

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO
ENTORNO DO CENTRO NACIONAL DE
PESQUISA DE MILHO E SORGO (CNPMS), EM
SETE LAGOAS, MG.

Rita de Cássia Rosado Batista

Belo Horizonte

2009

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO
ENTORNO DO CENTRO NACIONAL DE PESQUISA
DE MILHO E SORGO (CNPMS), EM SETE LAGOAS,
MG.**

Rita de Cássia Rosado Batista

Rita de Cássia Rosado Batista

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO
ENTORNO DO CENTRO NACIONAL DE PESQUISA
DE MILHO E SORGO (CNPMS), EM SETE LAGOAS,
MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos 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: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009



FOLHA DE APROVAÇÃO

Caracterização Hidrogeológica do Entorno do Centro Nacional de
Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), em Sete Lagoas, MG

RITA DE CÁSSIA ROSADO BATISTA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. CELSO DE OLIVEIRA LOUREIRO

Prof. BRUNO RABELO VERSIANI

PESQ. JOÃO HERBERT MOREIRA VIANA

GEÓLOGO PAULO FERNANDO PEREIRA PESSOA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Mauro da Cunha Naghettini
Coordenador

Prof. Celso de Oliveira Loureiro
Orientador

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2009.

Ao meu pai
que sempre me estimulou na busca pelo conhecimento e
à minha mãe
que se esforçou para que eu pudesse me dedicar a esse caminho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não estaria concluído se não fosse pela colaboração direta ou indireta de diversas pessoas. Talvez não seja possível nesta simples nota dar nome a todas elas, mas fica aqui o meu mais sincero agradecimento a todos com um destaque para aqueles aqui citados.

O mais importante de todos esses agradecimentos é a Deus que colocou todas essas pessoas no meu caminho e que me permitiu persistir neste objetivo mesmo nos momentos em que tudo parecia incerto e o tempo parecia escapar pelos dedos.

Aos meus pais, Tunico e Rita, e à minha avó Quinita pelo exemplo de vida e pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Celso, pela clareza com que me conduziu em cada passo do desenvolvimento deste trabalho e por sua orientação sempre precisa.

Ao João Herbert, que coordenou os trabalhos desenvolvidos na área do CNPMS, se mostrando um grande amigo, sempre disposto a discutir os rumos do trabalho e apresentar sugestões para melhorá-lo.

Aos meus colegas: Eduardo de Castro que faz parte deste trabalho, participando ativamente nos trabalhos de campo e dividindo comigo as angústias da definição dos rumos da pesquisa e ao Paulo Augusto que me deu tantas dicas a respeito da modelagem computacional e de como organizar e focalizar o meu trabalho.

Aos funcionários e à direção da Embrapa Milho e Sorgo pela receptividade e apoio ao nosso trabalho, em especial aos pesquisadores: Camilo e Luiz Marcelo com discussões e fornecimento de material de pesquisa; e aos funcionários de campo: Paulinho, Marquinho, Márcio e tantos outros que nos mostraram cada canto do CNPMS e nos passaram todo o conhecimento que têm da vivência no local.

À Carla que me forneceu com extrema presteza os dados meteorológicos da estação localizada no Centro e deu dicas de como utiliza-los melhor.

À Gisella que, com auxílio da estagiária Isa, digitalizou e elaborou os diversos mapas aqui apresentados e que, além de tudo se tornou uma amiga, sempre preocupada com os rumos do trabalho e disposta a discutir soluções para os problemas cartográficos que surgiam.

À COPASA por todo o apoio técnico dado por seus funcionários: Carlos Alberto que auxiliou nos trabalhos de campo de reconhecimento da área e seleção de pontos de monitoramento e aos responsáveis pela coleta e análise da água, em especial ao José Ronaldo e ao Alexandre e ao chefe do laboratório.

Aos também funcionários da COPASA, Ronaldo De Luca, Mário Horta, Guilherme Frazon e a todos que participaram das negociações para que o convênio de colaboração técnica se tornasse uma realidade.

À CPRM que disponibilizou todo o seu banco de dados de poços cadastrados e toda a sua produção bibliográfica referente à área de estudo bem como aos profissionais dessa empresa Antonieta, José Espírito Santo, João e Décio que sempre se mostraram disponíveis para buscar as informações necessárias.

Ao IGAM que forneceu parte da base cartográfica e que deverá vir a participar desse grupo de estudos auxiliando na coleta de dados e no andamento das questões a respeito das perfurações a serem feitas. Ao amigo Rodrigo Mundim que proporcionou meu primeiro contato com o IGAM no início deste projeto e à Mariceni que ajudou a transformar em realidade essa parceria.

Ao Antônio por revisar os meus textos e ainda ter a paciência de corrigi-los comigo sempre dando ótimas dicas para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Reginaldo pelo auxílio na formatação desta dissertação e ajudar a resolver as pequenas coisas do cotidiano.

Aos meus irmãos Conceição, Marcelino e Elisa e ao meu cunhado Helder que sempre me deram seu apoio e, durante este trabalho, deram toda atenção à minha mãe compensando minha ausência.

Aos meus sobrinhos Kleibinho, Vítor e Maria Luísa que tornaram os meus dias mais suaves e felizes com seus sorrisos e brincadeiras. Apesar de eu estar mais ausente reencontrá-los é sempre uma festa.

Ao Rodrigo por me apoiar e me dar carinho nos momentos difíceis mesmo quando, cheia de impaciência, eu não lhe dava toda a atenção merecida.

A todos os meus amigos, cita-los seria impossível, por me proporcionarem horas de lazer que me faziam voltar mais animada para o trabalho e por me emprestarem seus ombros para ajudar a suportar minhas dificuldades.

RESUMO

O presente trabalho visa realizar uma caracterização hidrogeológica do entorno do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), centro de pesquisa pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), localizado na cidade de Sete Lagoas – MG.

Vale ressaltar que estudos geológicos e hidrogeológicos, desenvolvidos por diversos autores na região, indicam que ela é constituída basicamente por rochas carbonáticas sobrepostas ao embasamento cristalino, sendo que a exploração de água subterrânea ocorre principalmente nos aquíferos carbonáticos.

Inicialmente, para promover a caracterização hidrogeológica aqui proposta, foi realizada uma coleta de dados a respeito da região, a qual envolveu diversas campanhas de campo para o reconhecimento e o mapeamento dos corpos d'água existentes na área. Além disso, a revisão bibliográfica e o cadastro de informações disponíveis por meio de bancos de dados públicos e digitalização de mapas temáticos existentes foram fundamentais nesse processo de caracterização hidrogeológica do entorno do CNPMS.

A partir dos dados coletados nessa etapa inicial, foi proposto um modelo hidrogeológico conceitual da área, identificando as principais unidades hidroestratigráficas e condições de fluxo, que foram adaptadas ao modelo hidrogeológico computacional construído com o auxílio do aplicativo computacional Visual MODFLOW.

A simulação computacional apresentou resultados dentro do esperado em termos de direções de linhas de fluxo e definição de áreas secas e úmidas, além de dados de calibração dentro de uma margem de erro aceitável para modelos hidrogeológicos computacionais.

Após calibrado, o modelo computacional foi utilizado para simular uma série de cenários atuais e futuros, apresentando como resultados valores de capacidade de produção de poços, vazões de nascentes e zonas de captura de poços, cisternas, nascentes e lagoas que poderão auxiliar no gerenciamento e proteção desses recursos hídricos.

ABSTRACT

The objective of this study was to make a hydrogeological characterization of the surroundings of the Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), a research site located at the outskirts of the city of Sete Lagoas – MG, and managed by the Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). The hydro-geological characterization aims at guiding activities for evaluation projects of the transportation of infecting elements in the soil and in the underground water.

It is important to emphasize that the hydrogeological studies which has been developing by many authors in the same area, indicate that the local geology is composed basically by carbonate rocks upon deposits over the crystalline basement. Therefore, the groundwater exploitation in the region occurs mainly in the carbonate aquifers.

Initially, to promote the hydrogeological characterization here proposed, a collection of data about the region was made. This collection involved several campaigns of field for the recognition and mapping of the water bodies existing in the area. Besides, the bibliographic review and the register of available information through public databases and digitalization of thematic existing maps were essential in this hydrogeological characterization process in the surroundings of CNPMS.

From the data collected in this initial stage, a conceptual hydrogeological model of the area was proposed, identifying the main hydrostratigraphic units and the flow conditions which were adapted to the computational hydrogeological model created with the help of the computer application Visual ModFlow.

The computational simulation presented results within the expectation in terms of directions of flow lines and definition of dry and wet areas, apart from calibration data inside an acceptable margin of error for hydrogeological models.

After calibrated, the computational model was used to simulate several present and future sceneries, presenting as values results of capacity of wells production, flows of spring and capture zones of wells, cisterns, springs and ponds which might help in the management and protection of these hydric resources.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 JUSTIFICATIVA	4
4 MATERIAL E MÉTODOS	6
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	6
4.2 TRABALHOS DE CAMPO.....	6
4.2.1 <i>Reconhecimento da área</i>	6
4.2.2 <i>Monitoramento ambiental</i>	7
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
4.3.1 <i>Topologia</i>	7
4.3.2 <i>Climatologia e balanço hídrico</i>	7
4.3.3 <i>Hidrologia</i>	8
4.3.4 <i>Geologia</i>	8
4.3.5 <i>Hidrogeologia</i>	8
4.4 MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA	8
4.4.1 <i>Modelo hidrogeológico conceitual</i>	8
4.4.2 <i>Modelo hidrogeológico computacional</i>	9
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
6.1 LOCALIZAÇÃO.....	14
6.2 CLIMA.....	15
6.2.1 <i>Temperatura e Pluviometria</i>	16
6.3 BALANÇO HÍDRICO	17
6.3.1 <i>Evapotranspiração</i>	17
6.3.2 <i>Escoamento superficial e subterrâneo</i>	22
6.3.3 <i>Equação do balanço hídrico</i>	24
6.4 HIDROLOGIA	25
6.4.1 <i>O sistema de irrigação do CNPMS</i>	28
6.5 SOLOS	30
6.5.1 <i>Latossolos</i>	32
6.5.2 <i>Cambissolos</i>	32
6.5.3 <i>Gleissolos</i>	33
6.5.4 <i>Argissolos</i>	33
6.5.5 <i>Neossolos</i>	33
6.6 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	33
6.7 GEOLOGIA.....	38
6.7.1 <i>O embasamento cristalino</i>	40
6.7.2 <i>O Grupo Bambuí</i>	42

6.7.3	<i>Coberturas superficiais</i>	46
6.8	ASPECTOS DE INTERESSE PARA A CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA.....	46
7	MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA	48
7.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	48
7.1.1	<i>O Aquífero Granular</i>	48
7.1.2	<i>O Aquífero Cárstico</i>	51
7.1.3	<i>O Aquífero Fissurado-Cárstico</i>	56
7.1.4	<i>O Aquífero Fissurado</i>	57
7.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL.....	58
7.2.1	<i>Bases teóricas e apresentação do aplicativo computacional</i>	58
7.2.2	<i>Desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional</i>	62
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
8.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL.....	75
8.2	INTERPRETAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL.....	79
8.3	AValiação AMBIENTAL DOS RECURSOS HÍDRICOS NA ÁREA DO CNPMS.....	83
8.4	POÇOS TUBULARES.....	84
8.5	CISTERNAS.....	90
8.6	NASCENTES.....	92
8.7	LAGOAS.....	96
9	CONCLUSÕES	100
10	RECOMENDAÇÕES	102
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
12	ANEXO 1 – DADOS DOS POÇOS TUBULARES LOCALIZADOS NA CIDADE DE SETE LAGOAS. FONTE: SIAGAS, CPRM.	106
	ANEXO 1A – MODELO DE FICHA TÉCNICA DE CADASTRO.....	107
	ANEXO 1B – TABELA DE DADOS CONTENDO O PERFIL DOS POÇOS CADASTRADOS.....	110
	ANEXO 1C – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS DO ANEXO 1B.....	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 6-1 - MAPA DAS PAISAGENS NATURAIS DO BRASIL (IBGE, 2004) COM DESTAQUE PARA A CIDADE DE SETE LAGOAS E AMPLIAÇÃO DA ÁREA DO CNPMS.	14
FIGURA 6-2 - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE SETE LAGOAS, INSTALADA NA ÁREA DO CNPMS.	15
FIGURA 6-3 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA MENSAL NA ÁREA DO CNPMS NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1960 A DEZEMBRO DE 2006. FONTE: INMET.	16
FIGURA 6-4 - VARIAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO ATRAVÉS DA COMPARAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO PERÍODO DE JANEIRO DE 1960 A DEZEMBRO DE 2006. FONTE: INMET.	18
FIGURA 6-5 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE PRECIPITAÇÃO E DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL CALCULADA SEGUNDO AS EQUAÇÕES DE L. TURC E DE COUTAGNE, PARA A REGIÃO DO CNPMS.	22
FIGURA 6-6 – TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DOS TIPOS DE ESCOAMENTO. SENDO, MÉTODO 1 – MÉTODO DO ESCOAMENTO FIXO DE BASE; MÉTODO 2 – MÉTODO DA LINHA RETA; MÉTODO 3 – MÉTODO DA INCLINAÇÃO VARIÁVEL. FONTE: TUCCI E BELTRAME (2001).	23
FIGURA 6-7 – VERTEDOR DA LAGOA DA BAIANA, NO INÍCIO DO CANAL DE IRRIGAÇÃO.	26
FIGURA 6-8 - MAPA TOPOGRÁFICO E HIDROGRÁFICO DA ÁREA EM ESTUDO.	27
FIGURA 6-9 – DOLINA ABASTECIDA PELO CANAL DE IRRIGAÇÃO CONHECIDA COMO LAGOA DA CASCATAS.	28
FIGURA 6-10 – MAPA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DO CNPMS DESTACANDO OS PRINCIPAIS CÓRREGOS E LAGOAS.	29
FIGURA 6-11 – MAPA DE SOLOS DA REGIÃO EM ESTUDO.	31
FIGURA 6-12 - MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA REGIÃO DE INTERESSE.	34
FIGURA 6-13 – VEGETAÇÃO TÍPICA DE CERRADO, PRINCIPAL VEGETAÇÃO NATIVA DA REGIÃO.	35
FIGURA 6-14 – VEGETAÇÃO DE CAMPO CERRADO PRESENTE NOS TOPOS DE MORROS EM ÁREAS DE CAMBISSOLOS.	36
FIGURA 6-15 – MATA DE GALERIA OCUPANDO A PARTE MAIS BAIXA DA ÁREA DE ESTUDO, AO LONGO DOS CURSOS D'ÁGUA.	37
FIGURA 6-16 – MATA SECA SOBRE ROCHAS CALCÁRIAS NO AFLORAMENTO CONHECIDO COMO GRUTA DA PONTINHA, LOCALIZADO NO CNPMS.	38
FIGURA 6-17 – MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE INTERESSE. DESTACA-SE AS REGIÕES DELIMITADAS NO MAPA: EM PRETO TEM-SE ÁREA DO CNPMS E EM VERDE A REGIÃO DE INTERESSE DESTA ESTUDO.	39
FIGURA 6-18 – VISTA GERAL DO AFLORAMENTO DO CRISTALINO CONHECIDO COMO PEDREIRA DA PREFEITURA, LOCALIZADO NA FAZENDA DAS PEROBAS – SETE LAGOAS.	40
FIGURA 6-19 – RIBEIRÃO JEQUITIBÁ CORRENDO SOBRE AS ROCHAS DO EMBASAMENTO CRISTALINO.	41
FIGURA 6-20 – SINAIS DO BASCULAMENTO EM BLOCOS CARACTERÍSTICO DO EMBASAMENTO CRISTALINO OBSERVADO NA PEDREIRA DA PREFEITURA. FAZENDA DAS PEROBAS – SETE LAGOAS.	42
FIGURA 6-21 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS CICLOS DE SEDIMENTAÇÃO I, II E III. FONTE: CPRM (2003).	43
FIGURA 6-22 – MAPA SÍNTESE DOS ASPECTOS DE INTERESSE HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA DO CNPMS.	47
FIGURA 7-1 - CISTERNA LOCALIZADA EM FRENTE AO RESTAURANTE, UTILIZADA PARA ABASTECER OS LABORATÓRIOS DO PRÉDIO SEDE DO CNPMS.	50
FIGURA 7-2 – NASCENTE DO NIA. APROVEITADA PARA USO DOMÉSTICO PELOS MORADORES DA VIZINHANÇA DO CNPMS.	51
FIGURA 7-3 – DISSOLUÇÃO DA CALCITA, NUM PERFIL CÁRSTICO, E OS PRINCIPAIS TIPOS DE ESPELEOTEMAS. FONTE: KARMANN (2003).	52
FIGURA 7-4 – CÓRREGO SUBTERRÂNEO LOCALIZADO SOB O AFLORAMENTO CONHECIDO COMO LAPA PRETA, PRÓXIMO AO LIMITE DO CNPMS.	54
FIGURA 7-5 – SUMIDOURO LOCALIZADO NA LAPA PRETA.	55
FIGURA 7-6 – SURGÊNCIA DA LAPA PRETA.	55
FIGURA 7-7 – VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO.	60
FIGURA 7-8 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO REPRESENTANDO A DELIMITAÇÃO DAS BACIAS DOS RIBEIRÕES JEQUITIBÁ E MATADOURO. DELIMITADA EM PRETO ESTÁ A ÁREA DO CNPMS E EM AZUL AS ÁREAS DAS BACIAS.	63
FIGURA 7-9 – DOMÍNIO DE CÁLCULO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL NO PLANO HORIZONTAL.	64
FIGURA 7-10 – DOMÍNIO DE CÁLCULO VERTICAL OBTIDO POR UM CORTE DE SUL PARA NORTE NA REGIÃO CENTRAL DO MAPA DA FIGURA 7.9, COM ESCALA AMPLIADA 20 VEZES, MOSTRANDO A DIVISÃO EM CÉLULAS VERTICAIS DE ESPESSURAS VARIADAS.	64

FIGURA 7-11 – MALHA DE CÁLCULO ADOTADA NO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL COM DESTAQUE PARA A ÁREA DO CNPMS, COM GRADE MAIS REFINADA.....	65
FIGURA 7-12 – HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE OCORRÊNCIA DOS CALCÁRIOS DO GRUPO BAMBUÍ E DO EMBASAMENTO CRISTALINO. FONTE: SIAGAS – CPRM.	67
FIGURA 7-13 REPRESENTAÇÃO EM CORTE VERTICAL, DE SUL PARA NORTE NO CENTRO DA ÁREA DE INTERESSE, DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS EXISTENTES NA REGIÃO DE INTERESSE. DIMENSÃO VERTICAL AMPLIADA EM 20 VEZES.	72
FIGURA 7-14 – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO.	74
FIGURA 8-1 - DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA.....	76
FIGURA 8-2 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL APRESENTANDO O VALOR DE PORCENTAGEM DE RESÍDUO.....	77
FIGURA 8-3 – ZONAS DE CÁLCULO DE VAZÃO UTILIZADAS NA CALIBRAÇÃO DO VALOR DA RECARGA, CADA COR CORRESPONDE A UMA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA: VIOLETA – CURTUME; VERDE – REPRESA; BRANCO – REPRESA JUSANTE.....	78
FIGURA 8-4 – INDICAÇÃO DAS LINHAS DE ESCOAMENTO (FLUXO) DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.	80
FIGURA 8-5 – SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA CONSIDERANDO UMA CONDIÇÃO SEM BOMBEAMENTO DE ÁGUA NOS POÇOS LOCAIS.	81
FIGURA 8-6 – SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA CONSIDERANDO O BOMBEAMENTO DE ÁGUA NOS POÇOS LOCAIS COM AS SUAS RESPECTIVAS VAZÕES DE OPERAÇÃO ATUAL.	82
FIGURA 8-7 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL RELATIVA DAS VELOCIDADES DE ESCOAMENTO DA ÁGUA NOS DIVERSOS AMBIENTES GEOLÓGICOS, REPRESENTADOS AO FUNDO CONFORME AS CORES: AZUL – CARSTE, MOSTARDA – GRANITO FRATURADO, VERDE – FORMAÇÃO SERRA DE SANTA HELENA.....	85
FIGURA 8-8 – ZONA DE CAPTURA DOS POÇOS DO CNPMS, COM SUAS VAZÕES NOMINAIS, EM UM PERÍODO DE 5 ANOS.	86
FIGURA 8-9 – ZONAS DE CAPTURA DOS POÇOS DO CNPMS, COM SUAS VAZÕES NOMINAIS, EM UM PERÍODO DE 10 ANOS.....	87
FIGURA 8-10 – ZONAS DE CAPTURA DOS POÇOS DO CNPMS, COM SUAS VAZÕES NOMINAIS, EM UM PERÍODO DE 25 ANOS.....	87
FIGURA 8-12 - ZONAS DE CAPTURA DAS PRINCIPAIS CISTERNAS CONSIDERANDO UM BOMBEAMENTO MÉDIO DE 86 M ³ /DIA POR UM PERÍODO DE 5 ANOS.	91
FIGURA 8-13 – ZONAS DE CAPTURA DAS PRINCIPAIS CISTERNAS CONSIDERANDO UM BOMBEAMENTO MÉDIO DE 86 M ³ /DIA POR UM PERÍODO DE 10 ANOS.....	91
FIGURA 8-14 – ZONAS DE CAPTURA DAS PRINCIPAIS CISTERNAS BOMBEADAS POR UM PERÍODO DE 25 ANOS.	92
FIGURA 8-15 – LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS E NASCENTES E ZONAS DE CAPTURA DAS NASCENTES. PERÍODO: 5 ANOS.	94
FIGURA 8-16 – ZONAS DE CAPTURA DAS NASCENTES. PERÍODO: 5 ANOS.....	94
FIGURA 8-17 – ZONAS DE CAPTURA DAS NASCENTES. PERÍODO: 10 ANOS.	95
FIGURA 8-18 – ZONAS DE CAPTURA DAS NASCENTES. PERÍODO: 25 ANOS.	95
FIGURA 8-19 – ZONAS DE CAPTURA DAS LAGOAS NO PERÍODO DE 5 ANOS.....	97
FIGURA 8-20 – ZONAS DE CAPTURA DAS LAGOAS NO PERÍODO DE 10 ANOS.....	98
FIGURA 8-21 – ZONAS DE CAPTURA DAS LAGOAS NO PERÍODO DE 25 ANOS.....	98

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1 - SÍNTESE DAS COLUNAS ESTRATIGRÁFICAS PROPOSTAS POR DIVERSOS AUTORES E APRESENTADAS POR DARDENNE (1978), CITADO POR PESSOA (1996).	11
TABELA 6.1 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL MÉDIA ANUAL CALCULADA SEGUNDO AS EQUAÇÕES DE L. TURC E DE COUTAGNE. FONTE: INMET.	21
TABELA 6.2 - ESCOAMENTO SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEO CALCULADOS PELO MÉTODO GRÁFICO DA LINHA RETA PARA AS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS INSTALADAS NA ÁREA.....	24
TABELA 7.1 - CAMADAS DEFINIDAS NO MODELO COMPUTACIONAL PARA COMPORTAR AS DIVERSAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS.	66
TABELA 7.2 – VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K) UTILIZADOS COMO REFERÊNCIA NESTE TRABALHO.	70
TABELA 7.3 - VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K) ADOTADOS PARA CADA UMA DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS APÓS A CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL.	71
TABELA 7.4 - POÇOS TUBULARES COM SUAS RESPECTIVAS VAZÕES MÉDIAS.....	73
TABELA 8.1 - PONTOS DE MONITORAMENTO DA CARGA HIDRÁULICA.	75
TABELA 8.2 - ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS COM DADOS DE VAZÃO MÉDIA DIÁRIA.	77
TABELA 8.3 - DADOS DE CALIBRAÇÃO DOS VALORES DE RECARGA A PARTIR DA COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE VAZÃO MEDIDA NOS CÓRREGOS E A VAZÃO CALCULADA PELO MODELO.	79
TABELA 8.4 - DADOS DA VAZÃO NAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E SUA VARIAÇÃO DEVIDO À EXPLOTAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.	83
TABELA 8.5 - VAZÕES REFERENTES AOS PRINCIPAIS CÓRREGOS EXISTENTES NA ÁREA DE ESTUDO.	83
TABELA 8.6 - CAPACIDADE MÁXIMA DE PRODUÇÃO DOS POÇOS LOCALIZADOS NO CNPMS E SUAS VAZÕES ATUAIS.....	84
TABELA 8.7 - LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS CISTERNAS AVALIADAS QUANTO À ZONA DE CAPTURA.....	90
TABELA 8.8 - VAZÃO DAS NASCENTES NAS CONDIÇÕES ATUAIS (VAZÃO 1) E COM OS POÇOS EXTRAINDO SUA CAPACIDADE MÁXIMA DE PRODUÇÃO (VAZÃO 2).	93
TABELA 8.9 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DAS NASCENTES.	96
TABELA 8.10 - IDENTIFICAÇÃO DAS LAGOAS AVALIADAS QUANTO À SUA ZONA DE CAPTURA.....	96

1 INTRODUÇÃO

Em 1907, a diretoria de Agricultura, Comércio, Terras e Colonização noticiou que fora estabelecido, no dia 14 de agosto, “um pequeno campo de experiência, com área de um alqueire nas proximidades de Sete Lagoas, em terreno de cerrado, onde se poderia verificar a utilização e o comportamento das culturas” (Avellar e Silva, 2000). Nesse local foram realizadas as primeiras experiências agrícolas sobre manejo dos solos de cerrado no Brasil Central, até então consideradas terras pobres e pouco produtivas (Avellar e Silva, 2000).

Desde então, a área em questão vem sendo utilizada na pesquisa agrícola sendo a ela incorporadas outras fazendas experimentais criadas em seu entorno, perfazendo hoje um total de aproximadamente 2000 hectares, que constitui o Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS). Fundado em 1976, é componente de uma rede de 38 centros de pesquisa coordenados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Nele são desenvolvidas atividades de pesquisa científica e tecnológica relacionadas, principalmente, ao cultivo de milho, sorgo e milheto, no que tange à produtividade, ao uso do solo, à irrigação, ao manejo de pragas e doenças e ao desenvolvimento de tecnologias associadas (Nogueira, 2003).

