG. Neste local o córrego já se encontra canalizado. Foto tirada da torre meteorológica do CDTN. (nov./1995).



Foto 10: Detalhe do leito do córrego do Engenho Nogueira, no trecho em que apresenta canal com baixa sinuosidade, com retilinearidade de direção sul-norte,. Local: Porção sul da área de estudo, dentro dos limites do Colégio Militar. (abr./1996)



Foto 11: Detalhe das águas poluídas do córrego do Engenho Nogueira. Local: atrás do Colégio Técnico da UFMG. (abr./1996).



Foto 12: Detalhe do poço P1, localizado durante os trabalhos de campo, após longo período em que esteve encoberto pela vegetação. (set./1997).

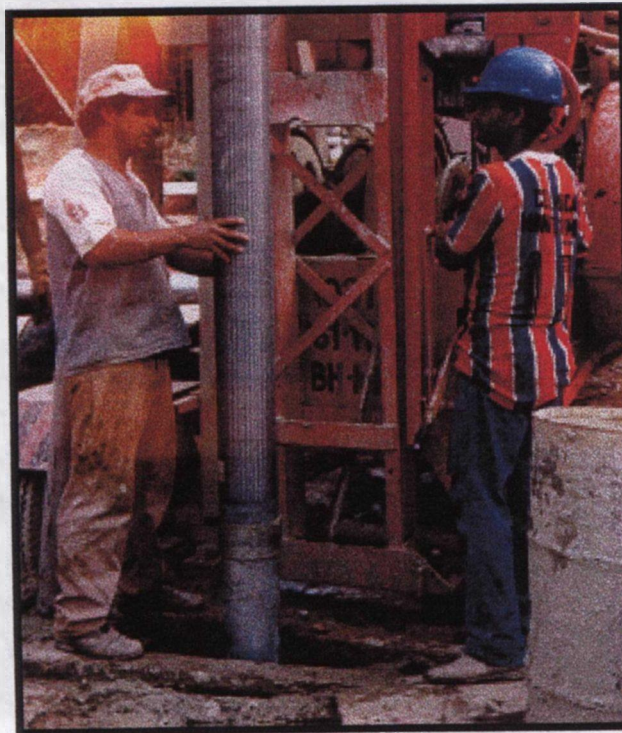


Foto 13: Descida de filtro espiralado no poço P5. (set./1995).



Foto 14: Realização de ensaio de recuperação no poço tubular P5. (set./1995).

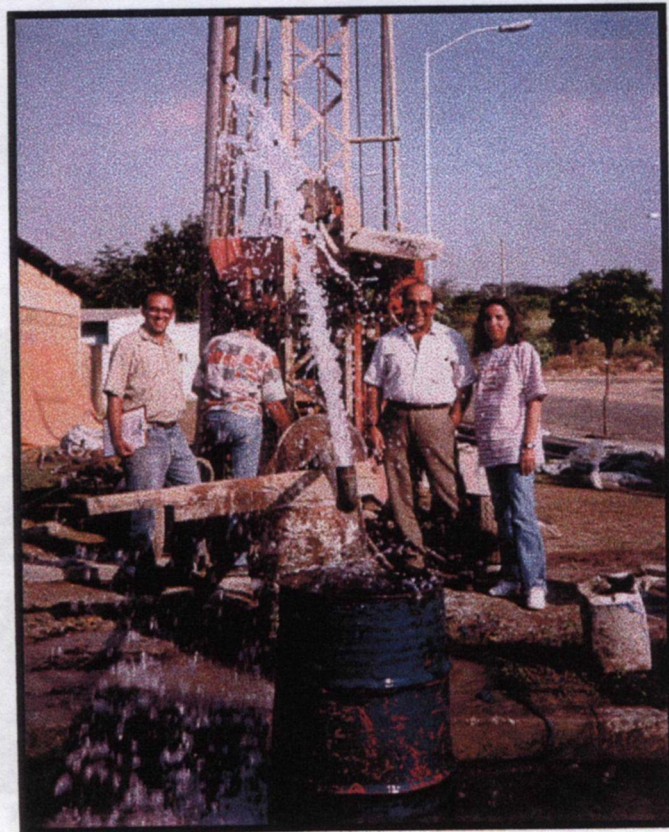


Foto 15: Desenvolvimento do poço P10. (set./1995).



Foto 16: Medição do nível freático no poço Po. (jul./1997).



Foto 17: Observa-se o poço de visita ao subsistema de drenos CDTN-Reitoria. (jul./1997).



Foto 18: Local onde no subsolo se encontra o subsistema de drenos CDTN-Reitoria. Observa-se à direita da foto a declividade natural de um antigo lago raso ou brejo que existia no local, e que secou em função da construção dos drenos Conforme declarações de antigos habitantes de áreas vizinhas, na década de 40, época na qual o lago ainda existia, pescava-se neste lugar. (jul./1997).

copw 833

AB ENCADERNACOES
RUA ESMERALDA, 550
PRADO CEP 30.410-08
BELO HORIZONTE-MG
Telefone 372 27 00

CPM 833

AB ENCADERNACOES
RUA ESMERALDA, 550
PRADO CEP 30.410-08
BELO HORIZONTE-MG
Telefone 372 27 00