Como fornecedor de tecnologia na área de manejo e uso do solo e, tendo em vista a crescente preocupação com a proteção dos mananciais, o CNPMS tem voltado suas atenções para o tema, o que pode ser constatado pela análise do plano diretor da instituição que destaca, como uma de suas metas, o desenvolvimento de tecnologias referentes à captação e uso da água, considerando novos paradigmas como: a proteção do meio ambiente, o uso da água em pequenas propriedades, a captação de água *in situ* e a recarga dos aquíferos (Embrapa, 2005).

Essa preocupação vem ao encontro de diversos projetos que visam à melhoria da qualidade da água da bacia do rio das Velhas que é o maior afluente, em extensão, do rio São Francisco e que apresenta altos índices de contaminação devido à crescente urbanização e à grande atividade industrial que se concentra em seu território, principalmente na área da região metropolitana de Belo Horizonte, na qual se enquadra a cidade de Sete Lagoas.

A Bacia do São Francisco, pelo seu grande potencial hídrico e sua importância histórica e atual no desenvolvimento econômico-social das áreas banhadas por suas águas tem sido constantemente foco de políticas públicas e privadas que buscam o aproveitamento do recurso

hídrico, muitas vezes vinculadas à ampliação das formas de uso e ocupação do solo. (Pinto e Martins-Neto, 2001).

Apesar de a região apresentar uma rede de drenagem bastante densa, a principal fonte de abastecimento de água para consumo humano dentro do CNPMS e em seu entorno são os aquíferos cársticos visto que os córregos apresentam vazões insuficientes, além de serem contaminados por esgotos provenientes das cidades de Sete Lagoas e de Prudente de Morais.

Esses aquíferos, por apresentarem alto grau de fraturação e pela formação de cavidades, permitem uma maior infiltração da água, o que os torna muito produtivos, mas também altamente vulneráveis à contaminação.

Tais peculiaridades envolvendo os aquíferos cársticos têm justificado inúmeros estudos realizados em suas áreas de ocorrência visto que esses aquíferos apresentam grande importância como fonte de água para abastecimento, aliada a uma hidrodinâmica complexa a qual gera a impossibilidade de extrapolar resultados e propor generalizações.

Este trabalho faz parte de um projeto desenvolvido através de um acordo de colaboração técnica entre o Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG, o CNPMS e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) que visa realizar um estudo hidrogeológico ambiental de investigação do comportamento de contaminantes no solo e na água subterrânea com destaque para o íon nitrato, originado de fertilizantes nitrogenados e do herbicida atrazina, de uso disseminado na cultura do milho, do sorgo e da soja que são as principais lavouras existentes no CNPMS.

Para que o comportamento e o transporte desses contaminantes seja avaliado é necessário um detalhamento da hidrogeologia e da hidrodinâmica desses aquíferos. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo preliminar de caracterização da hidrogeologia local e, a partir dela, criar um modelo hidrogeológico computacional que permita identificar linhas de fluxo, áreas de recarga, as interações entre aquíferos superficiais e subterrâneos e analisar parâmetros ambientais tornando-se assim um ponto de partida para estudos futuros e para os estudos em curso neste projeto e para o planejamento do uso do solo de toda a área.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar uma caracterização hidrogeológica preliminar do entorno do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS), localizado na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais, utilizando como ferramenta o aplicativo computacional Visual MODFLOW (Guiguer e Franz, 1996).

2.2 Objetivos Específicos

- Definir os domínios geográficos da microbacia hidrográfica com influência hidrogeológica nos terrenos do CNPMS a qual será denominada de região de interesse ou área de estudo.
- Levantar e organizar os dados existentes sobre a área de estudo.
- Mapear todos os pontos de água superficial e subterrânea de importância presentes dentro da área de estudo.
- Elaborar mapas temáticos (solos, geologia, uso e ocupação do solo, etc.) a partir da coleta de dados inicial.
- Definir o balanço hídrico da região.
- Construir um modelo hidrogeológico conceitual localizando zonas de recarga e descarga dos aquíferos.
- Analisar o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos da área através de um modelo computacional de escoamento das águas subterrâneas.
- Avaliar a capacidade de produção de água dos poços.
- Localizar as zonas de captura dos poços, cisternas, nascentes e lagoas.
- Propor a realização de estudos complementares, que permitam aprimorar a caracterização hidrogeológica aqui apresentada.

3 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2006), estimativas indicam a existência de pelo menos 400 mil poços de águas subterrâneas no país. A água de poços e de fontes vem sendo utilizada intensamente para diversos fins, tais como abastecimento humano, dessedentação de animais, irrigação, indústria e lazer. No Brasil, 15,6% dos domicílios utilizam exclusivamente água subterrânea, sendo que na cidade de Sete Lagoas essa proporção sobe para 80%.

Pinto e Martins-Neto (2001) atribuem a ampliação do uso da água subterrânea na bacia do rio São Francisco, onde se localiza a cidade de Sete Lagoas, a uma conjunção de fatores, dentre eles: a redução da disponibilidade do recurso hídrico superficial em decorrência da utilização intensiva; os menores custos envolvidos na captação; a qualidade da água, que, em geral, dispensa tratamento; e, o avanço no conhecimento do potencial hídrico subterrâneo motivado pelos diversos estudos desenvolvidos na bacia.

A região cárstica da província hidrogeológica do São Francisco apresenta uma importante reserva hídrica equivalente a 780 km³ de águas subterrâneas, concentradas em uma área de 400.000 km² correspondente ao sistema aquífero Bambuí (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

Segundo Feitosa e Filho (1997) as regiões cársticas normalmente são áreas de grande interesse econômico e hidrogeológico porque, na maioria das vezes, possuem bons solos, não apresentam drenagem superficial e possuem grandes reservas de água no subsolo.

Dada a importância das águas subterrâneas nessas áreas e a sua complexidade hidrodinâmica, cada vez mais se faz necessário um detalhamento do comportamento desses aquíferos para que sejam propostas estratégias de preservação dos recursos hídricos, tanto em termos de qualidade quanto de manutenção das reservas disponíveis.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2006), o setor agrícola brasileiro é o principal usuário dos recursos hídricos, e é na área física abrangida por esse setor que pode ocorrer a maioria das intervenções para a melhoria da utilização da água, o que torna necessária a integração entre as práticas agrícolas e as ações de preservação dos mananciais hídricos.

Conforme destaca Raij (2003), a preocupação com a possível escassez de água tem despertado a atenção sobre o papel do solo para sua captação, armazenamento e como condicionador da qualidade. Certamente, o cuidado com o solo é o fator determinante no cuidado com a água. Como expressa muito bem um ditado escrito em inglês, representando um antigo pensamento chinês: “As the soil, so the water”.

Essa preocupação torna-se latente em relação à área do CNPMS por essa encontrar-se em uma região de cerrado onde, segundo Silva *et. al.* (2001) os solos, em sua maioria, são profundos e em condições naturais, apresentam baixa fertilidade, acidez elevada e altos teores de alumínio, necessitando de aplicações de corretivos como calcário e fertilizantes para atingirem produtividade satisfatória.

Para que estudos de uso racional da água subterrânea e do comportamento de contaminantes na água e no solo sejam efetuados é necessário o conhecimento preliminar do comportamento hidrodinâmico do aquífero o que torna a caracterização hidrogeológica uma base importante para o desenvolvimento de estudos futuros.

Portanto, este trabalho apresenta-se como uma etapa inicial necessária para o desenvolvimento do projeto de caracterização do transporte de poluentes proposto pelo grupo de estudos conforme previsto no convênio de colaboração técnica entre as instituições: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS) pertencente à Embrapa e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos foram realizados segundo um desenvolvimento metodológico que compreende as seguintes etapas: levantamento bibliográfico, trabalhos de campo, caracterização da área e modelagem hidrogeológica.

4.1 Levantamento Bibliográfico

Realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica com foco em trabalhos de caracterização da área de estudo, em especial sobre os aspectos geológicos e hidrogeológicos em nível local e regional, descrição do comportamento hidrodinâmico em aquíferos, com ênfase no domínio cárstico, e aplicação de modelos hidrogeológicos computacionais na caracterização hidrogeológica.

4.2 Trabalhos de Campo

4.2.1 Reconhecimento da área

Durante o período de março a julho de 2007, foram realizadas diversas campanhas de coleta de dados em campo nas quais foram desenvolvidos os seguintes trabalhos:

- Cadastro dos pontos d'água de interesse com sua descrição, registro fotográfico, medida de coordenadas de localização em UTM;
- Cadastro dos afloramentos de rocha com descrição, registro fotográfico e medida de coordenadas de localização em UTM;
- Mapeamento de lagoas e do canal de irrigação do CNPMS, ainda não representados nos mapas existentes, através de caminhamento com GPS medindo as coordenadas locais em UTM;
- Verificação de pontos de interesse cartográfico para conferência dos mapas de trabalho.

4.2.2 Monitoramento ambiental

O monitoramento foi realizado em dois períodos do ano: a primeira etapa foi desenvolvida durante o reconhecimento da área, que ocorreu no fim do período chuvoso, já a segunda etapa ocorreu no fim da estação seca.

Foram monitorados os níveis de águas nos poços, cisternas e nascentes; as características químicas da água foram avaliadas através da medida dos parâmetros: condutividade elétrica, pH e Eh (potencial redox).

4.3 Caracterização da Área de Estudo

Com o objetivo de realizar a caracterização das condições ambientais da área, realizou-se uma pesquisa bibliográfica que foi enriquecida pelas observações de campo e pela elaboração de mapas temáticos envolvendo os principais aspectos físicos de interesse. Entre esses, encontram-se os tipos de solo, uso e cobertura do solo e uso da água. Algumas das caracterizações merecem destaque e serão descritas a seguir.

4.3.1 Topologia

O mapa topográfico foi construído pelo setor de geoprocessamento do CNPMS a partir da imagem SRTM S20W45(modelo digital de elevação fornecido pela NASA na rede mundial de computadores) que envolve toda a área de modelagem.

Essa imagem oferece dados de relevo que foram traduzidos em curvas de nível, de 10 em 10 m, originadas no programa computacional Global Mapper.

4.3.2 Climatologia e balanço hídrico

Por meio da análise dos dados climatológicos da área, obtidos na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada dentro do CNPMS, fez-se uma observação das principais características do clima da região com construção de hidrogramas com demarcação dos períodos secos e chuvosos, avaliação dos índices pluviométricos em cada período e avaliação do déficit hídrico.

4.3.3 Hidrologia

Utilizando o aplicativo computacional MapInfo versão 7.5, o laboratório de geoprocessamento do CNPMS realizou a vetorização do mapa do IGA (1988).

Tendo esse mapa em mãos fez-se um trabalho de verificação com os dados de campo além da inclusão de pontos de água não existentes no mapa de origem.

4.3.4 Geologia

Realizou-se uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos realizados no entorno da área buscando identificar a estratigrafia e os aspectos estruturais da geologia local e regional. A essas informações foram acrescentadas as observações feitas em campo através da caracterização de afloramentos rochosos.

Uma importante ferramenta nessa caracterização foi também a análise das informações dos perfis de poços cadastrados pelo projeto denominado Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS), administrado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Um resumo desses dados é apresentado no Anexo 1.

4.3.5 Hidrogeologia

A caracterização da hidrogeologia foi realizada a partir da revisão bibliográfica e da análise dos dados de vazão dos poços cadastrados pelo projeto SIAGAS, fornecidos pela CPRM.

Foram identificadas e descritas as principais camadas hidroestratigráficas, bem como o comportamento hidrodinâmico em cada uma delas.

4.4 Modelagem Hidrogeológica

4.4.1 Modelo hidrogeológico conceitual

Após a caracterização da área, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico conceitual que definiu as seguintes características:

- definição da área de influência do CNPMS;
- definição das unidades hidroestratigráficas existentes;

- definição do sistema de fluxo em cada unidade hidroestratigráfica; e,
- definição das áreas de recarga e de descarga do aquífero subterrâneo.

4.4.2 Modelo hidrogeológico computacional

Para o desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional foram seguidas as etapas metodológicas:

- definição da base topográfica, a partir da caracterização da topologia;
- definição do domínio de modelagem, a partir de adaptações de um mapa de delimitação de bacias construído pelo laboratório de geoprocessamento da UFV (Universidade Federal de Viçosa) utilizando a ferramenta Watershed existente no aplicativo ArcView;
- incorporação das camadas hidroestratigráficas definidas pelo modelo hidrogeológico conceitual;
- atribuição dos valores dos parâmetros hidráulicos para cada unidade hidroestratigráfica baseado em dados encontrados na literatura;
- definição das condições de contorno, tais como cargas constantes, fluxo zero e drenos; e,
- calibração do modelo por meio de ajustes nos valores de recarga e dos parâmetros hidráulicos utilizando como referência os valores de cota na água nos poços, cisternas e nascentes e da vazão nos córregos.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A região em estudo apresenta características geográficas e geológicas bastante peculiares o que levou a um grande interesse por parte de pesquisadores em realizar estudos de caracterização local. A seguir serão descritos alguns dos trabalhos que serviram como referência para a definição das bases do presente estudo.

Segundo Nogueira (2003), a posição de destaque regional da cidade de Sete Lagoas atribui-se à sua posição geográfica de proximidade com Belo Horizonte e de contato entre duas grandes regiões fisionômicas e sócio-espaciais no conjunto do estado de Minas Gerais.

Essas regiões fisionômicas apresentam como um dos principais fatores de distinção as características geológicas que acabam por influenciar a formação da paisagem. Tal geologia é caracterizada, em escala regional, por Pinto e Martins-Neto (2001), com o auxílio de outros autores, que apresentam uma descrição geral da Bacia do São Francisco além de assinarem o capítulo introdutório em que discutem o significado geológico do termo “Bacia do São Francisco” e apresentam uma síntese dos dados disponíveis a respeito dessa bacia. Os capítulos dessa publicação que se destacam no âmbito da presente pesquisa são: o capítulo elaborado por Alkmim e Martins-Neto (2001) que trata da caracterização do arcabouço estrutural e da proposição dos cenários evolutivos das unidades geológicas da bacia intracratônica; e a caracterização hidrogeológica apresentada por Mourão *et. al.* (2001) que aborda uma descrição geral dos principais tipos de aquíferos presentes em toda a extensão da bacia.

Uma das formações geológicas mais estudadas dentro da Bacia do São Francisco é o Grupo Bambuí, com destaque para as descrições e divisões estratigráficas desse grupo. A primeira referência que se faz a essa formação geológica, com essa nomenclatura, ocorreu em 1917, realizada por Rimann (1917). A partir daí, diversos pesquisadores propuseram subdivisões das colunas estratigráficas dessa formação com destaque para os trabalhos de Costa e Branco (1961), Barbosa (1965), Oliveira (1967), Braun (1968), Scholl (1976), Dardenne (1978) e Grossi Sad e Quade (1985) resumidos por Dardenne (1978) e apresentados na **Tabela 5.1** conforme adaptação realizada por Pessoa (1996).

Tabela 5.1 - Síntese das colunas estratigráficas propostas por diversos autores e apresentadas por Dardenne (1978), citado por Pessoa (1996).

Coluna Litoestratigráfica	Branco e Costa 1961		C. Barbosa 1965	Oliveira 1967	Braun 1968	Scholl 1972, 1973	Dardenne 1978	Grossi Sad eQuade 1985
. Siltitos e folhelhos verdes-carbonáticos	Membro Serra da Saudade Três Marias	Formações	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Formação Três Marias	Grupos Superiores
. Siltidos verdes							Serra da Saudade	
. Arcóseos avermelhados							Três Marias	
. Lentes de arcóseos escuros	Lagoa do Jacaré	Rio	Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré		Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré	
. Siltitos e folhelhos cinza-escuros								
. Calcários e dolomitos	Serra de Santa Helena	Paraopeba	Serra Gineta	Serra de Santa Helena	Paraopeba	Serra de Santa Helena	Serra de Santa Helena	Bambuí
. Calcários escuros com intraclastos e oólitos								
. Siltitos e folhelhos								
. Siltitos e folhelhos		Sete Lagoas	Sete Lagoas	Sete Lagoas		Sete Lagoas	Serra de Santa Helena	"Strictu Sensu"
. Folhelhos cinza-esverdeados								
. Folhelhos com lentes de margas e calcários								
. Metapelitos escuros						Lagoas	Lagoas	
. Calcários com estromatólitos								
. Calcários cinza-escuros						Lagoas	Sete	
. Calcários finamente laminados								
. Mármores com quartzo e clorita						Lagoas	Lagoas	
. Calcários negros e dolomitos								
. Mármores e filitos						Lagoas	Lagoas	
. Calcários negros e dolomitos								
. Mármores e filitos						Lagoas	Lagoas	
. Mármores e filitos								
. Conglomerados, arcóseos e filitos		Carrancas		Jequitaiá		Macaúbas	Jequitaiá	Vespasiano
OBS.: Embasamento ou unidades pré Supergrupo São Francisco								

Constatada a particularidade e a vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos locais, bem como sua importância no abastecimento de água e o crescente desenvolvimento da região, surgiu uma nova linha de pesquisa, agora com enfoque ambiental, iniciada com um estudo realizado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Tal estudo, denominado Projeto VIDA (Viabilidade Industrial e Defesa Ambiental), é voltado para um levantamento multidisciplinar de dados do meio físico com vistas ao planejamento territorial a nível urbano e rural.

Os resultados desse trabalho foram publicados por CPRM (1994v.1; 1994v.5; 2003), apresentando dados a respeito das características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e de uso e ocupação dos solos. Tal publicação abrange toda a área conhecida como região cárstica de Lagoa Santa-Sete Lagoas que inclui os municípios: Confins, Lagoa Santa, Matozinhos, Pedro Leopoldo, Sete Lagoas, Vespasiano, Prudente de Morais, Funilândia e Capim Branco.

Em paralelo com os trabalhos do Projeto VIDA, Pessoa (1996) realizou uma pesquisa de caracterização hidrogeológica da cidade de Sete Lagoas detalhando a estratigrafia local, as condições de fluxo da água, recarga e descarga de aquíferos e caracterização da qualidade da água. Tal pesquisa foi desenvolvida a partir da análise de dados construtivos de poços, observações de campo, além de dados de alguns testes de bombeamento realizados em poços instalados na região.

Tendo em vista a complexidade da hidrogeologia nos terrenos cársticos, essa linha de pesquisa tem se tornado cada vez mais presente nos projetos acadêmicos. Um exemplo disso são os estudos desenvolvidos na região por Silva (2003) e Pessoa (2005), adaptando novas ferramentas de apoio no entendimento do comportamento hidrogeológico desses ambientes.

Silva (2003), em sua dissertação, realiza uma caracterização hidrogeológica da área de influência de uma mina de extração de calcário localizada na cidade de Lagoa Santa utilizando um modelo computacional para simular as linhas e condições de fluxo da água subterrânea e avaliar a influência da mineração sobre esse sistema.

Posteriormente, na mesma área estudada por Silva (2003), foram adotadas formas complementares de identificação de rotas de fluxo, tais como, transporte de traçadores e

avaliação hidroquímica. Esse trabalho foi desenvolvido por Pessoa (2005), possibilitando um melhor entendimento do comportamento hidrodinâmico do aquífero cárstico em questão.

6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

6.1 Localização

A cidade de Sete Lagoas localiza-se próxima à região metropolitana de Belo Horizonte acerca de 70 km da capital em direção noroeste. Marcando a divisa do município com a cidade de Prudente de Moraes encontra-se o CNPMS, sendo a principal via de acesso a esse centro a rodovia estadual MG 424 no km 65.

Segundo Nogueira (2003), Sete Lagoas tem uma posição privilegiada, pois está no contato de duas grandes regiões fisionômicas e socioespaciais de Minas Gerais (**Figura 6.1**). “Está-se falando do contato entre o Quadrilátero Ferrífero, zona de ocorrência predominante de minerais ferrosos e da floresta tropical úmida, com vegetação primitiva do centro-sul e leste (as Minas) e a região dos calcários do Bambuí, com uma típica vegetação de cerrado na qual sobressaem os campos limpos e os cocais, os quais, por sua vez, encontram-se conjugados a uma presença marcante das pastagens (as Gerais)” (Nogueira, 2003).

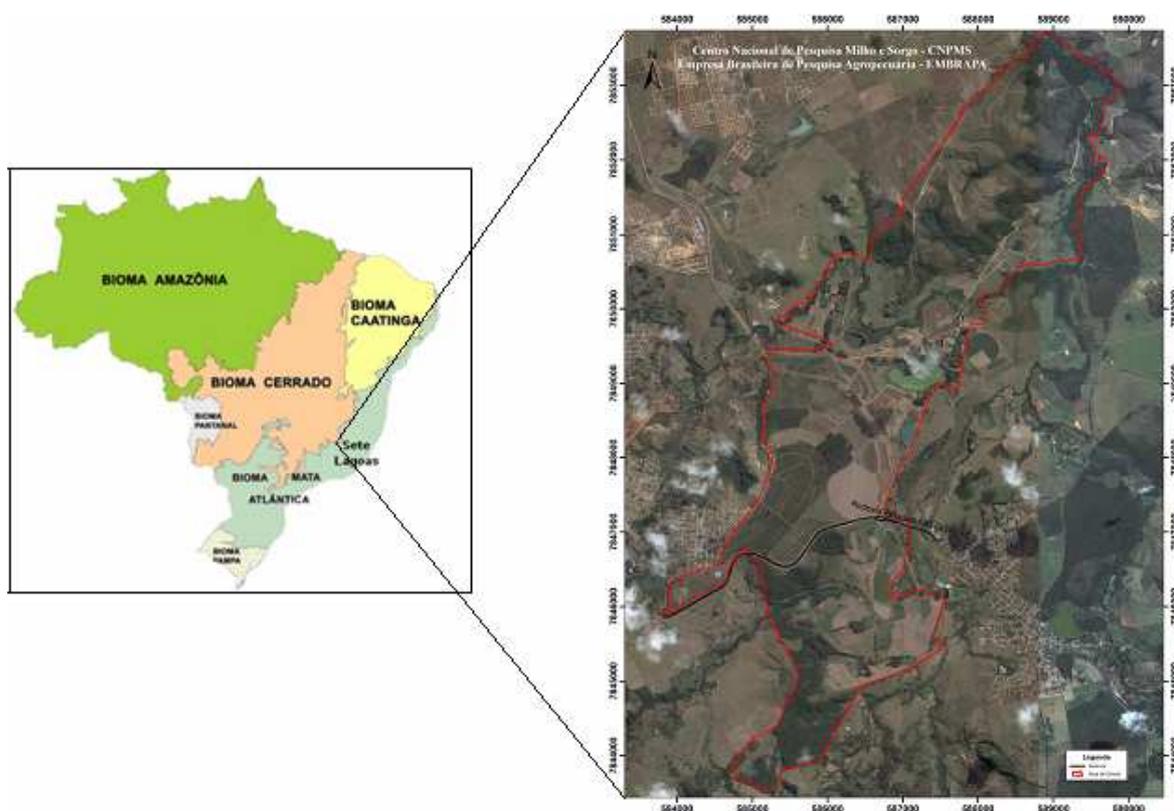


Figura 6-1 - Mapa das paisagens naturais do Brasil (IBGE, 2004) com destaque para a cidade de Sete Lagoas e ampliação da área do CNPMS.

Avellar e Silva (2000) associam a escolha da localização do CNPMS à presença do cerrado visto que as terras dessa região eram consideradas pobres e pouco produtivas e representam 20% do estado de Minas Gerais, carecendo de pesquisas que revelassem seu potencial agrícola.

6.2 Clima

A região apresenta clima tropical úmido com duas estações bem definidas ao longo do ano. Uma estação fria e seca, que abrange o período de abril a outubro, e a estação quente e úmida que se estende de novembro a março.

Os dados aqui analisados têm como fonte a Estação Meteorológica de Sete Lagoas localizada dentro do CNPMS (**Figura 6.2**) e administrada pelo Instituto de Meteorologia (INMET). Essa estação foi criada em 1926, tendo sido transformada em Estação Climatológica Principal em março de 1967. Neste trabalho foram utilizados os dados correspondentes ao período de janeiro de 1960 a dezembro de 2006.



Figura 6-2 - Estação meteorológica de Sete Lagoas, instalada na área do CNPMS.

6.2.1 Temperatura e Pluviometria

A temperatura média na região encontra-se em torno de 20 °C no período seco, chegando a atingir temperaturas mínimas próximas a 15 °C, enquanto que durante o período chuvoso a temperatura média sobe para 23 °C, sendo a máxima registrada no ano aproximadamente 25 °C. Os dados citados acima podem ser observados na **Figura 6.3** que apresenta a distribuição média da temperatura na região, ao longo do ano.

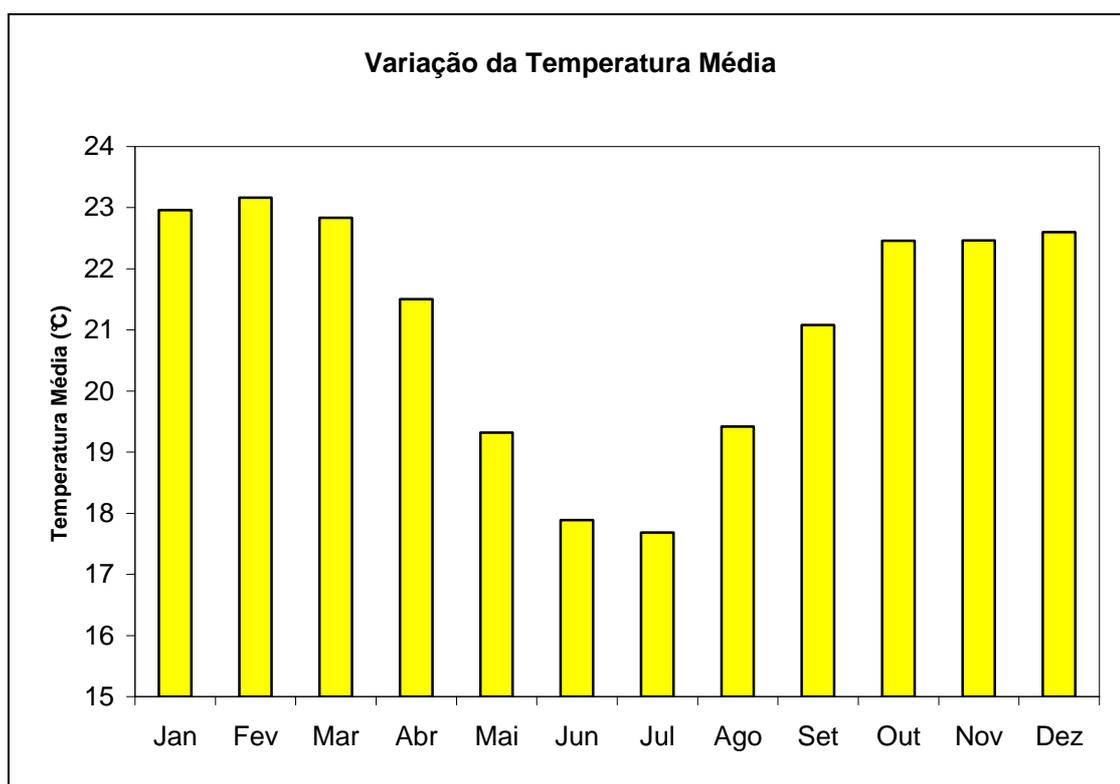


Figura 6-3 - Variação da temperatura média mensal na área do CNPMS no período de janeiro de 1960 a dezembro de 2006. Fonte: INMET.

A pluviometria média ao longo do ano encontra-se em torno de 1.000 a 1.500 mm/ano, sendo que 82 % da precipitação anual se concentram entre os meses de novembro e março e apenas 18 % ocorrem durante a seca. Para os cálculos de evapotranspiração real e balanço hídrico será adotado para a precipitação o valor médio calculado para o período de janeiro de 1960 a dezembro de 2006 que é de 1.382 mm/ano.

6.3 Balanço Hídrico

6.3.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração é considerada, segundo Tucci e Beltrame (2001), como a perda de água por evaporação da água do solo e transpiração da planta, sendo importante para o balanço hídrico de uma bacia como um todo e, principalmente para o balanço hídrico agrícola.

A evapotranspiração é um fenômeno complexo devido à influência de diversas variáveis tais como: precipitação; temperatura; e, tipo de vegetação. Em regiões de disponibilidade hídrica insuficiente, como em áreas de ocorrência de estações secas prolongadas, essa passa a ser uma característica limitante do processo, visto que a transferência de água para a atmosfera passa a depender de sua disponibilidade, ou seja, da taxa de precipitação ou da irrigação de culturas. Essa diferenciação nas condições de evapotranspiração exigiu a distinção entre esses fenômenos, sendo denominado evapotranspiração potencial quando a disponibilidade hídrica é suficiente para o crescimento das plantas e evapotranspiração real quando sob condições reais de fatores atmosféricos e de umidade do solo que pode ser insuficiente para o crescimento das plantas.

A evapotranspiração potencial pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas de forma rápida e suficientemente precisa. Neste estudo será adotada a Equação de Penman por essa envolver diversas variáveis tais como: temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, conforme pode ser observado na Equação 6.1 Marcuzzo *et. al.* (2008), tornando-a mais confiável que as demais além de ter apresentado resultados dentro do esperado para a área de estudo.

$$ETP = \frac{\frac{R}{L} \Delta + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \quad (6.1)$$

Sendo:

ETP = evapotranspiração potencial em mm/dia;

R = radiação solar líquida em cal/cm².dia;

L = calor latente de vaporização em cal/mm;

E_a = evaporação aerodinâmica em mm/dia;

Δ = declividade da curva de pressão de saturação em mb/K; e,

γ = constante psicrométrica em mb/K.

Tais resultados, disponibilizados para esta pesquisa pelo CNPMS, são apresentados na **Figura 6.4**, juntamente com os dados de pluviosidade, deixando clara a existência de um déficit hídrico no período entre os meses de abril e outubro, provocado pela manutenção de temperaturas médias acima de 20 °C, mesmo na estação fria e seca.

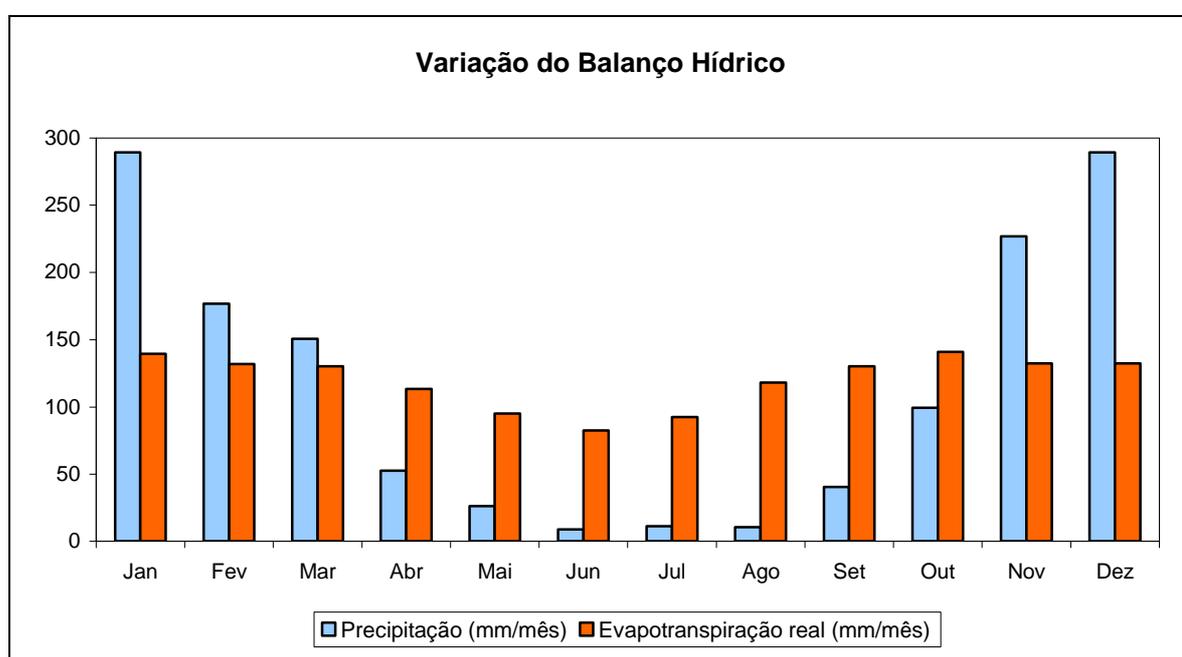


Figura 6-4 - Variação do balanço hídrico através da comparação entre precipitação e evapotranspiração potencial no período de janeiro de 1960 a dezembro de 2006. Fonte: INMET.

A evapotranspiração real é um processo complexo e extremamente dinâmico que envolve organismos vivos, solos e cobertura vegetal além de sua dependência em relação à disponibilidade hídrica local, portanto, existe uma grande dificuldade em se obter informações confiáveis sobre tal grandeza. Ela pode ser determinada pela utilização de fórmulas empíricas baseadas em fatores climáticos, tais como: temperatura média e altura de precipitação ou ainda pela equação do balanço hídrico quando as demais variáveis são conhecidas.

No presente trabalho foram utilizadas duas metodologias diferentes para o cálculo da evapotranspiração real, ambas baseadas em dados de temperatura e precipitação, que serão descritas a seguir.

A metodologia de L. Turc calcula a evapotranspiração real anual média através da seguinte expressão empírica (Vasconcelos, 1994):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (6.2)$$

Sendo:

ETR = evapotranspiração real média anual, expressa em mm/ano;

P = altura média anual de precipitação, expressa em mm/ano;

L = parâmetro empírico dado pela equação 6.3.

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (6.3)$$

Onde:

T = temperatura média anual, em °C.

Os dados obtidos através da Equação 6.2 são apresentados na **Tabela 6.1** indicando um valor médio de evapotranspiração real, segundo a equação de L. Turc, de 949,51 mm/ano.

Outra metodologia utilizada para a determinação da evapotranspiração real média anual é conhecida como fórmula de Coutagne, representada pela expressão empírica (Vasconcelos, 1994):

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (6.4)$$

Sendo:

ETR = evapotranspiração real média anual, expressa em m/ano;

P = precipitação média anual, expressa em m/ano;

λ = parâmetro empírico dado pela Equação 6.5.

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T} \quad (6.5)$$

Onde:

T = temperatura média anual, em °C.

Os dados de temperatura e de precipitação já apresentados anteriormente foram utilizados no cálculo da evapotranspiração real média anual estimado em 846,16 mm/ano conforme os dados apresentados na **Tabela 6.1**.

Uma comparação entre os dados de precipitação e de evapotranspiração real segundo os métodos de L. Turc e de Coutagne encontra-se no gráfico da **Figura 6.5**.

Tabela 6.1 - Evapotranspiração real média anual calculada segundo as equações de L. Turc e de Coutagne. Fonte: INMET.

Ano	T média anual (°C)	Precipitação (mm/ano)	ETR L. Turc (mm/ano)	ETR Coutagne (mm/ano)
1960	20,4	1425,7	952,2	868,8
1961	21,0	1512,8	1001,3	900,5
1962	20,3	1966,8	1053,3	903,3
1963	21,6	463,9	459,4	407,5
1964	20,6	1583,1	1002,7	903,5
1965	20,3	1762,6	1024,8	910,7
1966	20,9	1316,2	940,1	851,1
1967	21,1	1163,8	890,3	802,6
1968	19,8	1060,7	811,9	745,4
1969	21,8	1308,0	969,9	864,1
1970	21,6	1226,3	931,4	832,9
1971	21,1	1300,5	941,6	849,7
1972	21,0	1311,8	941,3	851,1
1973	21,6	1420,2	1000,0	892,8
1974	20,8	1240,8	911,4	826,2
1975	20,9	1124,9	869,1	785,1
1976	20,9	1165,3	886,7	801,2
1977	21,4	1236,5	929,7	834,0
1978	20,5	1459,9	966,4	878,8
1979	20,4	2233,9	1095,9	871,1
1980	21,0	1318,4	945,9	854,2
1981	20,5	1467,5	969,1	880,7
1982	20,9	1083,7	851,7	768,4
1983	20,9	1992,8	1092,9	927,3
1984	21,4	1092,7	869,7	778,4
1985	20,5	1853,2	1049,3	917,7
1986	21,3	936,4	788,6	704,1
1987	21,7	1350,3	980,2	874,9
1988	21,1	1506,3	1005,3	902,3
1989	21,0	1248,7	920,6	831,8
1990	21,5	909,3	778,2	692,2
1991	20,9	1646,3	1027,6	917,8
1992	20,9	1995,2	1095,1	928,5
1993	21,4	1050,9	849,5	759,8
1994	21,5	1412,1	991,6	887,8
1995	21,6	1499,6	1022,1	910,6
1996	21,1	1542,9	1014,9	909,2
1997	21,2	1645,0	1045,4	928,0
1998	22,1	1367,1	999,7	886,4
1999	21,4	1219,2	920,9	826,9
2000	21,4	1417,7	990,8	887,9
2001	21,7	1440,9	1009,5	899,4
2002	22,0	1186,2	928,1	823,9
2003	21,7	1195,8	920,9	822,5
2004	21,3	1478,1	1003,5	899,5
2005	21,5	1508,6	1023,6	912,0
2006	21,3	1314,1	953,1	857,1
Média	21,1	1382,2	949,5	846,2
Desvio Padrão	0,5	313,1	104,8	87,5

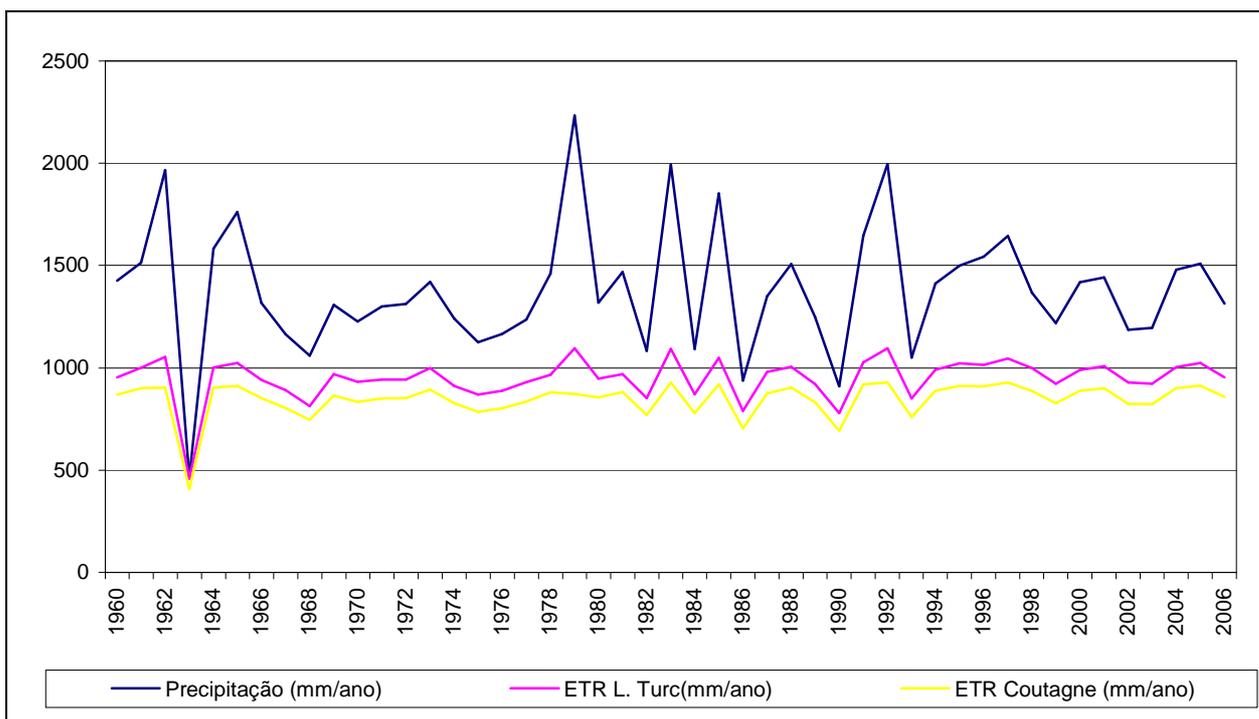


Figura 6-5 - Comparação entre os valores de precipitação e de evapotranspiração real calculada segundo as equações de L. Turc e de Coutagne, para a região do CNPMS.

Apesar de utilizarem os mesmos dados de temperatura e precipitação média anual, as metodologias adotadas no cálculo da evapotranspiração real apresentaram resultados muito diferentes, confirmando a previsão feita por Tucci e Beltrame (2001) da difícil confiabilidade desses modelos adotados. Para uma conferência desses resultados será realizado um novo cálculo, apresentado no tópico a seguir, utilizando a equação do balanço hídrico.

6.3.2 Escoamento superficial e subterrâneo

De acordo com Tucci (2001) os escoamentos são, em geral, definidos em: escoamento superficial, que representa o fluxo sobre a superfície do solo e pelos seus múltiplos canais; subsuperficial que alguns autores definem como o fluxo que se dá junto às raízes da cobertura vegetal; e, subterrâneo que é o fluxo devido à contribuição do aquífero.

Por ser muito reduzido, o escoamento subsuperficial não é considerado nas análises de hidrogramas, os quais fazem a distinção entre o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo. Essa distinção é realizada por meio de métodos gráficos que separam as parcelas referentes a cada tipo de escoamento por uma linha divisória. O volume abaixo da linha

traçada corresponde ao escoamento subterrâneo enquanto o volume acima dessa linha é identificado como escoamento superficial.

O traçado dessa linha divisória pode ser feito por três métodos diferentes, ilustrados na **Figura 6.6**.

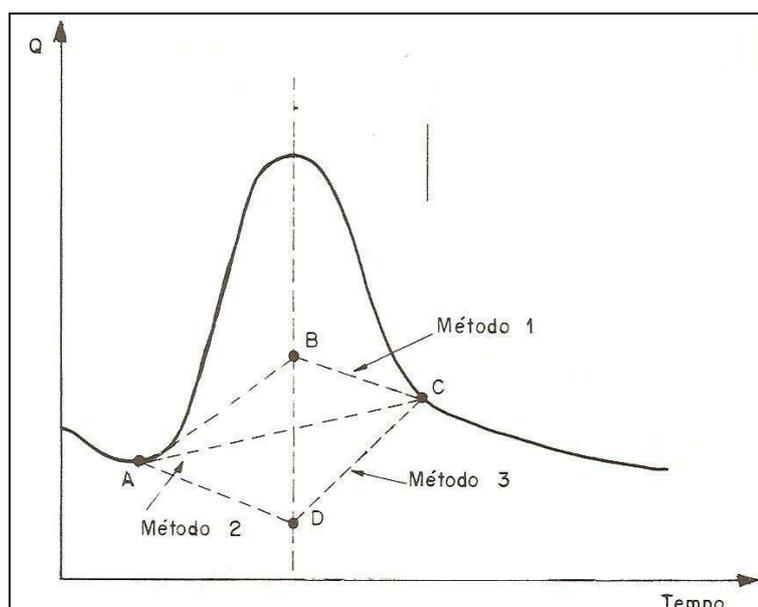


Figura 6-6 – Técnicas de separação dos tipos de escoamento. Sendo, método 1 – método do escoamento fixo de base; método 2 – método da linha reta; método 3 – método da inclinação variável. Fonte: Tucci e Beltrame (2001).

No presente trabalho será adotado o método da linha reta que consiste em desenhar uma linha reta do ponto onde a precipitação inicia-se até o momento onde a mesma intercepta a curva de recessão.

Dessa forma foram analisados os hidrogramas de três estações fluviométricas localizadas na área de interesse do trabalho, obtidos junto à Agência Nacional de Águas (ANA). As estações aqui citadas são identificadas a seguir.

- Estação Curtume – Instalada no Ribeirão Matadouro, a montante da área do CNPMS. Possui uma área de drenagem de 64 km² e uma série histórica de dados a partir de junho de 1965 até dezembro de 1970.

- Estação Represa – Instalada no Ribeirão Jequitibá, na entrada da Represa Olhos D’água, localizada no município de Funilândia. Apresenta uma área de drenagem de 175 km² e uma série histórica com dados do período entre agosto de 1967 e dezembro de 1979.
- Estação Represa Jusante – Instalada no Ribeirão Jequitibá, a jusante da Estação Represa, também no município de Funilândia. Abrange uma área de drenagem de 227 km² e apresenta uma série histórica de dados entre o período de junho de 1979 a junho de 2006.

Visto que os dados de cada uma das estações fluviométricas correspondem a diferentes períodos de tempo, optou-se por calcular os valores de escoamento superficial e subterrâneo de cada uma das estações, sempre considerando o período de um ano e, além disso, ao final, fez-se uma média desses valores. Tais dados são apresentados na **Tabela 6.2**.

Tabela 6.2 - Escoamento superficial e subterrâneo calculados pelo método gráfico da linha reta para as estações fluviométricas instaladas na área.

Estação	Período considerado	Escoamento superficial (mm/ano)	Escoamento subterrâneo (mm/ano)
Curtume	Dez 65 - Dez 70	84,71	243,28
Represa	Dez 67 - Dez 70	96,87	234,78
Represa jusante	Jun 79 - Jun 06	153,62	273,10
	Médias (mm/ano)	117,73	250,39

6.3.3 Equação do balanço hídrico

Agora, com as estimativas dos valores do escoamento superficial e subterrâneo, pode-se avaliar novamente a evapotranspiração real por meio da Equação 6.6, conhecida como equação do balanço hídrico.

$$P - ETR - R - E_s = \Delta S \quad (6.6)$$

Onde:

P = precipitação, expressa em mm/ano;

ETR = evapotranspiração, expressa em mm/ano;

R = recarga ou escoamento subterrâneo, em mm/ano;

E_s = escoamento superficial, dado em mm/ano;

ΔS = variação do armazenamento, dado em mm/ano.

Considerando que a variação do armazenamento seja nula, justificável pelo fato de se considerar ciclos hidrológicos fechados, e conhecendo os valores de precipitação média

mediada igual a 1382 mm/ano, escoamento superficial e escoamento subterrâneo obtidos pela análise hidrográfica dados na **Tabela 6.2** foi calculada a evapotranspiração real, estimada em 1014,06 mm/ano.

A análise do balanço hídrico, quando comparada a outras formas de cálculo da evapotranspiração, também permite validar os dados de recarga obtidos através da análise dos hidrogramas das estações fluviométricas, que originalmente podem apresentar erros da ordem de 5 a 10 %, principalmente nesse caso em que os dados usados são de diferentes períodos para cada uma das estações. Segundo os cálculos aqui desenvolvidos pode-se perceber que a evapotranspiração real calculada pelo método do balanço hídrico se encontra dentro do intervalo previsto pelos demais métodos de L. Turc e de Coutagne que é de 760 a 1050 mm/ano, considerando-se a média obtida e a variação calculada pelo desvio padrão, possibilitando a adoção da recarga aqui calculada na fase de modelagem computacional do fluxo da água subterrânea.

6.4 Hidrologia

A rede de drenagem da área de estudo apresenta características bastante distintas nas diferentes regiões (**Figura 6.8**). A região ao sul do CNPMS apresenta uma ampla rede de drenagem sendo nela localizadas as principais nascentes que dão origem aos diversos córregos localizados na área. Já a área do CNPMS e toda a região ao norte do Centro apresenta uma baixa densidade de drenagem, além da redução da vazão em alguns trechos de cursos d'água, possivelmente devido à presença do aquífero cárstico que recebe grandes volumes de água por infiltração.

A hidrografia local é compreendida pela bacia do Ribeirão Jequitibá, afluente da margem esquerda do Rio das Velhas, que faz o limite sudeste da área do CNPMS em um pequeno trecho. Esse ribeirão apresenta variações em sua taxa de vazão, ao longo de seu curso, possivelmente por atravessar um terreno de ocorrência de rochas carbonáticas que podem aumentar a infiltração da água em alguns trechos.

Seus principais afluentes presentes dentro da área de estudo, como pode ser visto na **Figura 6.8**, são o Ribeirão Matadouro, que corta a área do CNPMS em sua porção noroeste, e o Córrego do Marinheiro, a sudoeste, que é a principal fonte de água para irrigação de culturas dentro do Centro.

O Ribeirão Matadouro drena toda a área urbana de Sete Lagoas, apresentando uma alta carga de contaminação por esgoto doméstico e industrial. Por isso suas águas, da maneira como se encontram, tornam-se inadequadas para o uso seja para irrigação, ou para abastecimento humano e animal.

O Córrego do Marinheiro drena a zona rural de Sete Lagoas, chegando ao CNPMS próximo ao limite sudoeste de sua área. Dentro do Centro o córrego é represado formando uma lagoa, conhecida como lagoa da Baiana, e a partir daí, suas águas são distribuídas para toda a área centro-sul através de um canal de irrigação (ver **Figura 6.7**).



Figura 6-7 – Vertedor da lagoa da Baiana, no início do canal de irrigação.

MAPA TOPOGRÁFICO E HIDROGRÁFICO BACIAS DOS RIBEIRÕES JEQUITIBÁ E MATADOURO

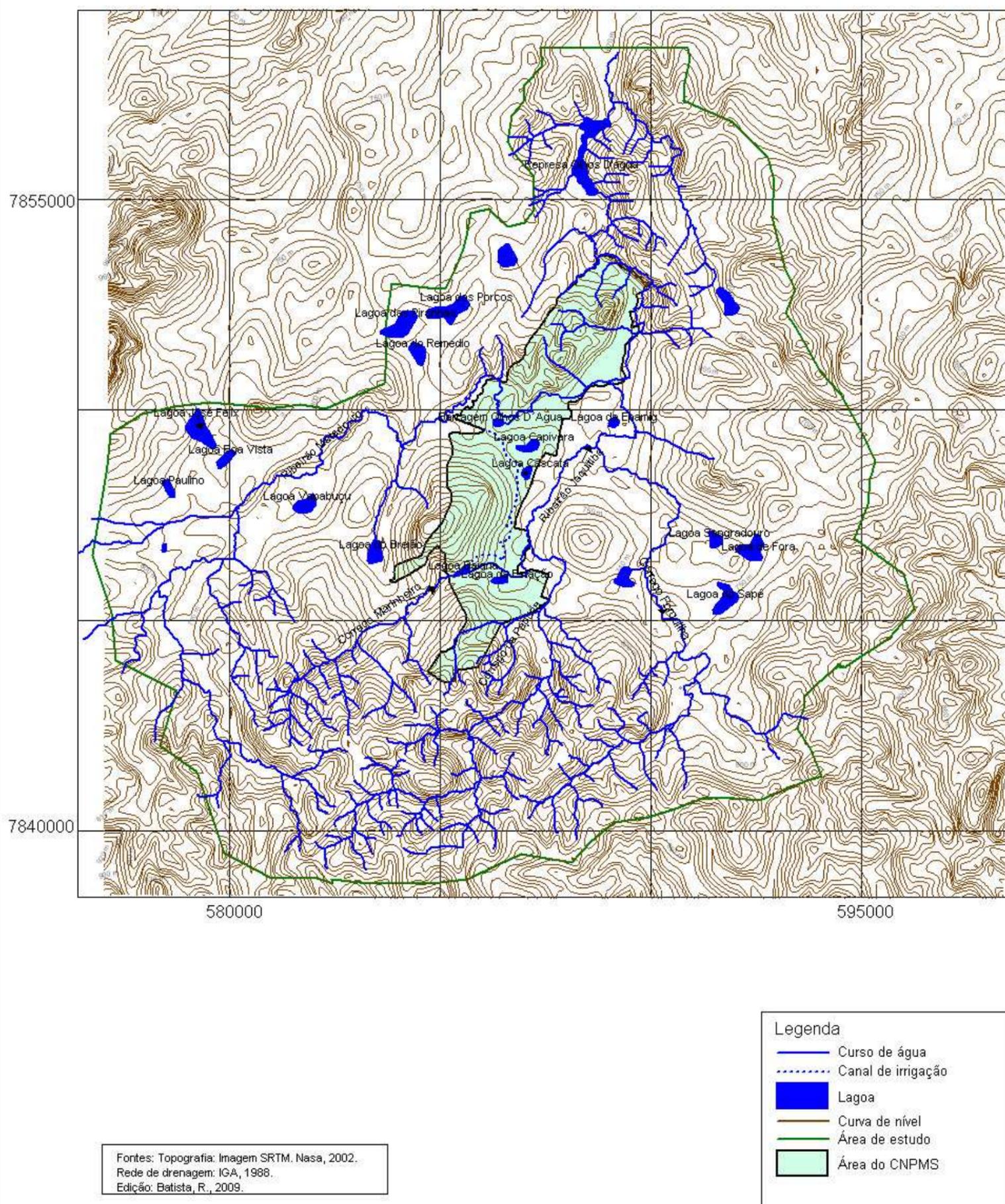


Figura 6-8 - Mapa topográfico e hidrográfico da área em estudo.

6.4.1 O sistema de irrigação do CNPMS

Considerando que o clima da região onde está o CNPMS apresenta uma estação seca bastante prolongada e que nele são desenvolvidas atividades de pesquisa agrícola de precisão, são necessárias estratégias de irrigação para o bom desempenho dos trabalhos do centro. Pensando nisso foi desenvolvido um sistema de irrigação por meio da distribuição da água por toda a área utilizada para plantio.

Como foi exposto anteriormente, a maior parte da irrigação é feita pelas águas do Córrego do Marinheiro que são distribuídas pelo canal de irrigação para toda a área centro-sul do CNPMS. Ao longo desse canal, foram construídas pequenas lagoas para acumulação da água, sendo também aproveitadas para esse fim algumas lagoas naturais e dolinas (ver **Figura 6.9**). Esse sistema encontra-se representado na **Figura 6.10**.

Um segundo canal de irrigação foi construído posteriormente para irrigar a porção norte da área que é limitada em recursos hídricos. Esse canal tem sua origem na lagoa Olhos D'água, localizada na área central e se estende por todo o norte do centro de pesquisa, sendo suas águas, não aproveitadas, vertidas no Ribeirão Matadouro.



Figura 6-9 – Dolina abastecida pelo canal de irrigação conhecida como Lagoa da Cascata.

Na porção extremo norte da área, encontram-se também pequenas nascentes represadas. Tais nascentes são utilizadas na irrigação, mas a maioria delas seca durante longos períodos sem chuvas.

6.5 Solos

Os solos encontrados na região são predominantemente os latossolos, sendo representados pelas classes latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo, e pequenas áreas de ocorrência de outras classes como: cambissolos, neossolos e gleissolos sempre associados à ocorrência de condições especiais da paisagem.

Conforme destacam Panoso *et. al.* (2001), embora o calcário esteja presente e seja apontado por diversos autores como de larga expressão na região, são poucas as evidências de sua participação ativa na formação dos solos da região. Os principais materiais originários dos solos em questão são produtos da decomposição de rochas sedimentares do Grupo Bambuí como as ardósias, os filitos, os quartzitos e os folhelhos, típicas das regiões mais altas da paisagem, que foram transportados e depositados sobre a rocha calcária.

A distribuição das classes de solos dentro do domínio em estudo é mostrada na **Figura 6.11**, obtida a partir de adaptações do mapa de solos publicado por CPRM (1994v.1) e serão descritas a seguir.

MAPA DE SOLOS
BACIAS DOS RIBEIRÕES MATADOURO E JEQUITIBÁ

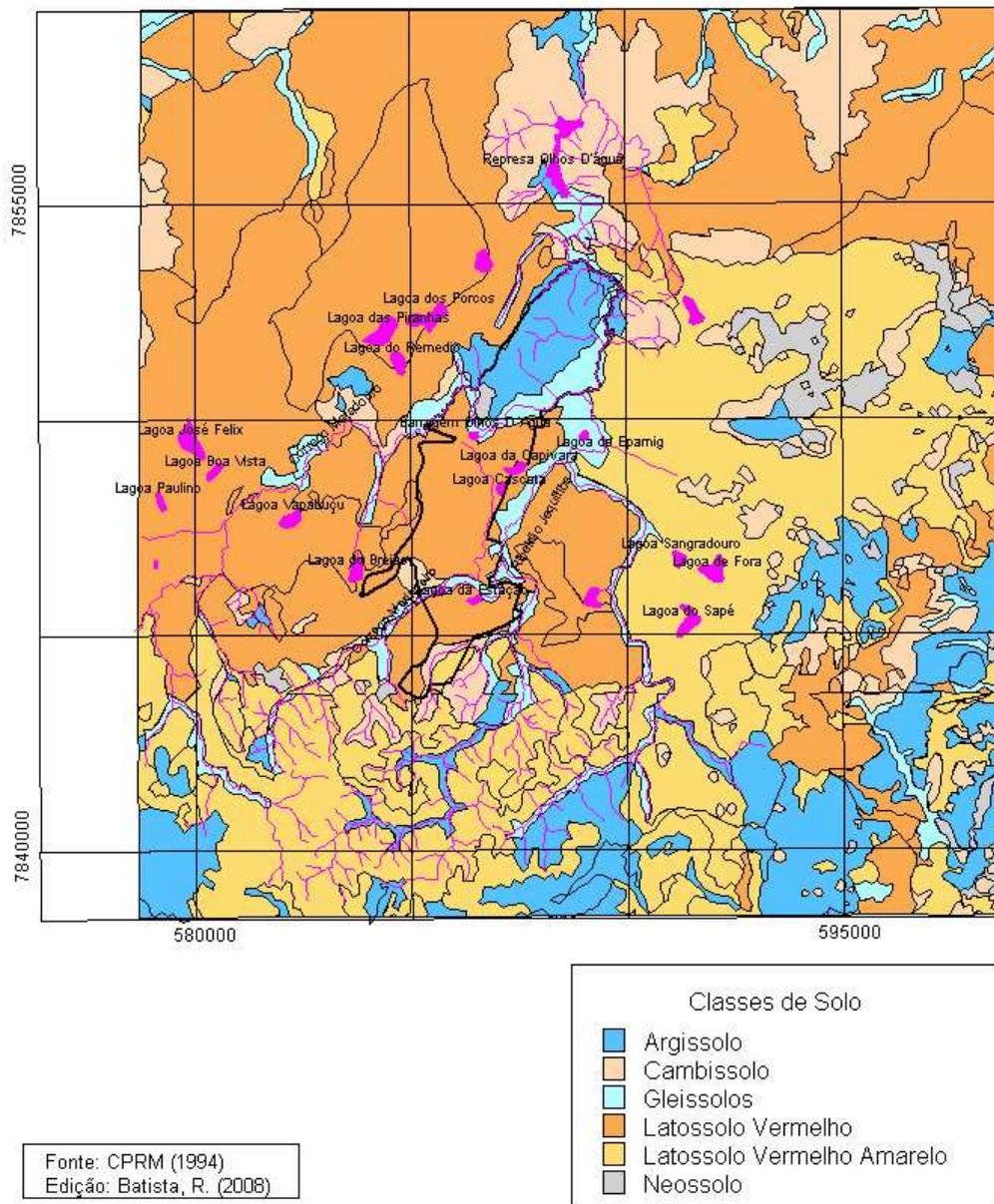


Figura 6-11 – Mapa de solos da região em estudo.

6.5.1 Latossolos

Os latossolos caracterizam-se por apresentarem um alto grau de intemperização, evidenciado pela tendência ao acúmulo residual de sesquióxidos, argilas 1:1 e minerais primários mais resistentes ao intemperismo. Esses solos possuem boas condições físicas e, portanto, apesar da baixa retenção de bases, compreendem quase toda a área utilizada na agricultura.

Os latossolos apresentam-se, principalmente, nas cores vermelho e amarelo que estão associadas à predominância da hematita para os solos vermelhos e goethita para solos amarelos.

O latossolo vermelho apresenta textura muito argilosa e aparece na paisagem associado a áreas de topografia suave sob vegetação de floresta ou cerrado e de formas de transição entre estas.

O latossolo vermelho-amarelo possui textura argilosa podendo chegar a muito argilosa. Ocorre em relevo suave ondulado e ondulado sob vegetação de floresta ou de transição desta para cerrado.

Apesar da textura desses solos ser bastante argilosa, eles apresentam porosidade de até 70 % e densidade do solo entre 0,7 e 0,9 g/cm³, indicando boas condições de drenagem.

6.5.2 Cambissolos

Os cambissolos são solos mais jovens com textura média e alto teor de silte em relação à argila. Têm sua origem em rochas pelíticas ocorrendo, portanto, associados à presença da Formação Serra de Santa Helena. Eles ocupam a parte mais alta da paisagem onde o relevo apresenta-se de suave ondulado a forte ondulado e sob vegetação subcaducifólia.

Os cambissolos são muito compactos apresentando baixa capacidade de condução da água principalmente em profundidade.

6.5.3 Gleissolos

São solos que se encontram sob a influência do lençol freático, sendo que, ao menos em algum período do ano, apresentam-se saturados com água o que leva à redução do ferro dando origem a colorações neutras.

Ocorrem em áreas de relevo plano, nas margens dos principais cursos d'água, coberta por uma vegetação de floresta de várzea.

6.5.4 Argissolos

A principal característica desses solos é a presença de um horizonte B textural, formado pela movimentação de argila dos horizontes superiores para os inferiores, apresentando-se na região com um horizonte B com textura argilosa a muito argilosa e um horizonte A de textura moderada. É encontrado principalmente em relevo suave ondulado a forte ondulado sob vegetação de floresta subcaducifólia.

6.5.5 Neossolos

São solos rasos e jovens que possuem minerais primários e altos teores de silte mesmo nos horizontes superficiais. Podem apresentar-se cascalhentos. O alto teor de silte e a pouca profundidade faz com que eles tenham baixa permeabilidade. Estão associados às regiões de afloramentos rochosos sob vegetação de mata seca.

6.6 *Uso e Ocupação do Solo*

Conforme destacado anteriormente, a cidade de Sete Lagoas encontra-se em uma área de contato geográfico, que vem crescendo e se industrializando, gerando uma diversidade muito grande de ambientes tanto urbanos quanto rurais.

Os ambientes naturais se mostram altamente particularizados de forma que a cobertura vegetal tem uma relação direta com a geologia e com o tipo de solo formando paisagens muito características, muitas vezes com contatos bruscos entre os diversos ambientes.

O mapa da **Figura 6.12** traz a distribuição espacial dos diversos tipos de uso e cobertura do solo, sejam eles naturais ou antrópicos.

**MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO
BACIA DOS RIBEIRÕES MATADOURO E JEQUITIBÁ**

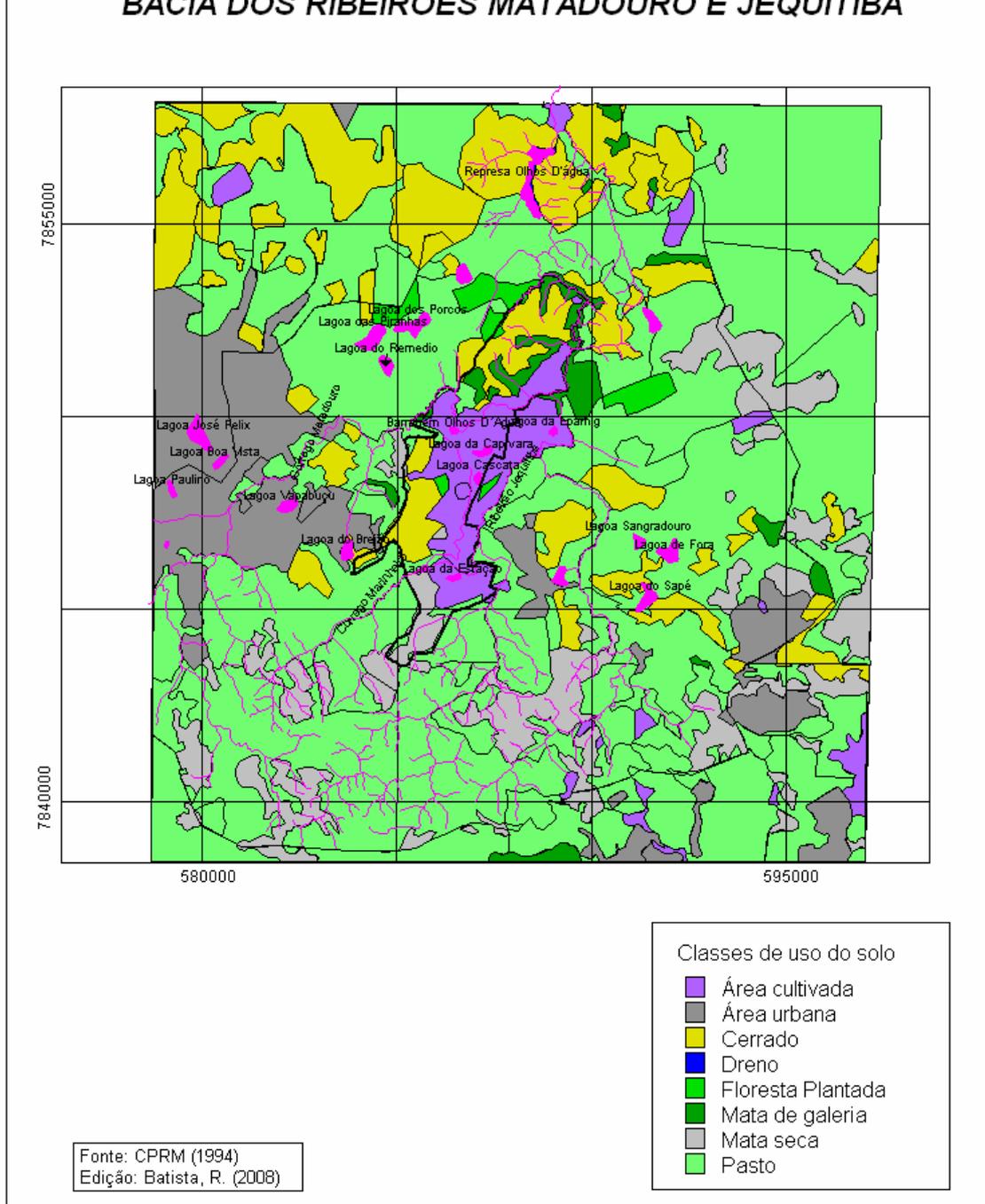


Figura 6-12 - Mapa de uso e ocupação do solo na região de interesse.

Como pode ser observado no mapa da **Figura 6.12**, a classe de uso predominante na região são as pastagens que são divididas em pasto, que ocupa a maior parte deste domínio, e pasto sujo, de ocorrência menos freqüente. A predominância de tal classe ilustra bem a importância da pecuária na região.

A vegetação nativa é representada pelos domínios: cerrado, mata de galeria e mata seca, sendo a mais importante delas o cerrado.

A principal característica do cerrado é uma formação arbustivo-herbácea apresentada na **Figura 6.13**, onde se destaca a ocorrência de arbustos com troncos retorcidos e fendilhados sobre um campo coberto predominantemente por gramíneas. Sua ocorrência é mais comum nas áreas de relevo plano a suave ondulado, sobre latossolos.



Figura 6-13 – Vegetação típica de cerrado, principal vegetação nativa da região.



Figura 6-14 – Vegetação de campo cerrado presente nos topos de morros em áreas de cambissolos.

Dentro da formação de cerrado encontram-se áreas nas quais a vegetação arbustiva se torna bastante espaçada e geralmente com porte atrofiado, com estrato menos denso de gramíneas e plantas campestres (**Figura 6.14**). Essa formação é conhecida como campo cerrado e sua ocorrência está diretamente ligada às condições dos solos, visto que normalmente são encontrados em áreas de domínio dos cambissolos que apresentam grande resistência ao crescimento de raízes e baixa infiltração de água.

As matas de galeria são compostas por vegetação arbórea perenifólia que atinge até 20 m de altura, contendo elementos da Floresta Atlântica. Ocorrem ao longo dos cursos d'água logo, tornam-se em grande parte, áreas de preservação permanente (**Figura 6.15**).



Figura 6-15 – Mata de galeria ocupando a parte mais baixa da área de estudo, ao longo dos cursos d'água.

Nas áreas de afloramentos de calcário forma-se também uma vegetação típica de mata seca sobre os solos rasos. As matas secas são formações florestais caducifólias ou subcaducifólias com deciduidade anual dependente da disponibilidade de água (**Figura 6.16**).

O uso dos solos na zona rural consiste basicamente da agropecuária, sendo a principal atividade agrícola a pecuária.

A região em estudo abrange também parte da área urbana das cidades de Sete Lagoas e de Prudente de Moraes, que estão em expansão, sendo que algumas das divisas do CNPMS já se encontram junto ao perímetro urbano. A cidade de Sete Lagoas possui uma população de aproximadamente 200 mil habitantes e as principais atividades econômicas da cidade são: a agropecuária; o comércio; e, a indústria, principalmente a de cerâmica e a siderúrgica.



Figura 6-16 – Mata seca sobre rochas calcárias no afloramento conhecido como Gruta da Pontinha, localizado no CNPMS.

6.7 Geologia

O CNPMS localiza-se próximo ao contato geológico entre o embasamento gnáissico-migmatítico e as rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí. No entorno do Centro, esse Grupo apresenta como principais componentes as formações Serra de Santa Helena e Sete Lagoas, sendo essa última representada pelos Membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa, segundo a estratigrafia proposta por Dardene (1978). A distribuição de tais formações geológicas pode ser observada no mapa da **Figura 6.17**; já a descrição de cada uma delas será apresentada a seguir.

6.7.1 O embasamento cristalino

Definido por CPRM (2003) como um conjunto ou associação de rochas gnáissicas diversas que se misturam às porções granitóides e às zonas migmatizadas com característica polimetamórfica pertencentes à unidade geotectônica correspondente ao Cráton do São Francisco, o complexo gnáissico-migmatítico constitui a base sobre a qual foram depositados os sedimentos que deram origem ao Grupo Bambuí.

Apresenta-se litologicamente bem diversificado e bastante intemperizado, havendo, dentro da área de estudo, raros afloramentos. O principal deles, mostrado na **Figura 6.18**, é uma antiga pedreira explorada pela prefeitura de Sete Lagoas, localizada na Fazenda das Perobas. O embasamento cristalino também encontra-se exposto na região de contato com os calcários do Grupo Bambuí, formando um vale encaixado por onde são drenadas as águas do Ribeirão Jequitibá, mostrado na **Figura 6.19**.



Figura 6-18 – Vista geral do afloramento do cristalino conhecido como pedreira da prefeitura, localizado na Fazenda das Perobas – Sete Lagoas.



Figura 6-19 – Ribeirão Jequitibá correndo sobre as rochas do embasamento cristalino.

O embasamento cristalino ocupa, portanto, a porção inferior da coluna estratigráfica, aparecendo na camada mais superficial apenas no extremo sul da área de estudo coincidindo com as nascentes dos principais córregos que drenam a área.

Estruturalmente, segundo Silva (2003), o embasamento cristalino pode apresentar-se bastante escalonado e evidenciar sinais de basculamento em blocos vistos na Figura 6.20.

As fraturas presentes neste complexo são mais frequentes junto às zonas migmatizadas, ocorrendo preenchidas por calcita ou mesmo veios quartzo-feldspáticos e pegmatóides (Pessoa, 1996).



Figura 6-20 – Sinais do basculamento em blocos característico do embasamento cristalino observado na pedreira da prefeitura. Fazenda das Perobas – Sete Lagoas.

6.7.2 O Grupo Bambuí

Segundo Branco e Costa (1961) a denominação série Bambuí foi criada por Rimam para um conjunto de rochas calcíferas e ardosianas aflorantes a oeste do Rio São Francisco. Desde então esse grupo de rochas vem sendo estudado por diversos autores (Branco e Costa, 1961; Barbosa, 1965; Dardene (1978)) que o apresentam formado por diversas unidades estratigráficas. Neste trabalho, será adotada a divisão estratigráfica proposta por Dardene (1978), apresentada anteriormente.

6.7.2.1 Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas é descrita por Misi (2001) da seguinte maneira:

“No topo, dolarenitos e dololutitos cinza claros, maciços ou com laminações estramatolíticas, podendo conter camadas centimétricas de calcilito e calcarenito negro intercaladas. Estruturas sedimentares de exposição aérea são muito frequentes nesse intervalo, como teepees e nódulos de calcita e sílica. No restante da seção, ritmitos constituídos por calcilito cinza claro com finas intercalações de material argiloso. Na base, podem estar presentes

dolomitos vermelhos, argilosos, com forma lenticular e depositados em discordância, sobre diamictitos das Sequências Glaciogênicas.”

Como pode ser percebido na descrição acima, a Formação Sete Lagoas apresenta-se constituída por camadas de características distintas, sendo, portanto, dividida por CPRM (2003) em dois membros de acordo com as características sedimentológicas e estratigráficas: um inferior denominado membro Pedro Leopoldo e um superior denominado membro Lagoa Santa, os quais geralmente apresentam contato brusco através de falha de descolamento.

As características regionais da Formação Sete Lagoas, segundo CPRM (2003), sugerem a existência de um mar epicontinental na época de sua deposição, cobrindo extensas áreas continentais extremamente rasas e com declives pequenos, restringindo a circulação da água e provocando sua hipersalinização.

Pessoa (1996) propõe a existência de dois ciclos, ilustrados na **Figura 6.21**, que marcariam o processo de deposição de sedimentos: o ciclo I representa a primeira transgressão marinha, inundando as partes mais baixas do continente e dando origem aos calcários finos e claros do Membro Pedro Leopoldo; o ciclo II representa um ambiente regressivo, concorrendo para sedimentação dos calcários grosseiros e escuros pertencentes ao Membro Lagoa Santa. Posteriormente, uma nova transgressão marinha, cobriria toda a plataforma, com siliciclásticos finos (metassiltitos e metargilitos) que compõem a Formação Serra de Santa Helena.

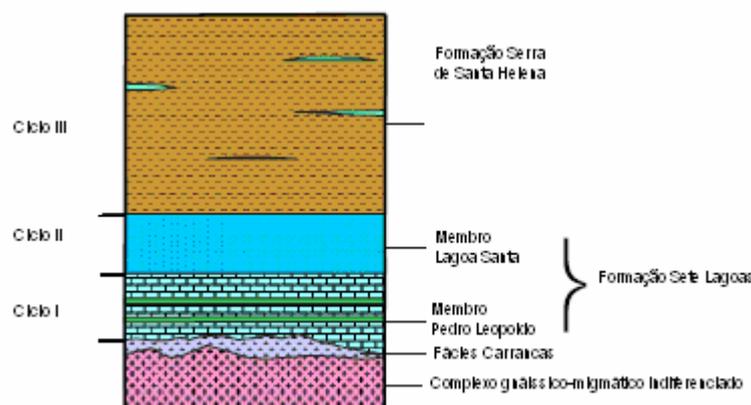


Figura 6-21 – Representação esquemática dos ciclos de sedimentação I, II e III. Fonte: CPRM (2003).

6.7.2.1.1 Membro Pedro Leopoldo

Segundo **Pessoa (1996)** o membro Pedro Leopoldo corresponde a um calcissiltito, caracterizado como calcário cinza muito laminado apresentando-se invariavelmente com impurezas argilosas e deformação incipiente interestratal, constituído por quatro litofácies, caracterizadas de acordo com seu local tipo da seguinte maneira:

- Fácies A (Centro de Sete Lagoas) – Corresponde a um calcário cinza a cinza-claro, em camadas tabulares, delgadas e contínuas, com intercalações delgadas e escuras de metapelitos;
- Fácies B (Sudeste de Sete Lagoas) – Trata-se de um calcário cinza a cinza-escuro com intercalações mais escuras de metapelito e interdigitações de calcários ainda mais escuros, onde se observa deformação branda do tipo interestratal;
- Fácies C (Oeste de Sete Lagoas) – Corresponde a um calcário cinza-claro, esverdeado a marrom e creme com intercalações escuras de metapelito, com a presença de estratificações cruzadas plano-paralelas; e,
- Fácies D (Sul de Sete Lagoas) – Refere-se a uma margam de cor cinza-clara e rósea, finamente laminada, pouco deformada, intercalada por estratos mais finos (argilosos), com pequenas dobras.

Por ser constituído por carbonatos finos e impuros, o Membro Pedro Leopoldo, possui proporção expressiva de material não-carbonático o que os tornaria menos favoráveis à dissolução e à formação de cavernas.

Segundo CPRM (2003), essa unidade está em contato tectônico com o complexo gnáissico migmático, o que é evidenciado pela presença de feições deformacionais nas rochas indicando a existência de um descolamento basal.

6.7.2.1.2 Membro Lagoa Santa

Formado basicamente por calcarenitos, espatitos e calcilutitos, o membro Lagoa Santa é composto por duas litofácies que foram caracterizadas por **Pessoa (1996)** e cuja descrição é apresentada a seguir.

- Fácies A – (Meio oeste de Sete Lagoas) – Refere-se a um calcário cinza-escuro a preto, com grânulos arredondados, em camadas tabulares contínuas e pouco espessas. Exibem característica peculiar de odor fétido, quando partido. São observadas pequenas falhas assimétricas, com vergência para oeste, e veios de calcita.

Fácies B – (Centro oeste de Sete Lagoas) – Caracteriza-se pela presença de calcários estromatolíticos, constituindo biolitos de forma alongada, ligeiramente achatados e estirados ao longo do plano de foliação. Essas litofácies apresentam-se localmente com espessura em torno de 5 metros.

Segundo Silva (2003), os calcários do Membro Lagoa Santa são fortemente predispostos à dissolução por serem homogêneos e grosseiros. Essa solubilidade é evidenciada pela presença, em sua área de ocorrência, de um típico relevo cárstico.

De acordo com CPRM (2003) o Membro Lagoa Santa ocorre sobrepondo o Membro Pedro Leopoldo, geralmente em contato brusco, através de falha de descolamento, onde nas suas proximidades observa-se maior intensidade de veios de calcita/quartzo, concordantes/discordantes. Sobrepondo essa unidade, tem-se os siltitos/argilitos e arenitos da Formação Serra de Santa Helena, geralmente em contato tectônico (falha de descolamento).

6.7.2.2 Formação Serra de Santa Helena

Apresentado por CPRM (2003) como uma formação de litologia monótona onde predominam litótipos de origem siliciclástica e mais raramente sedimentos carbonáticos, sendo os siliciclásticos, predominantemente muito finos, correspondentes a siltitos e argilitos. Os sedimentos carbonáticos são representados por lentes de diferentes dimensões distribuídas esparsamente e correspondentes às margas e calcarenitos muito finos. Segundo CPRM (2003), toda essa seqüência encontra-se cortada por abundantes veios de quartzo-feldspatos, dobrados, quase sempre preenchendo fraturas ou zonas de alívio provenientes de processos distensionais.

Sua sedimentação ocorreu, de acordo com CPRM (2003), em ambiente marinho relativamente profundo, onde as correntes eram fracas, de modo a possibilitar a sedimentação de estratos predominantemente plano-paralelos com raras estratificações cruzadas de pequeno porte e marcas de ondas.

Ocorre na porção norte da área de estudo, sobreposta à formação Sete Lagoas sendo seu contato com os calcissiltitos com intercalações argilosas do Membro Pedro Leopoldo considerado por Pessoa (1996) como dificilmente observável quando intemperizados ou mesmo decompostos.

6.7.3 Coberturas superficiais

A região caracteriza-se por apresentar espessas camadas de solos, recobrando os vales, as dolinas e os topos planálticos. Esse material corresponde, segundo Pessoa (1996), a depósitos colúvio-aluvionares quaternários, onde os detritos mais recentes são representados pelos aluviões dos leitos atuais do Ribeirão Jequitibá.

Mais detalhes a respeito da cobertura superficial já foram expostos anteriormente no item 6.4 deste trabalho que traz a descrição dos solos da região.

6.8 Aspectos de Interesse para a Caracterização Hidrogeológica

Com o objetivo de agrupar as principais informações referentes à hidrogeologia da área do CNPMS foi criado, pela equipe de trabalho do projeto, um mapa síntese apresentando as principais características que definem o fluxo nesse sistema. Tal mapa é apresentado na **Figura 6.22**.

Nele podemos observar duas regiões de características bastante distintas em termos de infiltração da água. Na região central do mapa nota-se uma área de relevo mais suave coincidindo com a presença das rochas da Formação Sete Lagoas – Membro Lagoa Santa que apresentam maior solubilidade. Nessa área a rede de drenagem é mais escassa e há presença de dolinas deixando clara uma extensa área de recarga dos aquífero cárstico devido à alta taxa de infiltração provocada pela presença de canais subterrâneos.

Os extremos norte e sul da área do CNPMS destacam-se pela presença da Formação Serra de Santa Helena, associada a um relevo bastante ondulado indicando piores condições de recarga visto que os solos dessa área são pouco permeáveis e o relevo acidentado facilita o escoamento superficial.

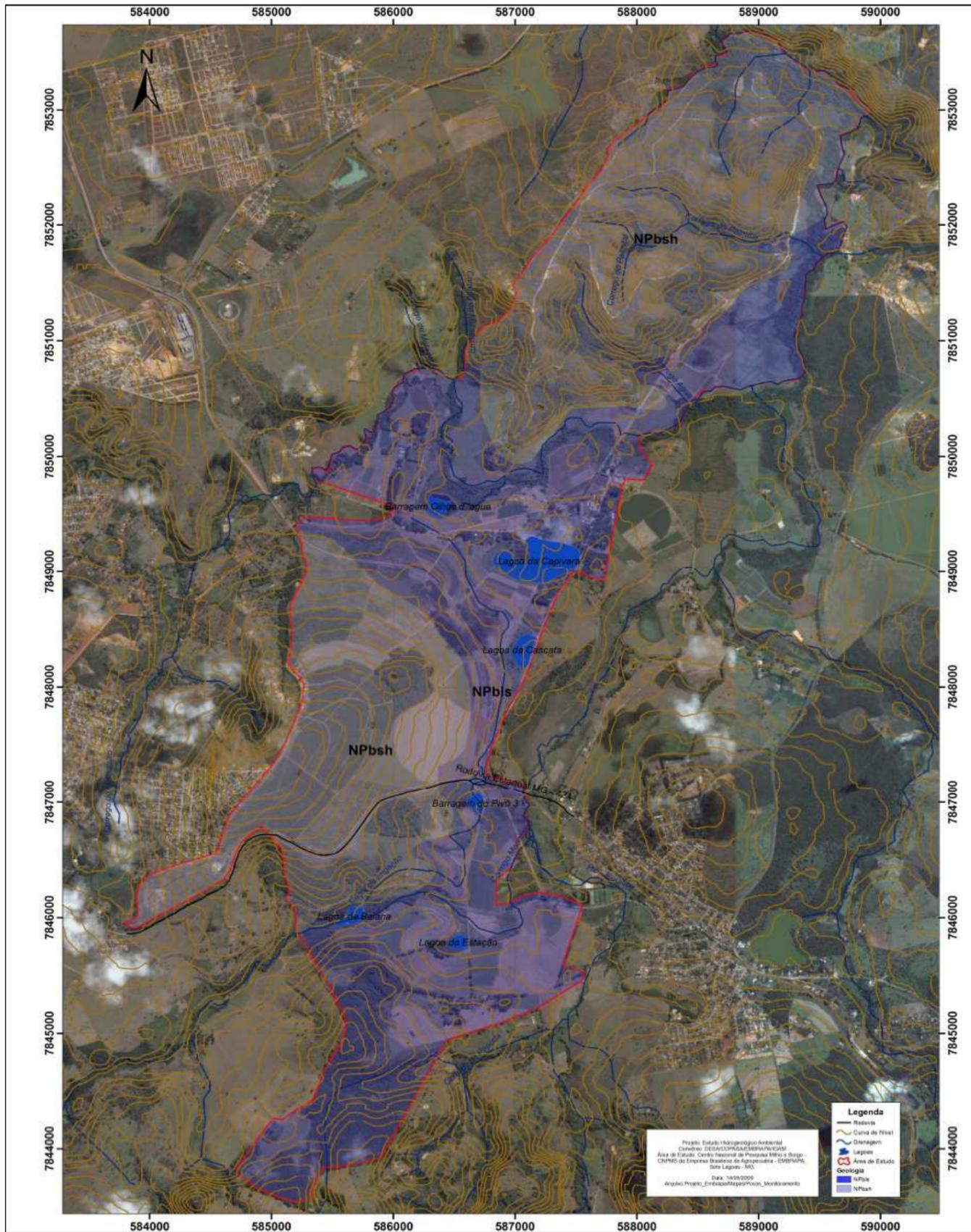


Figura 6-22 – Mapa síntese dos aspectos de interesse hidrogeológico da área do CNPMS.

7 MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA

7.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

Com o objetivo de realizar um estudo preliminar a respeito da área, a definição do modelo hidrogeológico conceitual partiu da avaliação da área de influência do CNPMS que inclui todos os principais tipos de aquíferos presentes no entorno da área, finalizada pela delimitação das bacias dos córregos Jequitibá e Matadouro.

Visto que a área de estudo foi delimitada seguindo os altos topográficos de forma a definir uma bacia, conclui-se que o fluxo da água dentro dessa área será das bordas para o centro e de sul para norte, pois o nível de base da bacia é o Rio das Velhas que se encontra nessa direção.

Baseado na geologia descrita anteriormente, pode-se constatar, na área de estudo, a existência de quatro tipos de aquíferos de acordo com as características de circulação e armazenamento da água, os quais sejam: aquíferos granulares, constituídos pelas coberturas superficiais; aquíferos cársticos, correspondentes aos calcários da Formação Sete Lagoas; aquíferos fraturados-cársticos, associados à presença de intercalações entre as rochas pelíticas e lentes calcárias que ocorrem na Formação Serra de Santa Helena; e, aquíferos fraturados, presentes no domínio do Complexo Gnáissico-Migmático.

Cada uma dessas unidades aquíferas será descrita a seguir, com destaque para o aquífero cárstico que é o mais importante dentre eles em termos de produção, além de ser a principal fonte de abastecimento de água para consumo humano dentro do CNPMS.

7.1.1 O Aquífero Granular

Os aquíferos granulares correspondem à água armazenada nos poros existentes em sedimentos inconsolidados provenientes da alteração das rochas. Nesses sistemas a água apresenta fluxo laminar, em que predominam movimentos descendentes da água pelos espaços intergranulares da rocha alterada e do solo (Pessoa, 1996).

As características hidráulicas desses aquíferos são muito variáveis sendo, que na região, o principal fator de diferenciação é o material de origem do solo. Destacam-se na área dois tipos principais de solos, os latossolos presentes na maior parte da área tendo como material de

origem as rochas pelíticas e suas coberturas associadas, os cambissolos que se encontram associados à presença da rocha pelítica típica da Formação Serra de Santa Helena.

Os latossolos, conforme já descrito anteriormente, são muito argilosos, mas altamente condutivos devido ao arranjo estrutural dessas partículas em forma de micro agregados.

Já os cambissolos são caracterizados por apresentarem duas camadas distintas; uma fina camada de material cascalhento que apresenta algum grau de cimentação, e uma camada de material silto-argiloso bastante compacto com estrutura laminar.

É importante ressaltar que o aquífero granular apresenta conexão hidráulica com as águas superficiais podendo receber água dos rios nos períodos chuvosos e fornecer água para manter o fluxo de base durante a seca.

São considerados por Mourão *et. al.* (2001) como aquíferos pouco produtivos, mas importantes no processo de recarga dos aquíferos subjacentes através da infiltração vertical, além de funcionarem como filtros, condicionando a qualidade da água em subsuperfície, sendo de vital importância no contexto hidrogeológico local.

Pessoa (1996), em seu estudo sobre a hidrogeologia da área, constatou que grande parte das nascentes cadastradas nessa unidade aquífera tem sua origem nas áreas de contato com solos ou rochas menos permeáveis.

Esses aquíferos são explorados na região por meio da escavação de cisternas (**Figura 7.1**) e cacimbas, com profundidade máxima de 20 m. Sua utilização é principalmente para abastecimento doméstico sendo que, no CNPMS, tais águas têm apenas uso laboratorial visto que as águas de origem cárstica do poço que abastece o centro de pesquisa apresentam um alto grau de dureza.



Figura 7-1 - Cisterna localizada em frente ao restaurante, utilizada para abastecer os laboratórios do prédio sede do CNPMS.

Algumas nascentes localizadas na área também são amplamente utilizadas por moradores que não são atendidos pela rede de abastecimento de água do município. A principal dessas nascentes está localizada próxima ao limite do CNPMS e é conhecida com nascente do Marinheiro (**Figura 7.2**).



Figura 7-2 – Nascente do NIA. Aproveitada para uso doméstico pelos moradores da vizinhança do CNPMS.

7.1.2 O Aquífero Cárstico

Os aquíferos cársticos apresentam grande complexidade e, portanto, são alvo de vários estudos em diversas áreas de sua ocorrência em todo o mundo. Neles o armazenamento e a circulação da água se dão principalmente devido à existência de uma porosidade secundária, originada da dissolução da rocha e alargamento das fraturas, podendo chegar a formar condutos pelos quais a água circula sob condições de fluxo turbulento.

Os sistemas cársticos são formados pela dissolução de rochas carbonáticas na presença de águas naturais, ricas em ácido carbônico gerado pela reação entre a água e o gás carbônico presente na atmosfera e no solo. Este ácido carbônico reage com os carbonatos provocando sua solubilização. As reações aqui descritas foram representadas por Karmann (2003) na **Figura 7.3**.

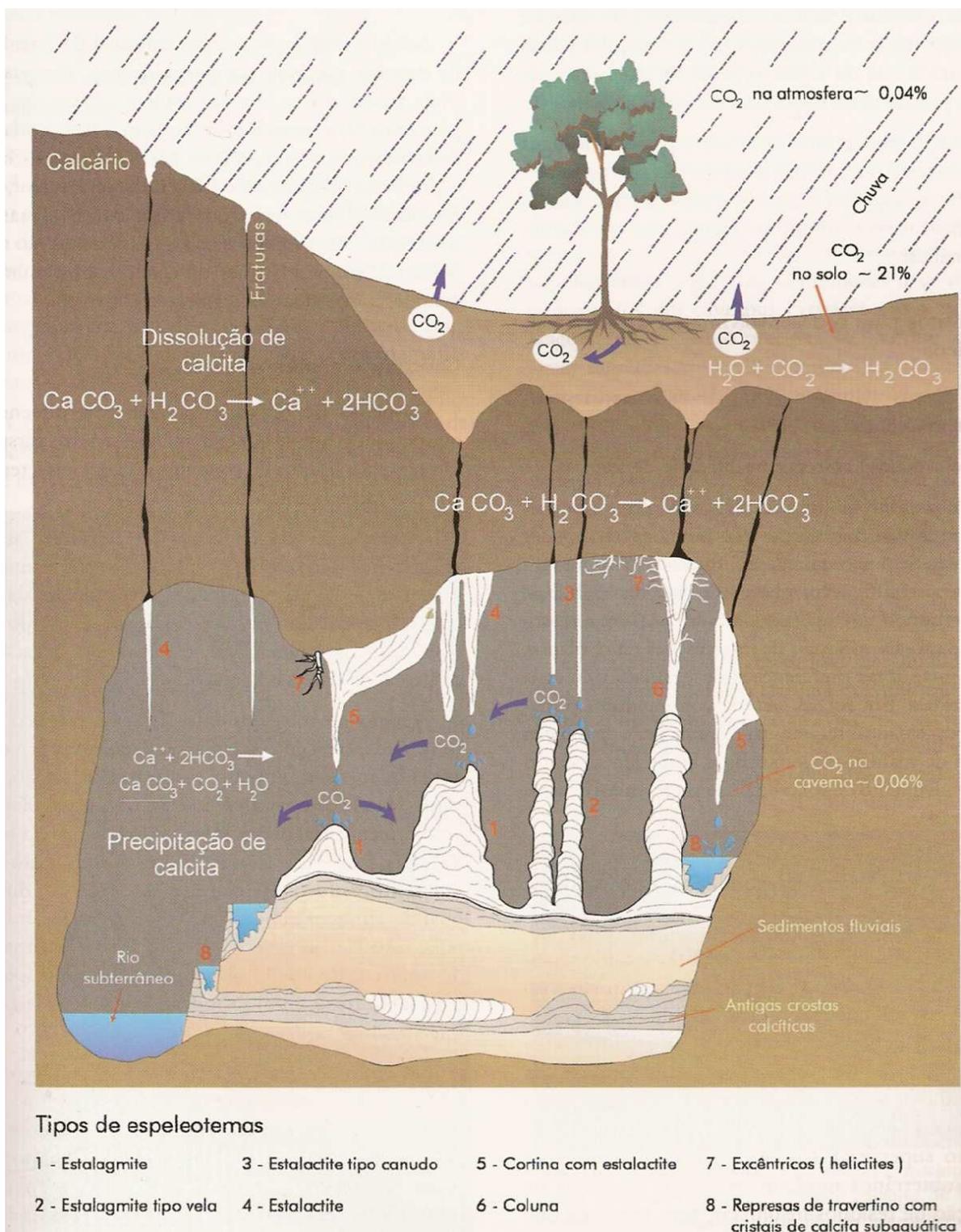


Figura 7-3 – Dissolução da calcita, num perfil cárstico, e os principais tipos de espeleotemas. Fonte: Karmann (2003).

As rochas calcárias mais puras são mais suscetíveis à solubilização, o que faz com que as áreas de presença do Membro Lagoa Santa apresentem um grau de carstificação mais elevado.

A partir da análise da geologia estrutural da área, Pessoa (1996) define que a carstificação ocorre em zonas onde a fraqueza da rocha está materializada por fraturamentos que são alargados por dissolução; ou por falhamentos, cujos processos intempéricos agiram ao longo dos planos, criando zonas favoráveis à circulação da água subterrânea.

A presença de condutos formados pela dissolução da rocha faz com que as regiões cársticas apresentem características especiais do ponto de vista hidrogeológico e geomorfológico. Algumas dessas características, destacadas por Costa e Silva (2000) serão apresentadas a seguir:

- presença de extensas zonas sem correntes de água superficial;
- ocorrência de depressões cuja drenagem é subterrânea;
- existência de cavidades no subsolo pelas quais circulam correntes de água subterrânea;
- pequeno valor de escoamento superficial;
- grande rapidez de infiltração das chuvas e outras águas superficiais;
- grande variação dos valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento;
- complexa circulação de água subterrânea;
- existência de zonas desnudas de vegetação;
- existência de rios subterrâneos (**Figura 7.4**); e,
- existência de surgências e sumidouros (**Figura 7.5 e 7.6**).



Figura 7-4 – Córrego subterrâneo localizado sob o afloramento conhecido como Lapa Preta, próximo ao limite do CNPMS.



Figura 7-5 – Sumidouro localizado na Lapa Preta.



Figura 7-6 – Surgência da Lapa Preta.

A recarga dos aquíferos cársticos se dá, segundo Mourão *et. al.* (2001), em áreas de afloramento das rochas carbonáticas, em locais onde há drenança a partir dos aquíferos granulares sobrepostos e em zonas de absorção cárstica de águas subterrâneas condicionadas pela presença de dolinas e sumidouros.

Na área em estudo, pode-se constatar uma ampla área de recarga localizada na porção central coincidente com o afloramento da Formação Sete Lagoas em um terreno plano, onde a densidade de drenagem torna-se muito baixa e onde alguns córregos perdem carga em pequenos trechos.

A descarga natural desses aquíferos ocorre, segundo Pessoa (1996) quando o volume infiltrado atinge zonas de circulação lenta e mais profunda, na forma de uma recarga efetiva, e/ou escoar ao longo dos condutos endocársticos rumo ao Rio das Velhas, que é o nível de base regional, visto que o embasamento cristalino não funciona como um receptor de água. A descarga também pode ocorrer artificialmente, por meio da exploração da água subterrânea através de poços tubulares.

A exploração das águas cársticas é feita por meio da perfuração e exploração de poços tubulares que, de acordo com os dados obtidos através da análise das fichas cadastrais do SIAGAS, conforme exemplo apresentado no Anexo 1A, apresentam entradas de água em uma profundidade média de 46,2 m, sendo que o nível estático dos poços é de, em média, 23,7 m.

Dentro do CNPMS, existem quatro poços tubulares, sendo dois deles jorrantes. Esses poços têm profundidade em torno de 70 m sendo que os poços não jorrantes apresentam nível estático de aproximadamente 5 m.

Toda a água para consumo humano utilizada no CNPMS tem origem nesses poços tubulares, sendo que suas vazões médias são 312 m³/dia para o par de poços principal (bombeados alternadamente) e de 150 m³/dia para os poços jorrantes.

7.1.3 O Aquífero Fissurado-Cárstico

Os aquíferos fissurados-cársticos, segundo Mourão *et al.* (2001), associam-se à existência de pacotes rochosos em que se verifica a mistura ou alternância de frações argilo-siltosas e

carbonáticas. Esses sistemas apresentam aspectos hidráulicos contrastantes e variando desde aquíferos fissurados a aquíferos cársticos, passando por características intermediárias aos dois.

O fluxo nesses aquíferos está relacionado às fraturas existentes nas rochas ardósianas que, devido à presença de lentes calcárias, podem se alargar pela dissolução da rocha tornando o fluxo mais concentrado.

O processo de infiltração mais eficaz, de acordo com Pessoa (1996), ocorre ao longo das zonas mais intensamente fraturadas em que metassedimentos encontram-se com espessura em torno de 60 m. Nas zonas cobertas por espessos mantos de intemperismo a recarga é lenta e só ocorre através de filtrações verticais descendentes, ou ainda em zonas coincidentes aos cursos d'água em que o talvegue corresponde a traços do tipo “riacho-fenda”.

A descarga do aquífero é feita principalmente por meio de drenança para o aquífero cárstico subjacente sendo que a área de descarga coincide com a sua área de recarga associada ao maior grau de fraturamento, o que também aumenta o processo de carstificação.

A presença desse tipo de aquífero na região é pouco comum visto que existem poucos vestígios da existência das rochas da Formação Serra de Santa Helena que normalmente, já se encontram bastante intemperizadas.

7.1.4 O Aquífero Fissurado

Os aquíferos fissurados, segundo Feitosa e Filho (1997), estão associados à existência de fraturas em rochas que apresentam porosidade praticamente nula. Essas fraturas são formadas por variações nas condições de tensão verificadas durante vários episódios na história geológica dessas rochas.

Na área em questão, esses aquíferos estão associados principalmente à presença do Complexo gnáissico-migmático constituído por granitóides de composição diversificada localizados no extremo sul do domínio de estudo.

O fluxo e o armazenamento da água são restritos, nesses aquíferos, às zonas de fissuras das rochas, havendo, de acordo com Pessoa (1996), duas formas de fluxo: uma mais rasa,

interconectada hidraulicamente ao manto de intemperismo; e outra profunda, em regime de confinamento exercido pelo isolamento de fraturas em maiores profundidades.

Na produção de água, os poços mais rasos apresentam um maior potencial de exploração chegando a atingir vazões de até 14 m³/h em regiões de alinhamento de fraturas.

Segundo Mourão *et. al.* (2001) o encaixamento de trechos de cursos d'água em sistemas de fraturas e a drenança a partir do manto de cobertura colúvio-eluvionar, que pode em determinados locais ser bastante espesso, promovem a recarga do aquífero.

As principais formas de descarga do aquífero são: a infiltração da água para as zonas mais profundas; a transferência de água para os cursos d'água; e, as fontes pontuais e difusas que brotam de fissuras, ou em zonas de contato entre o saprolito e a rocha fresca.

7.2 Modelo Hidrogeológico Computacional

7.2.1 Bases teóricas e apresentação do aplicativo computacional

A modelagem computacional de sistemas naturais é definida por Iritani (1998) como a representação matemática do que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real, tendo como objetivo uma melhor compreensão do sistema atual, possibilitando prever situações futuras, algumas vezes passadas, porém sempre buscando direcionar ações de decisão.

Considerado por Fetter (1994) como um dos principais avanços da hidrogeologia nos últimos 15 anos, os modelos computacionais do fluxo da água subterrânea são utilizados, conforme Scanlon *et. al.* (2003) para testar e refinar diferentes modelos conceituais, estimar parâmetros hidráulicos e, o mais importante, para gerenciar recursos hídricos, prever como o aquífero responderá a variações climáticas e ao bombeamento de poços.

As equações matemáticas que descrevem o fluxo da água subterrânea baseiam-se, segundo Anderson e Woessner (1992), na combinação entre a lei de Darcy e uma equação de balanço de massa da água.

De acordo com a lei de Darcy, a descarga específica da água subterrânea, no meio poroso, é dada pela seguinte expressão:

$$\vec{q} = -\vec{K} \vec{\nabla} L \quad (7.1)$$

Onde:

$\vec{q} = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k}$ = vetor, representado pelos componentes de descarga específica q_x , q_y e q_z , respectivamente nas direções x, y e z;

\vec{K} = tensor representando a condutividade hidráulica do meio poroso; e,

$\vec{\nabla} L$ = gradiente da carga hidráulica, L.

A derivação da equação de escoamento da água subterrânea é feita tradicionalmente em relação a um cubo de material poroso que é grande o suficiente para ser representativo das propriedades do meio poroso e suficientemente pequeno para que as variações na carga hidráulica sejam relativamente pequenas. Esse cubo de material poroso é conhecido como volume elementar representativo (REV), com dimensões $\Delta x \Delta y \Delta z$ (**Figura 7.7**). O fluxo de água que passa através do volume representativo é expresso em termos da taxa de descarga q , onde q é um vetor cuja magnitude pode ser expressa em termos de três respectivos componentes: q_x , q_y , q_z .

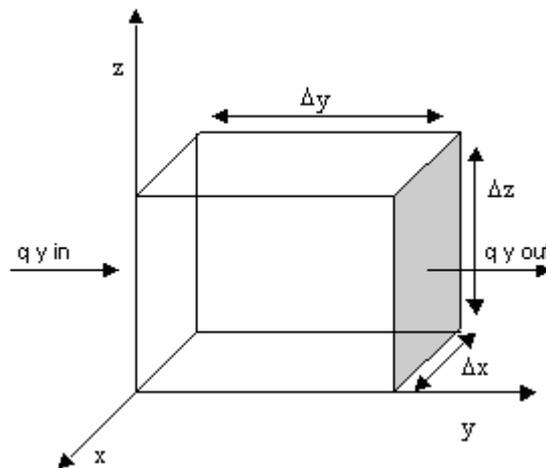


Figura 7-7 – Volume elementar representativo.

A equação do balanço de massa estabelece que:

Entrada de água no REV – saída de água no REV = Variação no armazenamento da água no REV;

Considerando-se o fluxo da água ao longo de cada um dos eixos do REV, em conjunto com a equação de Darcy, obtém-se a forma final da equação do escoamento da água subterrânea, qual seja:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (7.2)$$

Onde:

K_x , K_y e K_z = componentes do tensor condutividade hidráulica;

S_s = armazenamento específico (volume de água liberado para o armazenamento por unidade de carga por unidade de volume do aquífero); e,

R^* = termo de fonte ou sumidouro definido como o volume de entrada de água no sistema por unidade de volume do aquífero por unidade de tempo.

Essa abordagem matemática apresenta uma limitação quando se trata de aquíferos cársticos visto que o escopo matemático trata o fluxo como laminar, obedecendo a Lei de Darcy,

desconsiderando que nesses ambientes o regime hidrodinâmico apresenta-se predominantemente turbulento devido à existência dos condutos formados pela dissolução da rocha.

De acordo com Anderson e Woessner (1992), a modelagem de ambientes cársticos através de sistemas equivalentes em meio poroso não é comumente aceita nos meios científicos quando em escala local, porém é considerada apropriada se utilizada em nível regional.

Esse impasse se deve à alta anisotropia e heterogeneidade dos aquíferos cársticos que os tornam difíceis de representar fielmente, visto que suas propriedades, tais como, geometria dos condutos e condutividade hidráulica, são muito variáveis.

Entre os defensores da utilização da aplicação desse modelo de fluxo para os sistemas cársticos estão Ford e Williams (1989), citados por Silva (2003), que propõem que a rocha pode ser considerada como um meio contínuo formado por espaços vazios e material sólido, cujos parâmetros macroscópicos podem ser definidos.

Comprovando a validade da aplicação dos modelos equivalentes em meios porosos para o meio cárstico, diversos trabalhos, dentre os quais aqueles descritos a seguir, estão sendo publicados utilizando esse sistema e apresentando bons resultados.

Scanlon *et. al.* (2003) discutem a validade da utilização do modelo equivalente em meio poroso por meio de um estudo de caso realizado no aquífero conhecido como Barton Springs Edwards localizado nos Estados Unidos, conseguindo reproduzir as variações de descarga das fontes dentro de uma margem de erro de 10 % nas flutuações das descargas.

Na região deste estudo, trabalhos de caracterização hidrogeológica realizados na área da Mina da Lapa Vermelha, explorada para extração de calcário, localizada na cidade vizinha de Lagoa Santa foram desenvolvidos por Silva (2003) e posteriormente aprimorados por Pessoa (2005) utilizando os modelos hidrogeológicos computacionais baseados na Lei de Darcy como ferramenta para avaliar a influência da mina no comportamento hidrogeoquímico local.

7.2.2 Desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional

7.2.2.1 Definição do domínio de modelagem

Para definir o domínio de modelagem é necessário analisar as condições de contorno observadas dentro da área de estudo para que sejam incluídas no modelo todas as condições hidráulicas que terão influência sobre o fluxo de água dentro do CNPMS. Esses contornos, de acordo com Anderson e Woessner (1992), podem ser físicos, caracterizados pela presença física de rochas impermeáveis ou grandes corpos de água superficial; ou hidráulicos resultantes das condições hidrológicas locais que incluem divisores de águas e linhas de drenagem.

Visto que os cursos d'água existentes na região não apresentam grandes volumes, característica comum em ambientes cársticos, esses não puderam ser elencados na definição do domínio de cálculo ficando todos os limites horizontais do domínio definidos pela condição de fluxo zero associadas aos divisores de água.

A localização dos divisores de água foi realizada, a princípio, pela delimitação das bacias dos córregos Jequitibá e Matadouro, mostrada no mapa da **Figura 7.8**, que foi posteriormente adaptada resultando no domínio de modelagem utilizado neste trabalho apresentado na **Figura 7.9** que apresenta uma área de 239,2 km².

Os limites verticais do domínio de cálculo, mostrados na **Figura 7.10**, foram definidos utilizando como limite de topo a superfície topográfica e o limite de base foi dado pela superfície de contato entre o calcário e o embasamento cristalino que é considerado como uma barreira impermeável.

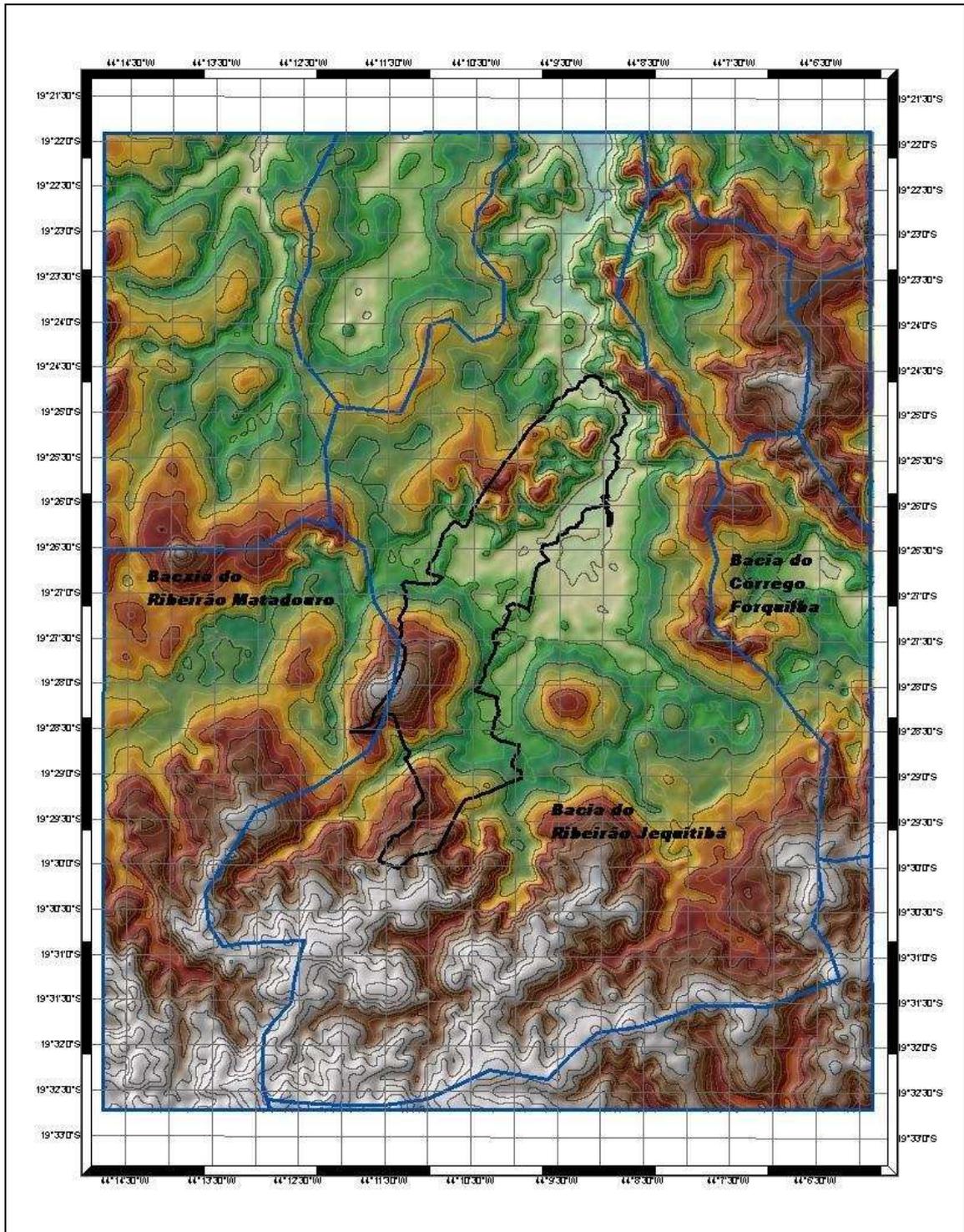


Figura 7-8 – Modelo digital de elevação representando a delimitação das bacias dos ribeirões Jequitibá e Matadouro. Delimitada em preto está a área do CNPMS e em azul as áreas das bacias.

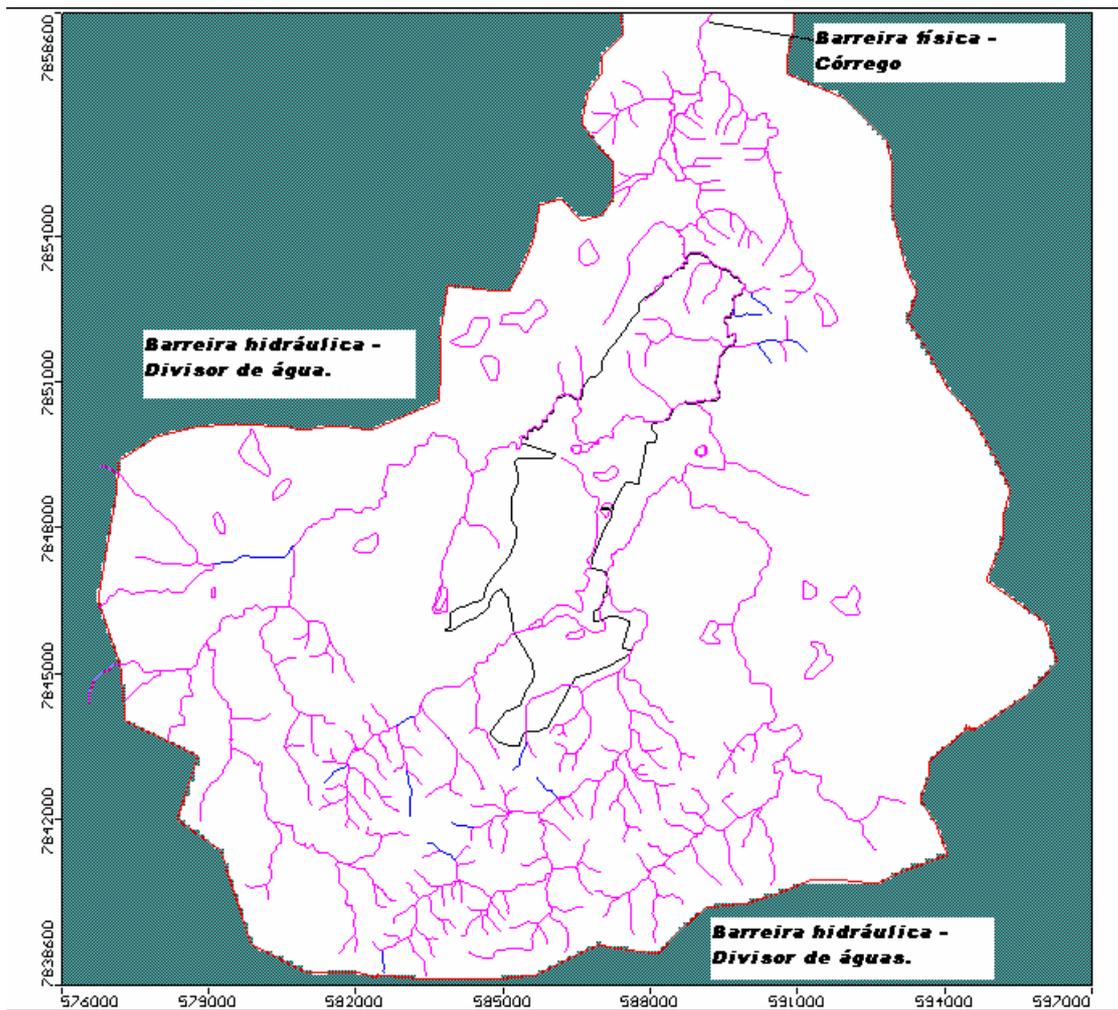


Figura 7-9 – Domínio de cálculo do modelo hidrogeológico computacional no plano horizontal.

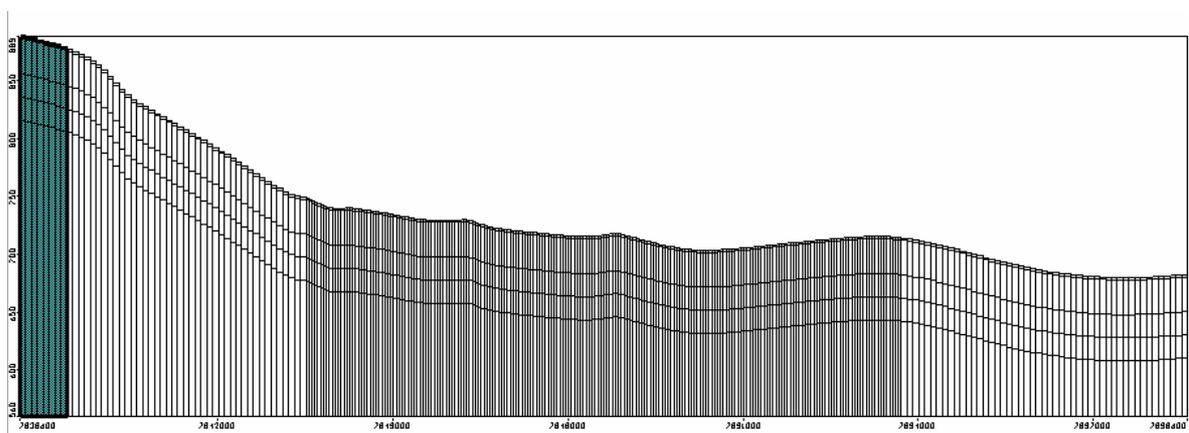


Figura 7-10 – Domínio de cálculo vertical obtido por um corte de sul para norte na região central do mapa da Figura 7.9, com escala ampliada 20 vezes, mostrando a divisão em células verticais de espessuras variadas.

7.2.2.2 Definição da malha de cálculo

O domínio de modelagem está inserido em uma área de 21x20 km que foi estruturada em uma malha de cálculo formada por 200 linhas e 210 colunas resultando em uma grade de células de 100x100 m. Na área do CNPMS esta malha foi refinada passando à dimensão de 50x50 m em todo o centro. A malha de cálculo em questão pode ser visualizada na **Figura 7.11**.

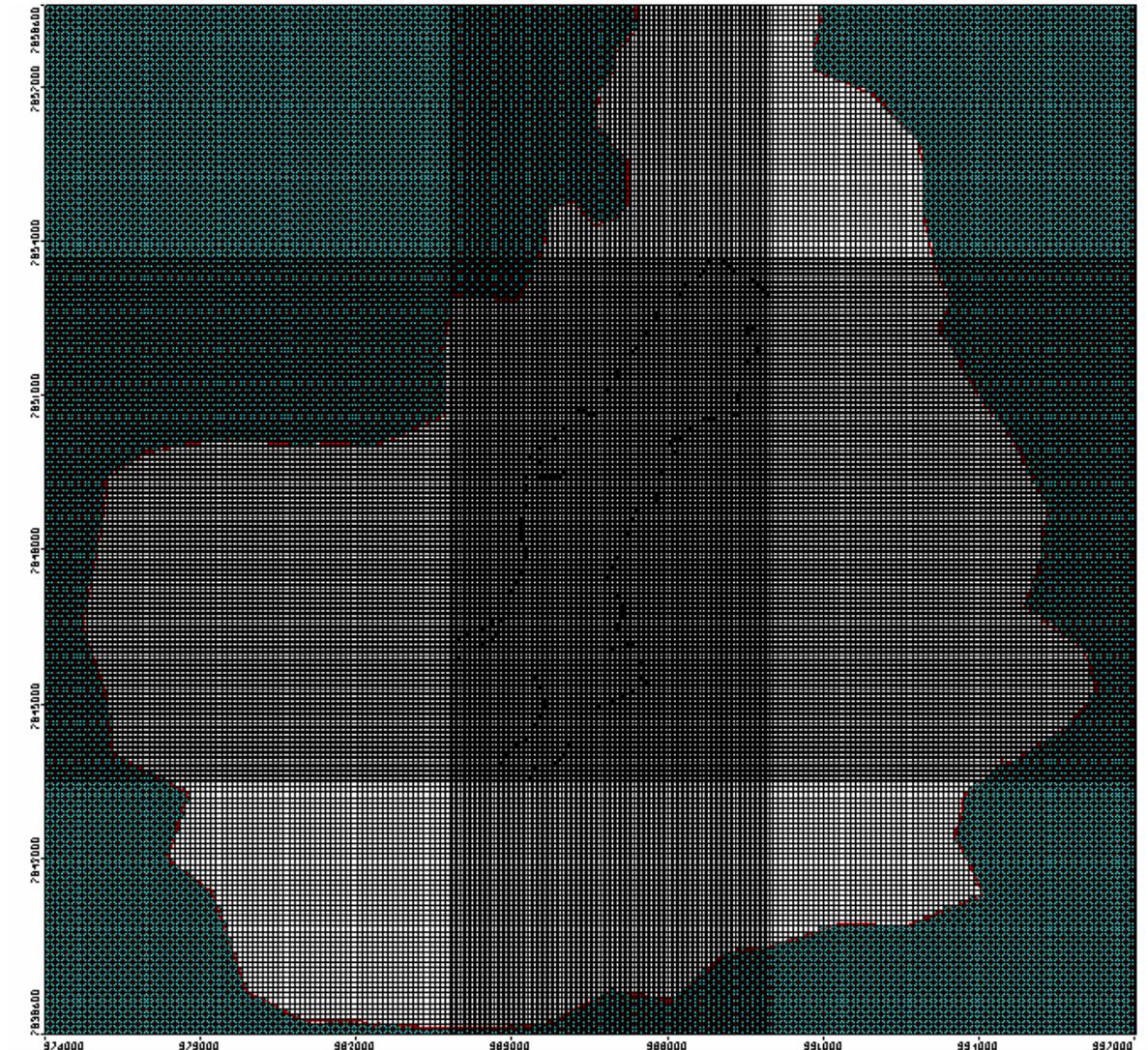


Figura 7-11 – Malha de cálculo adotada no modelo hidrogeológico computacional com destaque para a área do CNPMS, com grade mais refinada.

A profundidade das células é variável de acordo com a unidade hidroestratigráfica nelas representada. Ao todo o modelo apresenta cinco camadas com as espessuras apresentadas na **Tabela 7.1**.

Tabela 7.1 - Camadas definidas no modelo computacional para comportar as diversas unidades hidroestratigráficas.

Camadas	Espessura	Descrição
Camada 1	2 m	Comporta uma fina camada de solo arenoso presente nas regiões de ocorrência da Formação Serra de Santa Helena.
Camada 2	30 m	Compreende os dois principais tipos de solos: cambissolos associados à Formação Serra de Santa Helena e latossolos no restante da área.
Camada 3	20 m	Traz a informação da geologia de superfície representada pelo aquífero cárstico e pelas rochas graníticas e pelíticas fraturadas.
Camada 4	20 m	Corresponde ao calcário fraturado sendo apenas substituído na área do embasamento cristalino onde tem-se a rocha sã.
Camada 5	Variável	Representa as rochas calcárias e graníticas não alteradas.

Apesar de se saber que a espessura dessas camadas na realidade é bastante variável, neste trabalho elas foram definidas como constantes, seguindo o traçado da topografia visto que os dados obtidos até o presente momento não são suficientes para desenhar tais camadas e suas variações de profundidade em toda a área.

A espessura aqui adotada para essas camadas foi determinada a partir dos perfis de poços fornecidos pelo banco de dados SIAGAS (ver modelo no Anexo 1) apresentados de forma resumida no histograma da **Figura 7.12**.

Nesse gráfico nota-se a predominância da ocorrência do calcário entre 20 e quarenta metros de profundidade, sendo a média calculada em torno de trinta metros. O cristalino apresenta duas faixas predominantes de profundidade, sendo que a faixa entre 20 e 40 m corresponde à região de seu afloramento enquanto a faixa de 60 a 80 m corresponde à sua presença sob as rochas do Grupo Bambuí que apresenta espessura variando entre 30 e 60 m.

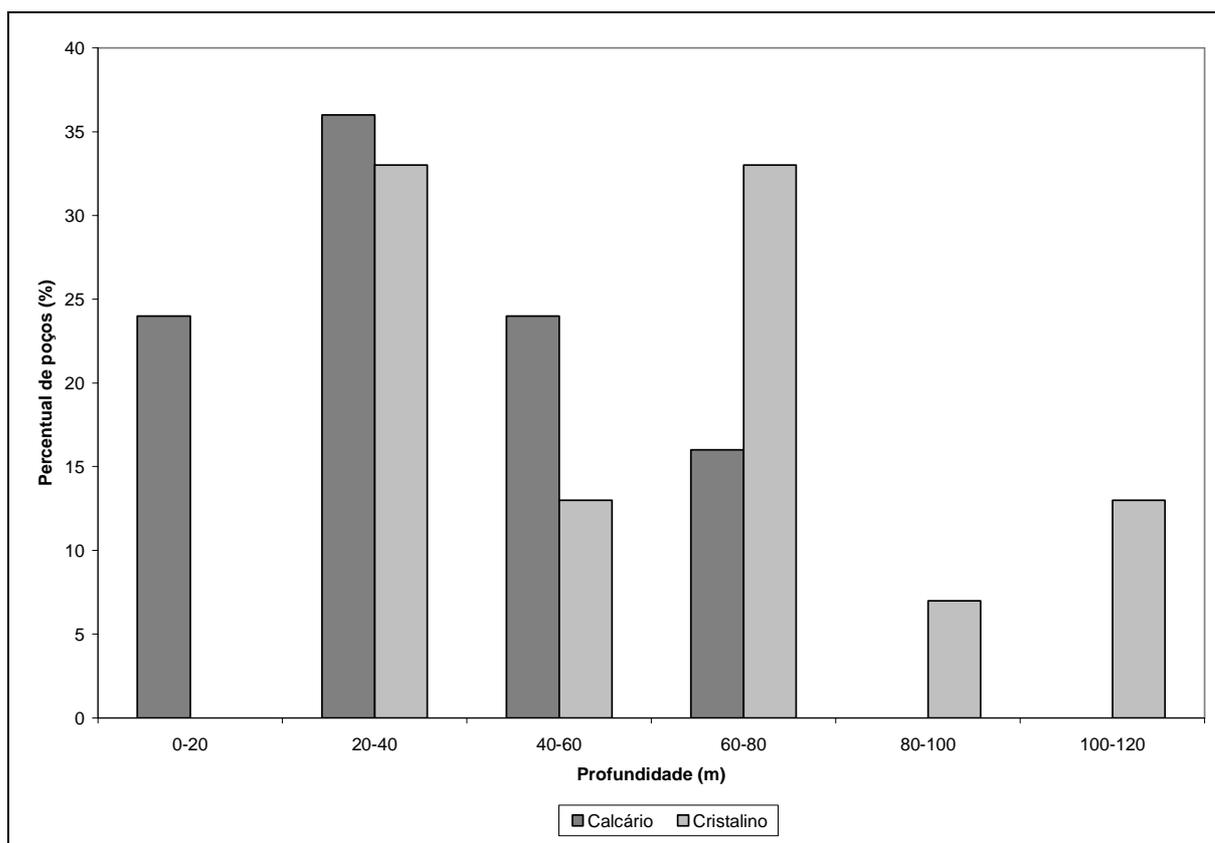


Figura 7-12 – Histograma de distribuição da profundidade de ocorrência dos calcários do Grupo Bambuí e do embasamento cristalino. Fonte: SIAGAS – CPRM.

7.2.2.3 Consideração temporal

O modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido em uma condição temporal estacionária adotando-se, portanto, um regime de fluxo permanente no qual a carga hidráulica varia no espaço, mas permanece constante no tempo. Tendo em vista essa consideração os dados climatológicos e hidrológicos aqui utilizados representam os valores médios anuais, ou seja, assume-se que as variações ao longo de um período hidrológico são razoavelmente pequenas.

7.2.2.4 Definição das condições de contorno

Conforme citado anteriormente, na definição do domínio de modelagem foram observadas algumas condições de contorno que permitiram definir uma área que não sofre a influência do seu entorno visto que os limites foram colocados nos divisores de águas definindo uma bacia hidrográfica. As células da malha de cálculo localizadas fora dessa região consideradas como inativas.

Definidas as condições de contorno presentes nos limites do domínio de cálculo partiu-se para a definição de condições de contorno internas do mesmo.

A primeira condição de contorno a ser considerada foi a carga hidráulica ao longo do Ribeirão Jequitibá e de seus principais afluentes. Devido ao fato de ser uma bacia de pequena área considera-se as condições climáticas como invariáveis, o que permite admitir que todos os córregos sejam hidrologicamente de caráter efluente, ou seja, eles funcionam apenas como um elemento que retira água do sistema subterrâneo, para tal foram simulados utilizando a ferramenta dreno do Visual MODFLOW.

As perdas de carga entre o sistema subterrâneo e a drenagem superficial, representadas pela grandeza condutância, foram consideradas constantes ao longo de todos os trechos do eixo de drenagem. A essa condutância foi atribuído o valor de 10.000 m²/dia tornando insignificante a influência do leito do rio nas variações da carga.

As lagoas localizadas em toda a área de modelagem, com exceção da Lagoa da Capivara, também foram simuladas como drenos com o mesmo valor de condutância dos córregos. Algumas lagoas artificiais utilizadas para acúmulo de água para irrigação não foram utilizadas no modelo, pois têm o fundo impermeabilizado por lonas ou por camadas de argila.

A inserção de todos os drenos citados acima no modelo computacional foi realizada utilizando como valor de carga hidráulica os dados de cota do terreno onde estavam localizados.

Durante a inserção desses drenos no modelo computacional, foram detectadas pequenas divergências entre o mapa topográfico e o mapa hidrográfico que, após uma avaliação a partir de sobreposição de mapas e de imagens de satélite, levou à conclusão de que tais erros estavam relacionados ao mapa topográfico. Para corrigir tais divergências foram realizadas adaptações ao mapa topográfico inserindo dados de cotas do terreno conhecidas nos eixos de drenagem. Tal adaptação permitiu uma melhor simulação das drenagens, porém limitou a utilização de alguns dados da topografia suavizando as variações do relevo.

A Lagoa da Capivara apresentou, em análises preliminares de qualidade da água, um padrão químico diferente das demais lagoas, tais como: pH < 7 e concentrações baixas de cálcio e magnésio. Essas peculiaridades levaram a crer que essas águas não sofrem influência dos aquíferos inferiores, tendo pequena zona de circulação subterrânea. Tal consideração pode ser

reforçada por ser essa uma lagoa natural onde há diversos anos são depositados sedimentos que impermeabilizaram o fundo, provocando um isolamento hidráulico sendo a lagoa alimentada apenas pela água da chuva e do lençol freático em suas porções mais rasas.

Para simular tal condição, a lagoa foi considerada como um corpo de água de carga constante e imediatamente abaixo da lagoa adotou-se uma camada de material de baixa condutividade hidráulica ($k = 10^{-6}$ cm/s).

A recarga do sistema foi considerada como proveniente, exclusivamente, da infiltração da precipitação pluvial sendo seu valor inicialmente adotado de 250 mm/ano, baseado nos cálculos do balanço hídrico, valor esse adaptado durante o processo de calibração, a ser descrito posteriormente, obtendo uma recarga de 345 mm/ano equivalente a 25 % da precipitação anual.

7.2.2.5 Parâmetros hidráulicos

O modelo aqui proposto não sofre variações no armazenamento de água no meio visto que a simulação considera o regime de fluxo como estacionário. Tal condição faz com que a variação na distribuição espacial da carga hidráulica seja dependente apenas de dois fatores, são eles: a recarga e a condutividade hidráulica do meio.

A recarga, conforme já discutido anteriormente foi definida a partir do balanço hídrico enquanto a condutividade hidráulica foi estimada a partir de dados da literatura, utilizando principalmente os trabalhos de Pessoa (1996) e de Silva (2003).

Foram consideradas nove unidades hidroestratigráficas, sendo três delas relativas aos solos da região, uma referente aos saprolitos originários das rochas da Formação Serra de Santa Helena, três unidades correspondentes aos calcários da Formação Sete Lagoas e duas unidades ilustrando as rochas do embasamento cristalino.

Os solos foram divididos nos três tipos principais de acordo com as variações na condutividade hidráulica. A maior parte da região corresponde a solos de alta condutividade hidráulica devido à grande porosidade que apresentam. Na região da Formação Serra de Santa Helena foi alocada, na superfície, uma fina camada de material cascalhento de condutividade hidráulica alta a média e sob ele uma espessa camada de solo silto-argiloso de condutividade hidráulica muito baixa.

A Formação Sete Lagoas foi dividida nas seguintes porções: uma porção superior correspondente a uma região carstificada com elevada condutividade hidráulica e onde se localiza a maior parte das entradas de água dos poços, uma porção média representada por uma camada de calcário fraturado e; uma porção inferior correspondente ao calcário são com baixa condutividade hidráulica.

A Formação Serra de Santa Helena foi considerada como uma unidade hidroestratigráfica a parte apesar de não ser encontrada, dentro da área de estudo, nenhuma evidência da presença da rocha sã. Portanto, à essa unidade hidroestratigráfica foram atribuídos os mesmos valores de condutividade hidráulica utilizados para representar os solos profundos de origem dessa Formação.

O embasamento cristalino foi diferenciado por uma porção superior referente à presença de fraturas nas rochas e por uma porção inferior relativa à rocha sã que é considerada como limite inferior do domínio de modelagem por ser praticamente impermeável.

Com base nos dados de teste de bombeamentos utilizados por Pessoa (1996) e por Silva (2003) definiu-se os valores iniciais de condutividade hidráulica a serem adotados, conforme pode ser observado na **Tabela 7.2**. A partir desses valores, fez-se uma série de testes de calibração até obter aqueles que apresentaram a melhor relação entre os valores de carga hidráulica calculada e medida.

Tabela 7.2 – Valores de condutividade hidráulica (K) utilizados como referência neste trabalho.

Unidades Hidroestratigráficas	K - Condutividade Hidráulica (cm/s)		
	Pessoa (1996)	Silva (2003)	Valor de referência
Cristalino são	—	10^{-7}	10^{-7}
Cristalino fraturado	$3,0 \times 10^{-5} - 8,0 \times 10^{-4}$	—	10^{-4}
Formação Serra de Santa Helena	$3,0 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-5}$	10^{-5}
Formação Sete Lagoas - rocha sã	—	$2,5 \times 10^{-4}$	10^{-4}
Formação Sete Lagoas - fraturas	$1,4 \times 10^{-2} - 1,9 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-3}$	10^{-3}
Formação Sete Lagoas - carste	—	$2,0 \times 10^{-1}$	10^{-2}
Solos origem rocha pelítica	$< 10^{-4}$	—	10^{-4}
Solos em geral	$10^{-2} - 10^{-1}$	—	10^{-2}

A distribuição espacial da condutividade hidráulica é apresentada na **Figura 7.13** sendo os valores das condutividades hidráulicas adotadas após a calibração para cada uma das unidades hidroestratigráficas apresentados na **Tabela 7.3**.

Tabela 7.3 - Valores de condutividade hidráulica (K) adotados para cada uma das unidades hidroestratigráficas após a calibração do modelo computacional.

Unidade Hidroestratigráfica	Legenda	Valores adotados (cm/s)
Cristalino são		$2,0 \times 10^{-7}$
Cristalino fraturado		$3,0 \times 10^{-4}$
Formação Serra de Santa Helena	 	$8,0 \times 10^{-5}$
Formação Sete Lagoas - rocha sã		$2,0 \times 10^{-4}$
Formação Sete Lagoas - fraturas		$9,0 \times 10^{-4}$
Formação Sete Lagoas - carste		$1,8 \times 10^{-2}$
Material cascalhento - origem form. Serra de Santa Helena		$8,0 \times 10^{-3}$
Solos de origem variada		$1,1 \times 10^{-2}$

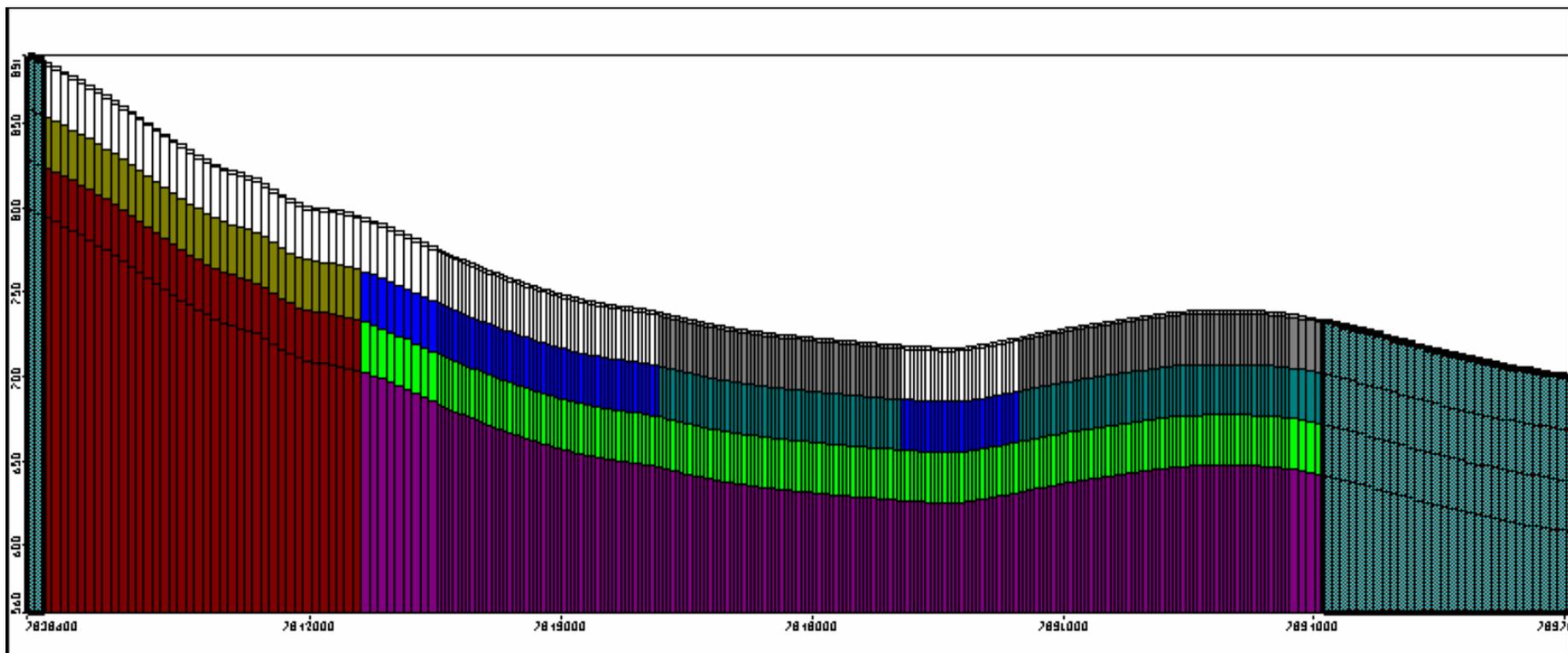


Figura 7-13 Representação em corte vertical, de sul para norte no centro da área de interesse, das unidades hidroestratigráficas existentes na região de interesse. Dimensão vertical ampliada em 20 vezes.

7.2.2.6 Poços tubulares de bombeamento

Como já foi exposto anteriormente, a principal fonte de água para abastecimento em toda a região é a exploração por meio de poços tubulares. Portanto, para compor o cenário do modelo, foram acomodados no modelo 18 poços tubulares, obtidos através de dados de outorga do uso da água fornecidos pelo Instituto de Gestão das Águas de Minas (IGAM). Neste trabalho foram considerados apenas os poços com vazão acima de 100 m³/dia, cuja relação pode ser observada na **Tabela 7.4**. O mapa de localização dos poços é apresentado na **Figura 7.14**.

Tabela 7.4 - Poços tubulares com suas respectivas vazões médias.

Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão [m ³ /dia]
P1	587.890	7.855.776	240
P2	588.210	7.855.162	120
P3	582.783	7.849.527	228
P4	581.346	7.847.817	960
P5	580.963	7.847.679	634
P6	579.569	7.848.256	264
P7	580.054	7.847.654	2400
P8	580.120	7.847.423	840
P9	579.973	7.847.331	960
P10	579.944	7.847.239	600
P11	580.119	7.847.300	1200
P12	579.758	7.847.160	1188
P13	580.205	7.847.115	960
P14	580.118	7.847.146	720
P15	587.300	7.849.795	311
P16	587.050	7.849.680	311
P17	586.342	7.849.779	120
P18	586.529	7.845.730	160

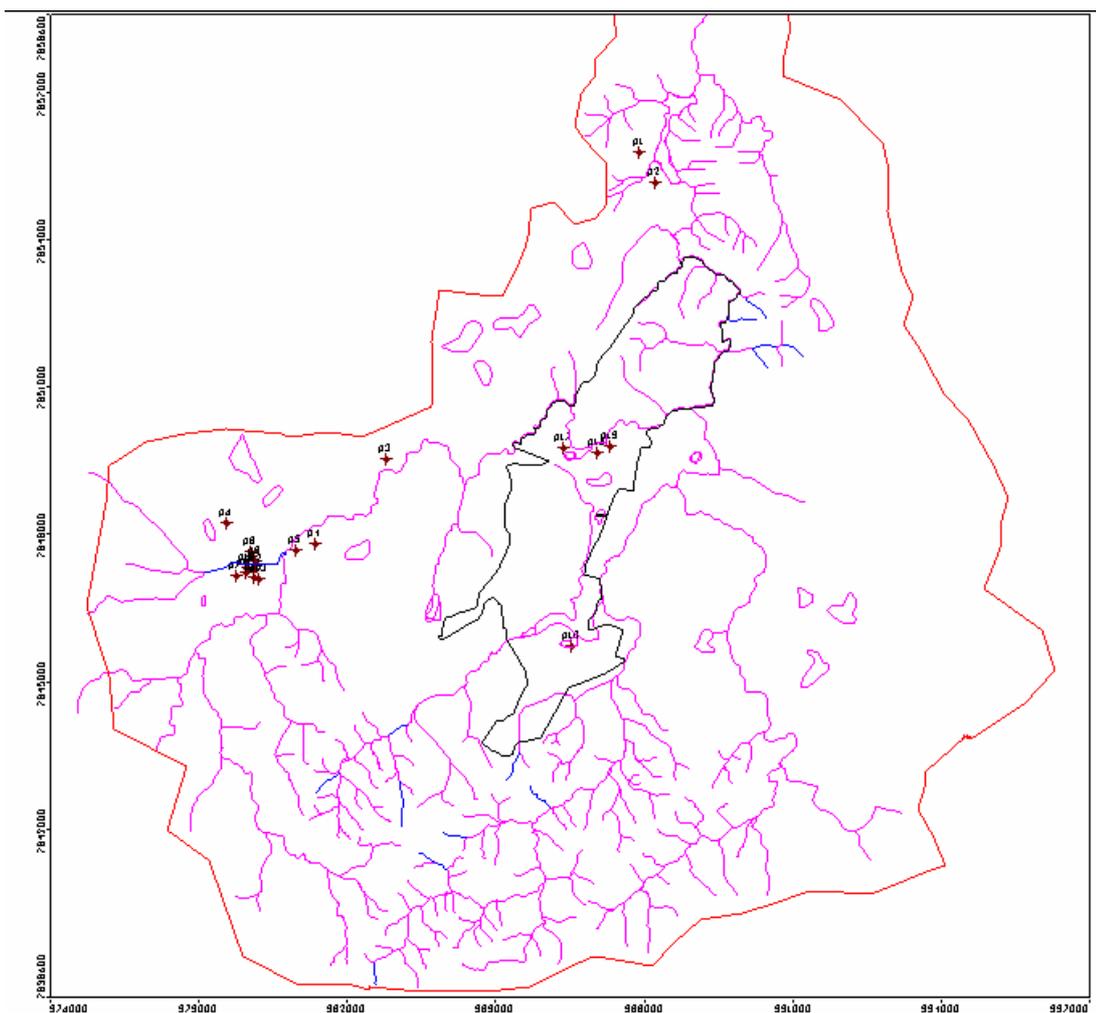


Figura 7-14 – Localização dos poços tubulares utilizados na construção do modelo hidrogeológico.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na simulação computacional foram confrontados com os dados de campo e a com as previsões propostas pelo modelo hidrogeológico conceitual de forma a validar o modelo computacional, interpretar os dados obtidos e propor adaptações que contribuirão para refinar esse modelo computacional. Além disso, foi realizada uma análise ambiental dos principais recursos hídricos de forma a auxiliar o gerenciamento desses recursos pelo CNPMS. Tais resultados são apresentados nas seções a seguir.

8.1 Calibração do Modelo Hidrogeológico Computacional

A calibração de um modelo hidrogeológico computacional tem como objetivo validar a simulação realizada por meio da comparação dos resultados obtidos com dados medidos no campo.

Tal calibração se baseia nas medidas da carga hidráulica em pontos de monitoramento tais como: poços, cisternas e corpos d'água e na medida da vazão em córregos. Neste trabalho foram utilizados 17 pontos de monitoramento da carga hidráulica, sendo, 4 poços, 6 cisternas e 7 nascentes. Os pontos utilizados no monitoramento da carga hidráulica encontram-se listados na **Tabela 8.1**

Tabela 8.1 - Pontos de monitoramento da carga hidráulica.

Identificação	Descrição	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota (m)
pc1	Par de poços principal	587.300	7.849.795	702,79
pc2	Par de poços atrás dos campos experimentais	587.050	7.849.680	705,36
pc3	Poço da Associação de funcionários	586,342	7.849.779	711,57
pc4	Poço da subida da estação meteorológica	586,529	7.845.730	731,39
cis1	Cisterna em frente ao restaurante	587,311	7.849.482	705,32
cis2	Cisterna da sede dos campos experimentais	587,368	7.849.663	702,97
cis3	Cisterna da Fazenda do Marinheiro	584,511	7.845.068	734,53
cis4	Cisterna da vila da Epamig	587.840	7.847.985	707,77
cis5	Cisterna do estábulo da Epamig próximo à lagoa	587.750	7.848.711	711,92
cis6	Cisterna do estábulo da Epamig - divisa com CNPMS	589,097	7.849.774	696,71
nas1	Nascente do Córrego da Papuda	585,196	7.843.049	786,65
nas2	Nascente do sítio barreiro (olho d'água)	585.451	7.843.592	775,87
nas3	Nascente próxima à lagoa do Brejão	583.866	7.846.145	742,94
nas4	Nascente em frente ao NIA	584.994	7.846.468	737,03
nas5	Nascente próxima ao poço da subida da estação	586.429	7.845.675	731,39
nas6	Nascente da matinha próxima à lagoa da Baiana	585.773	7.846.262	736,41
nas7	Nascente da usina de álcool	586.245	7.846.775	726,65

A maioria dos pontos de monitoramento descritos na **Tabela 8.1** está localizada dentro da área do CNPMS como pode ser observado na **Figura 8.1**.

Durante o processo de calibração as condutividades hidráulicas foram variadas de modo a obter a melhor correlação possível entre os valores de carga hidráulica medida e os valores da carga hidráulica calculada pelo modelo computacional. Os valores que forneceram a melhor calibração já foram apresentados anteriormente na **Tabela 7.3**.

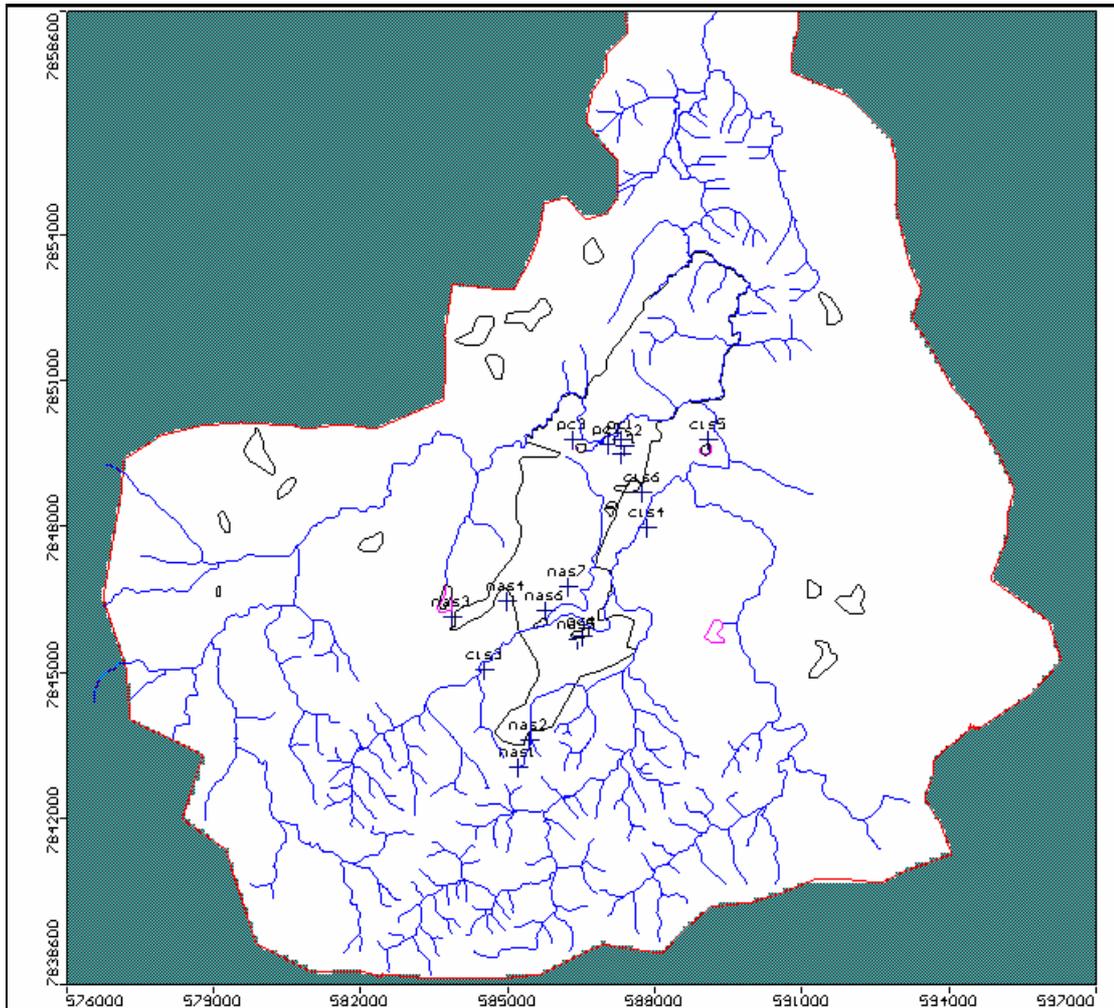


Figura 8-1 - Distribuição dos pontos de monitoramento do nível da água.

Segundo Bonganha *et al.* (2007) o desvio padrão é um dos critérios de calibração mais utilizados, sendo denominado nos programas pela sigla RMS (root mean squared) que pode ser complementado por outro critério relativo à diferença de carga hidráulica total no domínio do modelo, denominado porcentagem de resíduo e que apresenta valores aceitáveis de até 10 %.

Utilizando-se tal critério obteve-se neste trabalho o valor da porcentagem de resíduo de 9,287 % conforme pode ser observado na **Figura 8.2**. Esse erro pode ser diminuído caso sejam realizadas medidas dos parâmetros hidráulicos dos diversos aquíferos através de testes de

bombeamento nos poços e da medida da permeabilidade dos solos visto que neste trabalho foram utilizados apenas dados da literatura.

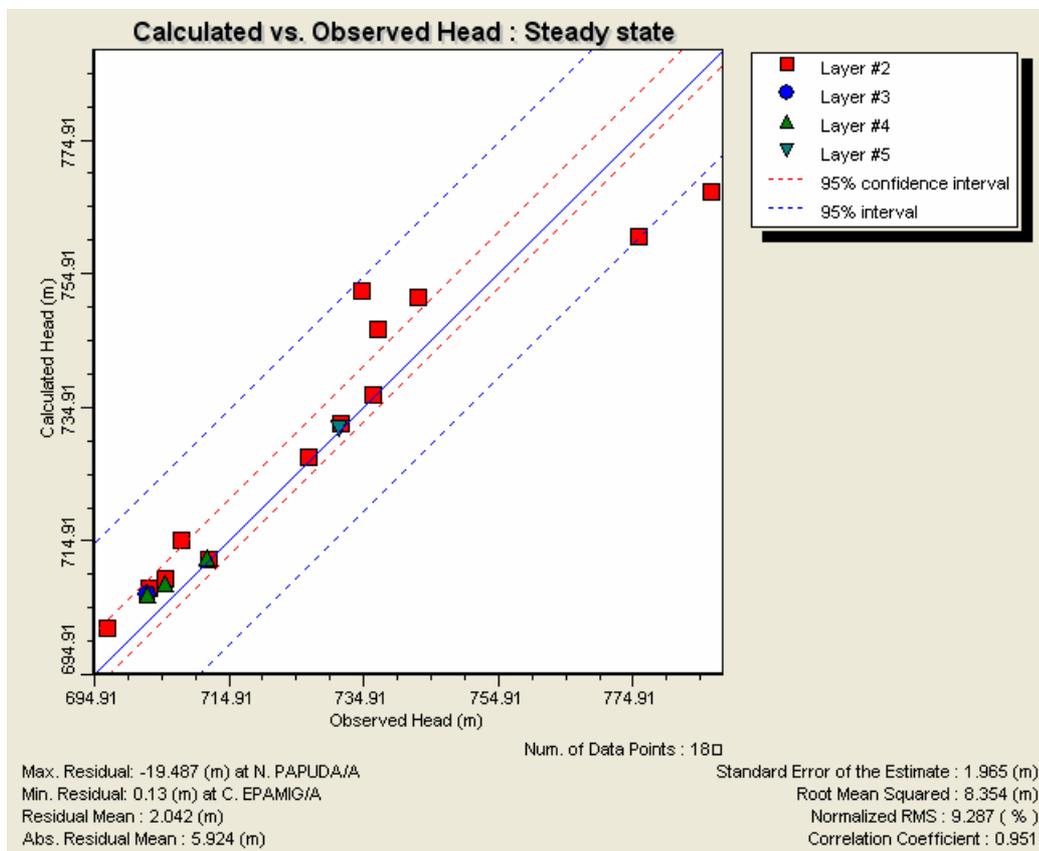


Figura 8-2 – Curva de calibração do modelo hidrogeológico computacional apresentando o valor de porcentagem de resíduo.

Para a calibração dos valores de recarga foi realizada a verificação dos dados de vazão dos cursos d'água. Para tal foram utilizados os dados das estações fluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas (ANA) já citadas anteriormente no cálculo do escoamento subterrâneo. Os dados de vazão média obtidos são apresentados na **Tabela 8.2**. Esses dados são referentes às zonas de cálculo definidas na **Figura 8.3**.

Tabela 8.2 - Estações fluviométricas com dados de vazão média diária.

Identificação	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Vazão média (m ³ /dia)
Estação Curtume	582.227	7.849.166	56,160
Estação Represa Montante	589.262	7.856.510	158,976
Estação Represa Jusante	589.271	7.858.355	264,384

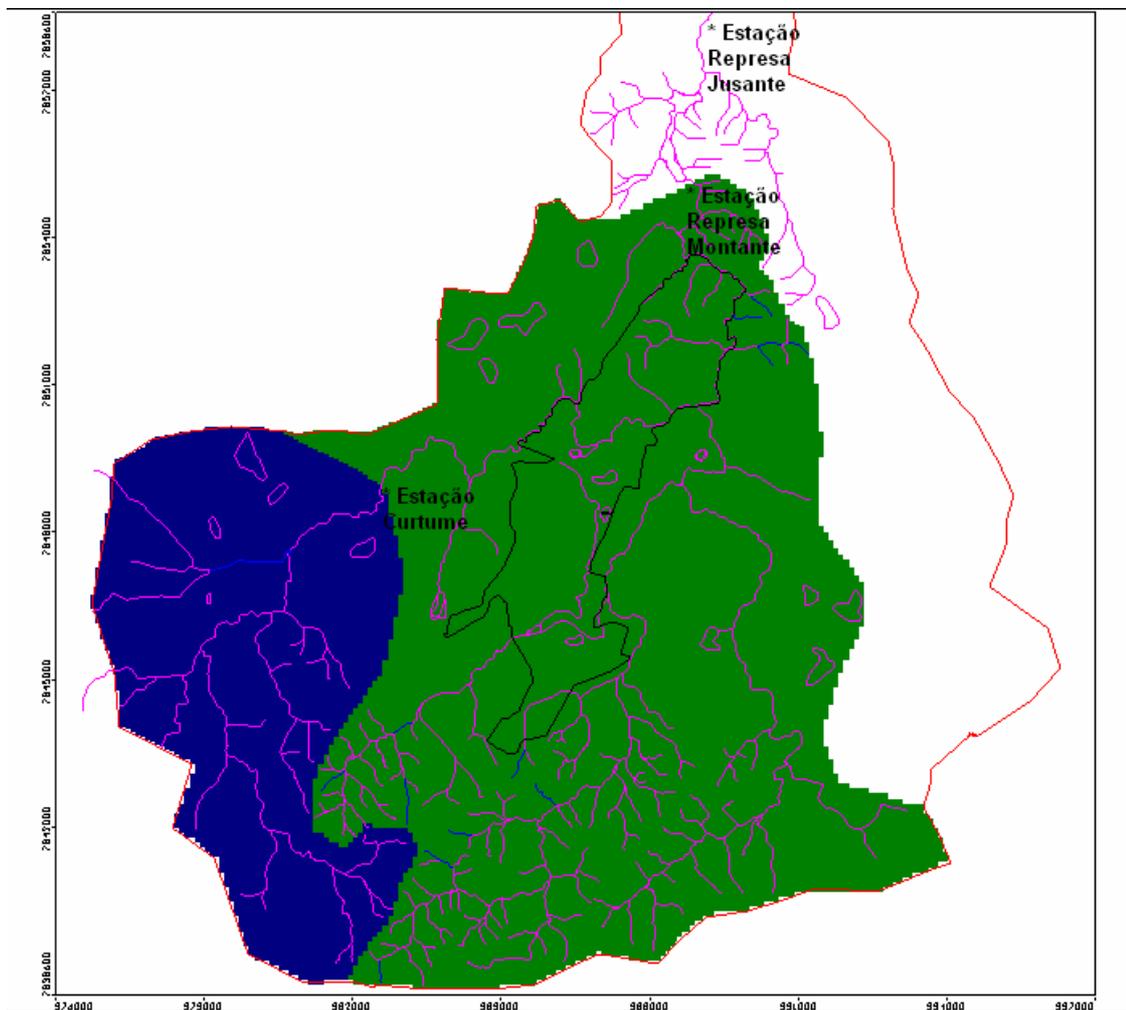


Figura 8-3 – Zonas de cálculo de vazão utilizadas na calibração do valor da recarga, cada cor corresponde a uma estação fluviométrica: violeta – Curtume; verde – represa; branco – represa jusante.

Comparando esses dados com os valores obtidos nos pontos de localização dessas estações fluviométricas através do modelo computacional obteve-se o melhor valor para recarga de 345 mm/ano no modelo computacional. Tais dados serviram de base para a calibração dos valores de recarga do aquífero. Os resultados da análise dos dados de calibração são apresentados na **Tabela 8.3**.

Tabela 8.3 - Dados de calibração dos valores de recarga a partir da comparação entre os valores de vazão medida nos córregos e a vazão calculada pelo modelo.

Identificação	Vazão medida (m ³ /dia)	Vazão calculada (m ³ /dia)	Variação (%)
Estação Curtume	56.160	54.824	-2,4
Estação Represa Montante	158.976	210.170	+32,2
Estação Represa Jusante	264.384	212.840	-19,5

Apesar da grande variação esses valores são aceitáveis devido às limitações do modelo computacional provenientes da falta de dados mais precisos sobre a geologia e das próprias incertezas inerentes às simulações do fluxo da água em ambientes cársticos.

A grande diferença da variação entre a vazão medida e a calculada nas diversas estações fluviométricas provavelmente se deve à distribuição geológica na área de influência de cada uma das estações o que poderá ser melhor avaliado a partir da instalação de novas estações fluviométricas nas regiões de contato geológico.

Um maior conhecimento a respeito da distribuição geológica através da perfuração e perfilagem de poços permitirá a produção de modelos computacionais mais precisos.

8.2 Interpretação do Modelo Hidrogeológico Computacional

Além dos dados se apresentarem compatíveis com medidas de campo, a observação das áreas secas e úmidas apresentadas na simulação computacional se mostrou coerente com a realidade observada, ou seja, as regiões onde há presença de córregos e lagoas apresentaram-se como áreas úmidas.

A presença de algumas áreas alagadas não coincidentes com a realidade observada em campo, pode ter sido provocada pelas adaptações realizadas no mapa topográfico que tornaram o relevo mais suave dificultando a diferenciação de áreas mais altas na região central do domínio de modelagem o que deixa clara a necessidade de uma revisão do mapa topográfico para que tal modelo seja aprimorado.

As linhas de fluxo apresentaram uma tendência da água a se movimentar das bordas para o centro da área de modelagem o que já era previsto, pois os limites do modelo definem uma bacia que tem como base para o escoamento o Rio das Velhas, o que explica a direção de sul para norte do fluxo (ver **Figura 8.4**).

As reservas hídricas renováveis calculadas atingem valores em torno de $8,2 \times 10^7$ m³/ano bastante superior ao total explorado que, de acordo com dados de outorga de uso de água subterrânea do Instituto de Gestão da Águas de Minas Gerais (IGAM), apresenta-se em torno de $6,3 \times 10^6$ m³/ano. Essa exploração corresponde a 7,7 % das reservas renováveis o que dá uma boa margem de segurança em relação à disponibilidade explorável dos aquíferos que segundo Rebouças *et al.* (1994) deve ser de no máximo 25 %.

Esse fato pode ser constatado também pela observação das superfícies potenciométricas observadas na **Figura 8.5** e na **Figura 8.6** que, praticamente não variam na presença de poços ativos existentes na região. Vale ressaltar aqui que, infelizmente os dados de outorga não nos permitem ter resultados mais conclusivos visto que ainda se encontram muitos poços clandestinos na região.

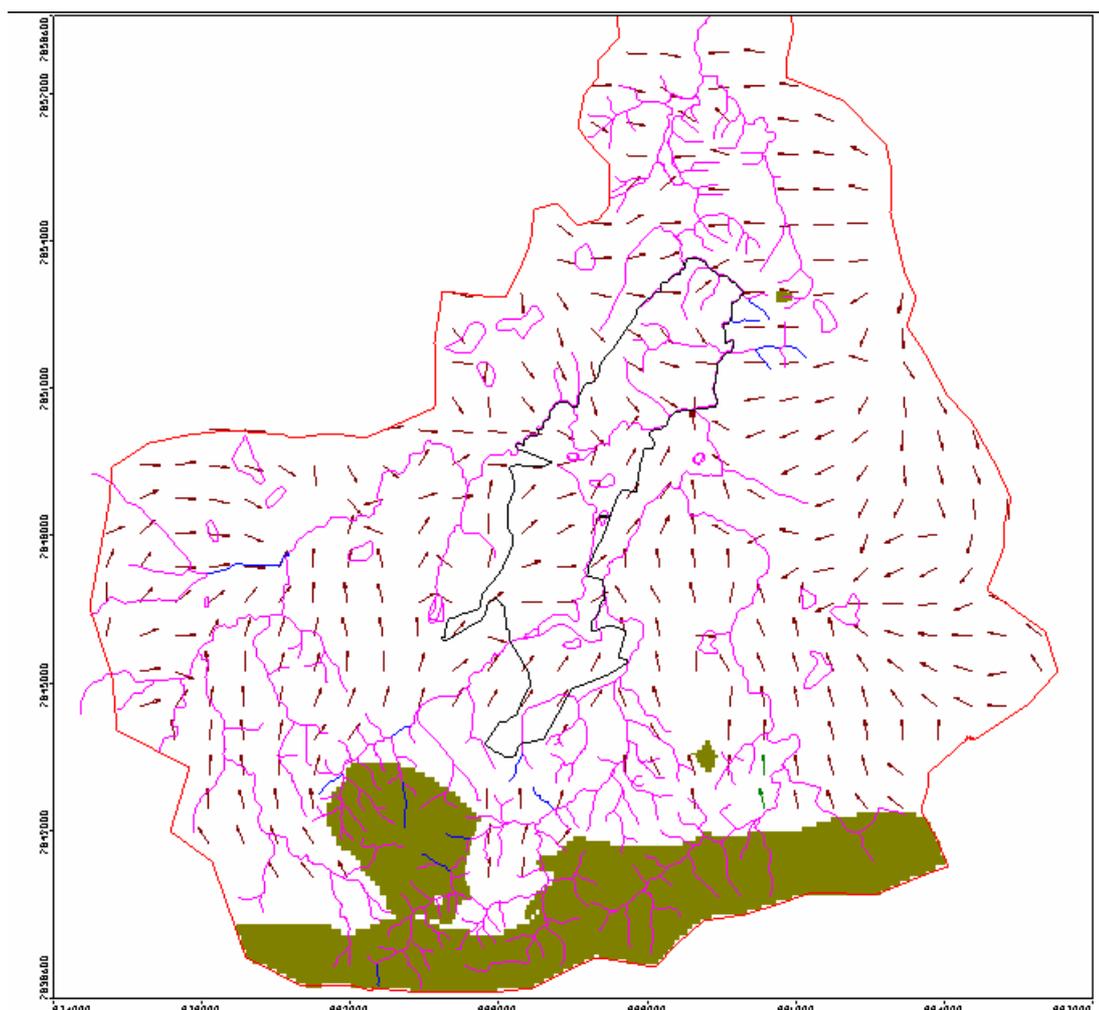


Figura 8-4 – Indicação das linhas de escoamento (fluxo) das águas subterrâneas.

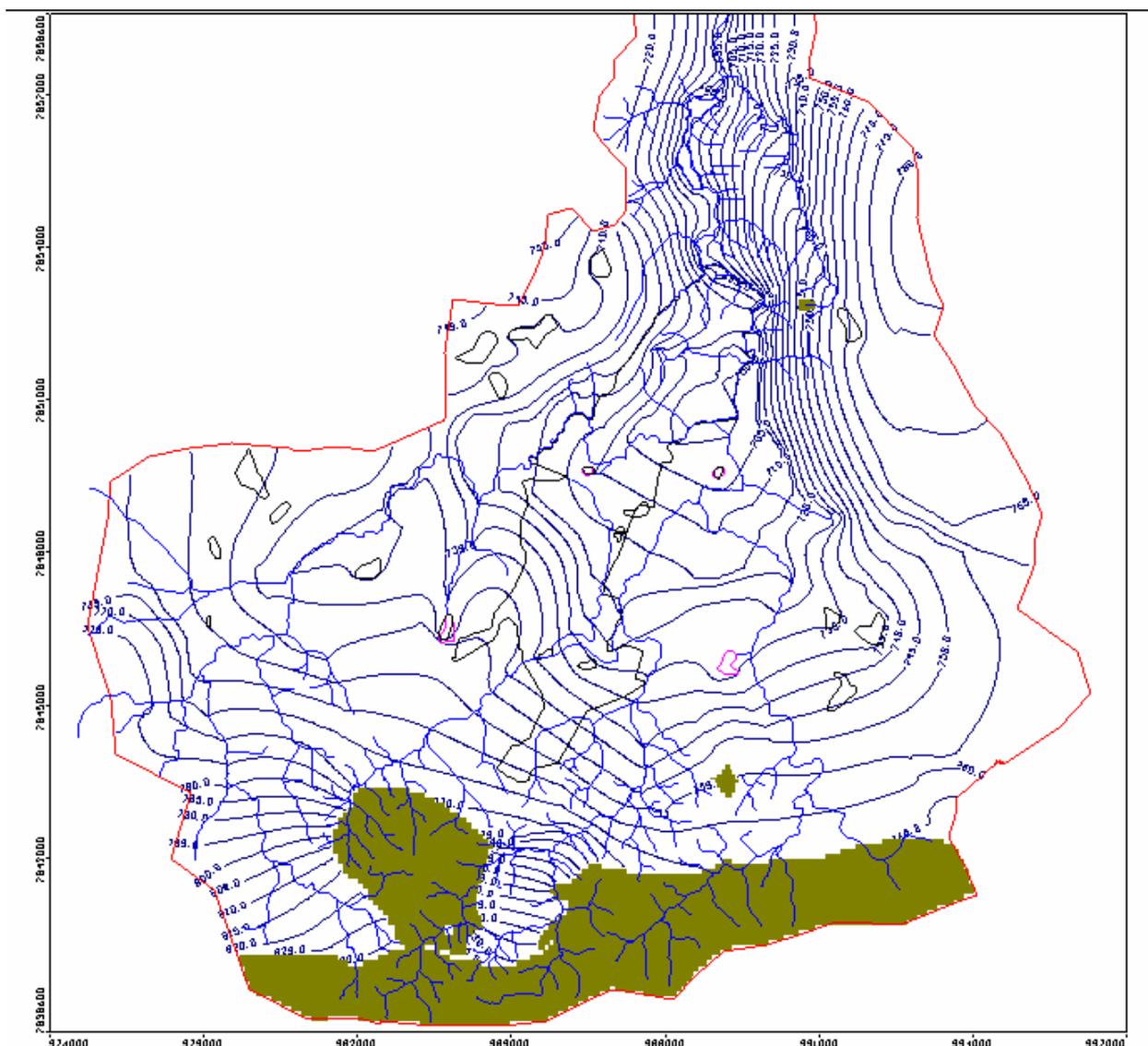


Figura 8-5 – Superfície potenciométrica considerando uma condição sem bombeamento de água nos poços locais.

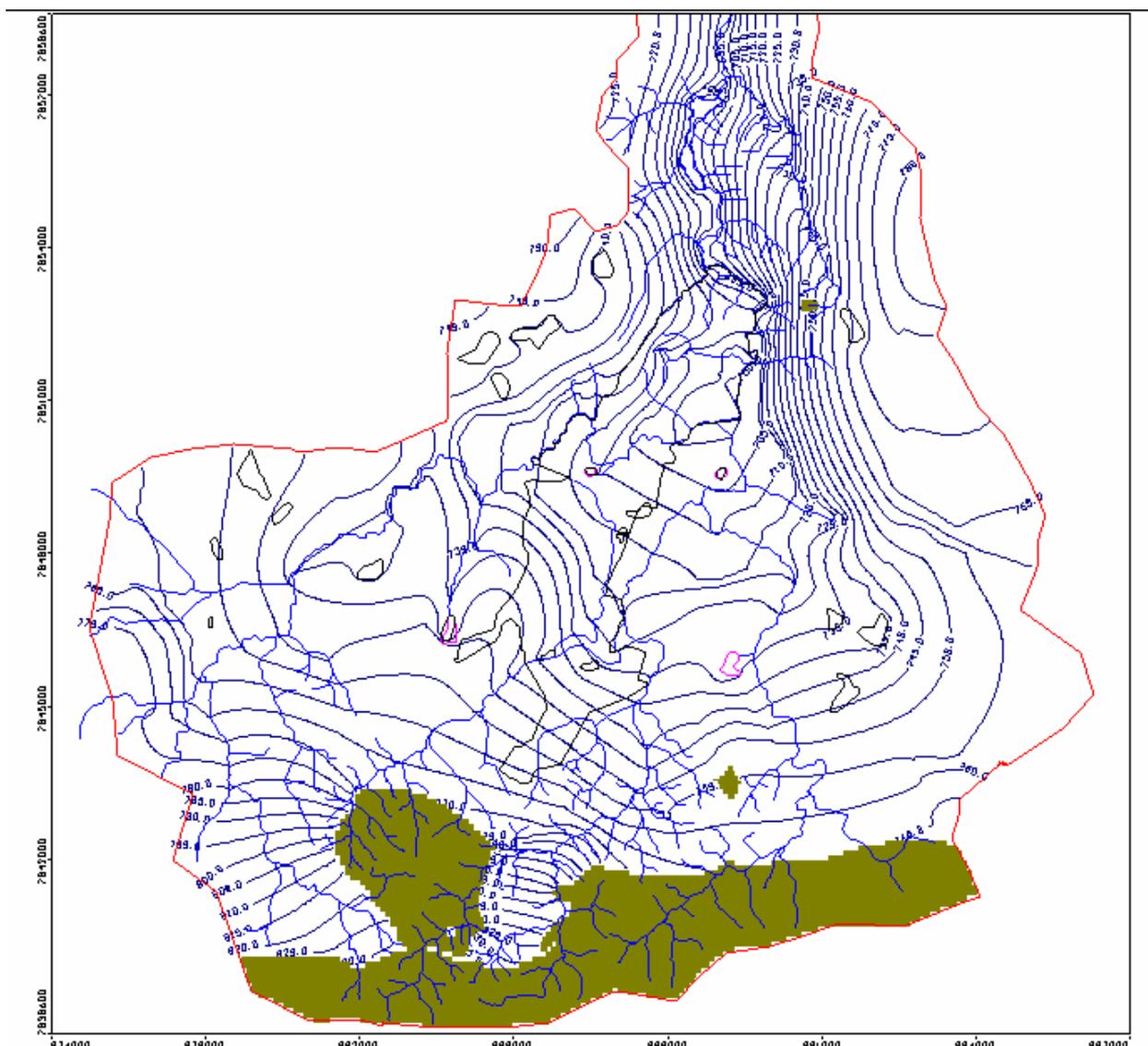


Figura 8-6 – Superfície potenciométrica considerando o bombeamento de água nos poços locais com as suas respectivas vazões de operação atual.

Apesar de não haver grandes variações na superfície potenciométrica constatou-se uma alteração na vazão dos córregos devido à exploração da água subterrânea o que comprova uma relação direta entre água superficial e água subterrânea. Cabe aqui ressaltar, portanto, que uma exploração inadequada da água subterrânea poderá afetar o regime dos cursos d'água que já são bastante escassos na região. A **Tabela 8.4** ilustra essas alterações.

Tabela 8.4 - Dados da vazão nas estações fluviométricas e sua variação devido à exploração da água subterrânea.

Identificação	Vazão sem poços (m ³ /dia)	Vazão com poços (m ³ /dia)	Varição (%)
Curtume	65,769	54.845	-17,0
Represa Montante	206.540	205.330	-0,6
Represa Jusante	210.220	210.710	+0,2

A maior variação apresentada na estação do Curtume deve-se ao fato de que esta se localiza em uma área de maior incidência de poços com taxas de bombeamento maiores além de ser uma área de cálculo menor deixando as alterações mais evidentes.

A contribuição de cada um dos principais cursos d'água presentes na região também foi simulada a partir da definição de zonas de cálculo cujos dados são apresentados na **Tabela 8.5**. Essas vazões apresentam similaridade com a realidade observada no campo porém, para melhorar a qualidade da calibração do modelo deveriam ser instaladas estações fluviométricas próximas à confluência entre esses córregos e o Ribeirão Jequitibá.

Tabela 8.5 - Vazões referentes aos principais córregos existentes na área de estudo.

Córrego	Jequitibá	Matadouro	Forquilha	Marinheiro
Vazão (m ³ /dia)	164.354	28.577	13.753	3.536

8.3 Avaliação Ambiental dos Recursos Hídricos na Área do CNPMS

Após essa caracterização geral da área fez-se uma série de simulações com o objetivo de propor uma análise, de caráter ambiental dos poços, nascentes, cisternas, córregos e lagoas que será apresentada a seguir.

A proposta dessa avaliação ambiental é identificar a capacidade máxima de produção dos poços instalados no CNPMS além de verificar as melhores localizações para futuros poços, identificar as zonas de captura dos poços e cisternas e as áreas de influência das lagoas e nascentes com o objetivo de orientar na organização de trabalhos a serem realizados e estratégias de manutenção qualitativa e quantitativa desses recursos hídricos.

A capacidade de produção foi avaliada apenas nos poços visto que o bombeamento nas cisternas é praticamente insignificante.

A identificação das zonas de captura e das áreas de influência foi realizada por meio do aplicativo MODPATH, parte integrante do software Visual Modflow, que simula o movimento de partículas de água dentro do sistema modelado. Neste trabalho calculou-se a trajetória da partícula reversa em partículas colocadas ao redor dos poços e cisternas nas camadas onde se encontram as entradas de água e nas lagoas e nascentes, instaladas nas camadas superficiais correspondentes às coberturas inconsolidadas. Para cada um dos casos foram utilizados períodos de 5, 10 e 25 anos.

Com tal ferramenta faz-se a definição da trajetória da partícula de interesse, localizando sua origem e assim determinando a área de influência do corpo d'água onde ela foi alocada.

As simulações para diferentes períodos de tempo são úteis principalmente em áreas agrícolas, pois o tempo de persistência dos diferentes fertilizantes e defensivos agrícolas na água é bastante variável, sendo que a utilização daqueles com maior persistência deve obedecer a uma área de proteção maior.

8.4 Poços tubulares

A principal fonte de água para consumo humano dentro do CNPMS são os poços tubulares. Tendo em vista a manutenção dos aquíferos cársticos que são explorados por esses poços fez-se um estudo sobre sua capacidade de produção e sobre a necessidade da manutenção de áreas de proteção dos poços.

Para avaliar a capacidade de produção dos poços foi realizada uma série de simulações de forma a obter, como limite da taxa de bombeamento, a vazão na qual o rebaixamento do nível da água alcançasse uma cota em torno de 1 m superior à posição do filtro do poço. Os resultados dessas simulações podem ser visualizados na **Tabela 8.6**, juntamente com a vazão atual utilizada.

Tabela 8.6 - Capacidade máxima de produção dos poços localizados no CNPMS e suas vazões atuais.

Poço	Referência	Produção Máxima (m ³ /dia)	Vazão atual (m ³ /dia)
P15	Poço próximo à ponte do Ribeirão Matadouro	19.400	312
P16	Poço poucos metros a oeste do poço P1	19.980	312
P17	Poço da sede da Associação de Funcionários	18.750	120
P18	Poço próximo à lagoa da estação climatológica	21.600	160

Observando a tabela acima fica claro que a vazão hoje explorada é muito inferior à capacidade de produção dos poços. Caso haja um aumento na demanda local além da grande margem de segurança que se tem em relação à vazão atual, pode-se optar pela perfuração de novos poços. Caso seja desejável a perfuração de poços, as áreas que apresentam maior potencial de produção são: a porção sul da área e a região central, próxima aos poços 15, 16 e 17, onde as velocidades de fluxo no ambiente cárstico são maiores como pode ser observado pelo mapa de fluxo, apresentado na **Figura 8.7**, onde o tamanho das setas é proporcional à velocidade do fluxo.

A maior capacidade de produção nessas áreas se deve ao contato das rochas carbonáticas com formações menos condutivas que fazem com que o fluxo se concentre no carste.

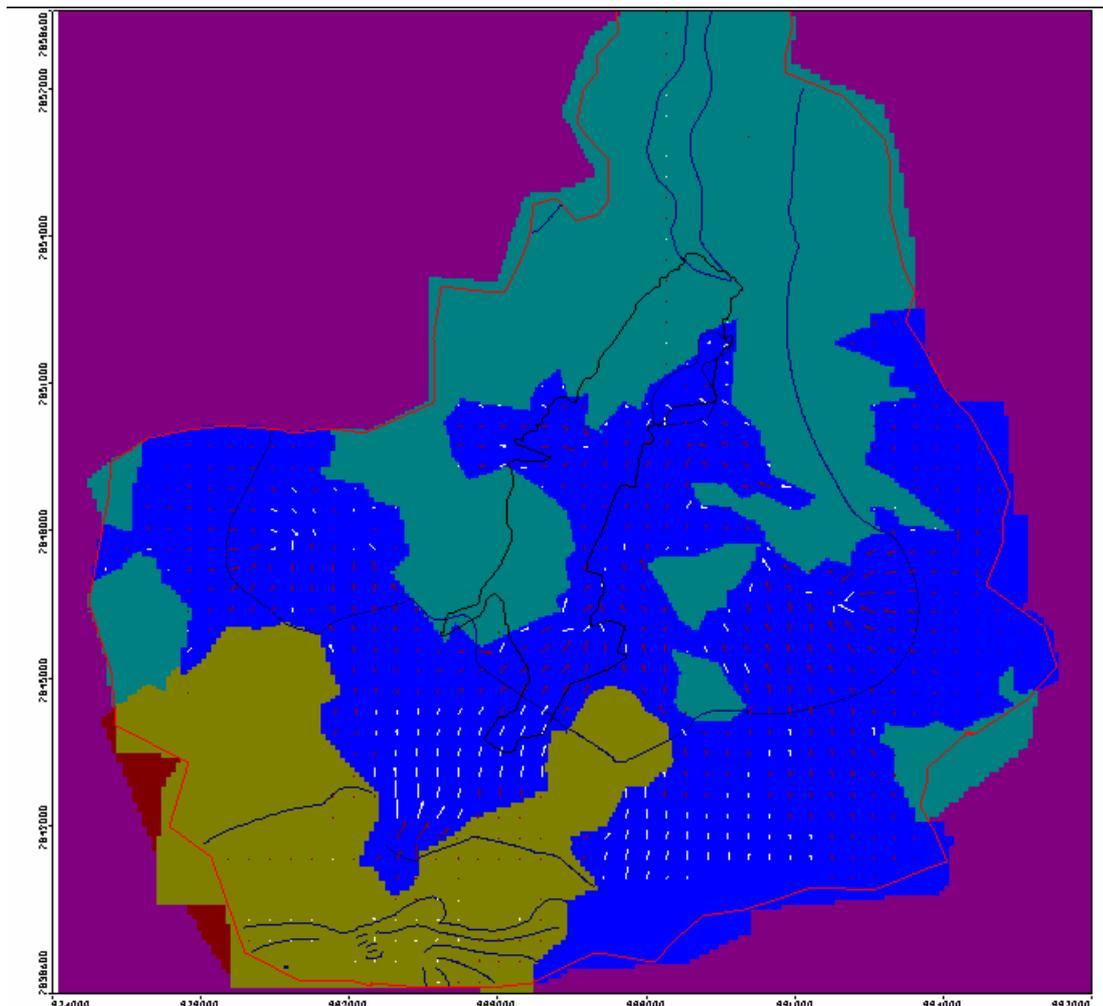


Figura 8-7 – Distribuição espacial relativa das velocidades de escoamento da água nos diversos ambientes geológicos, representados ao fundo conforme as cores: azul – carste, mostarda – granito fraturado, verde – Formação Serra de Santa Helena.

A partir da análise da **Figura 8.7**, recomenda-se aqui que se faça a opção preferencialmente, para instalação de novas perfurações, na porção mais ao sul, pois na região central já existem três poços que, caso atinjam sua capacidade máxima de produção, sofrem interferências entre si tornando-se secos.

Conforme exposto anteriormente, uma importante ferramenta na gestão dos recursos hídricos é a definição das zonas de captura dos poços tubulares que permitirão propor áreas de proteção desses poços para que diminuam os riscos de contaminação de suas águas. Pensando nessa preservação da qualidade das águas foram simuladas as zonas de captura dos 4 poços existentes no CNPMS para períodos de 5, 10 e 25 anos (ver **Figura 8.8**, **Figura 8.9** e **Figura 8.10** respectivamente).

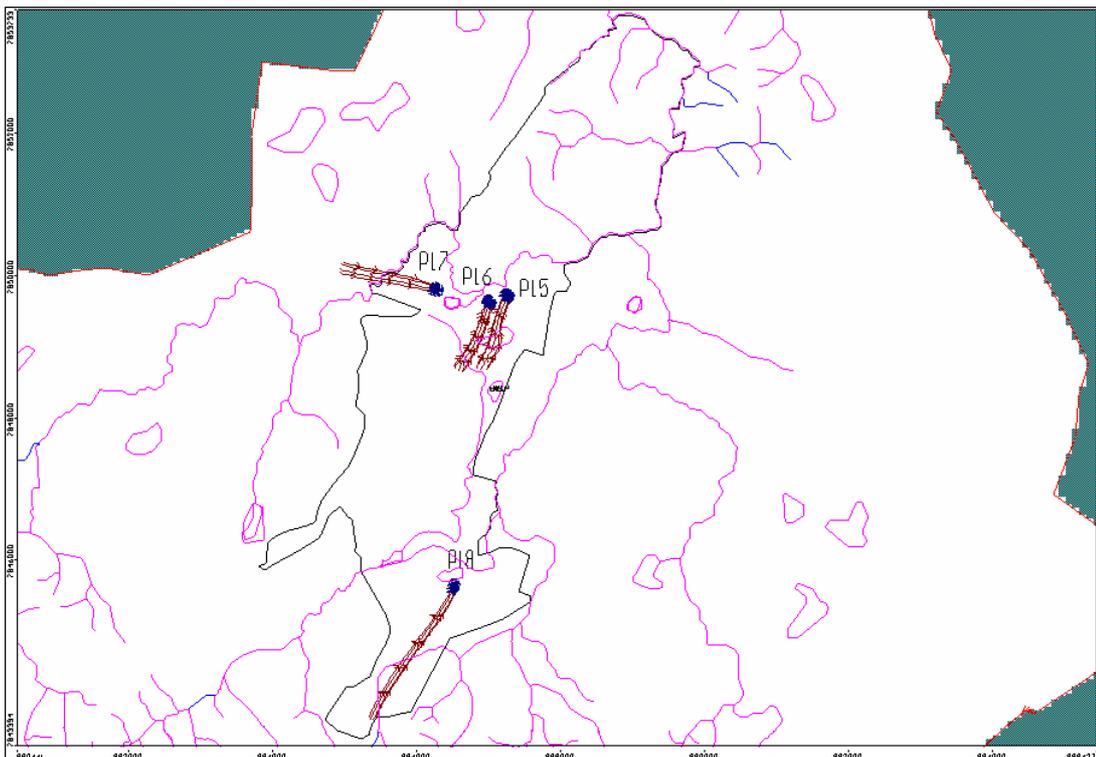


Figura 8-8 – Zona de captura dos poços do CNPMS, com suas vazões nominais, em um período de 5 anos.

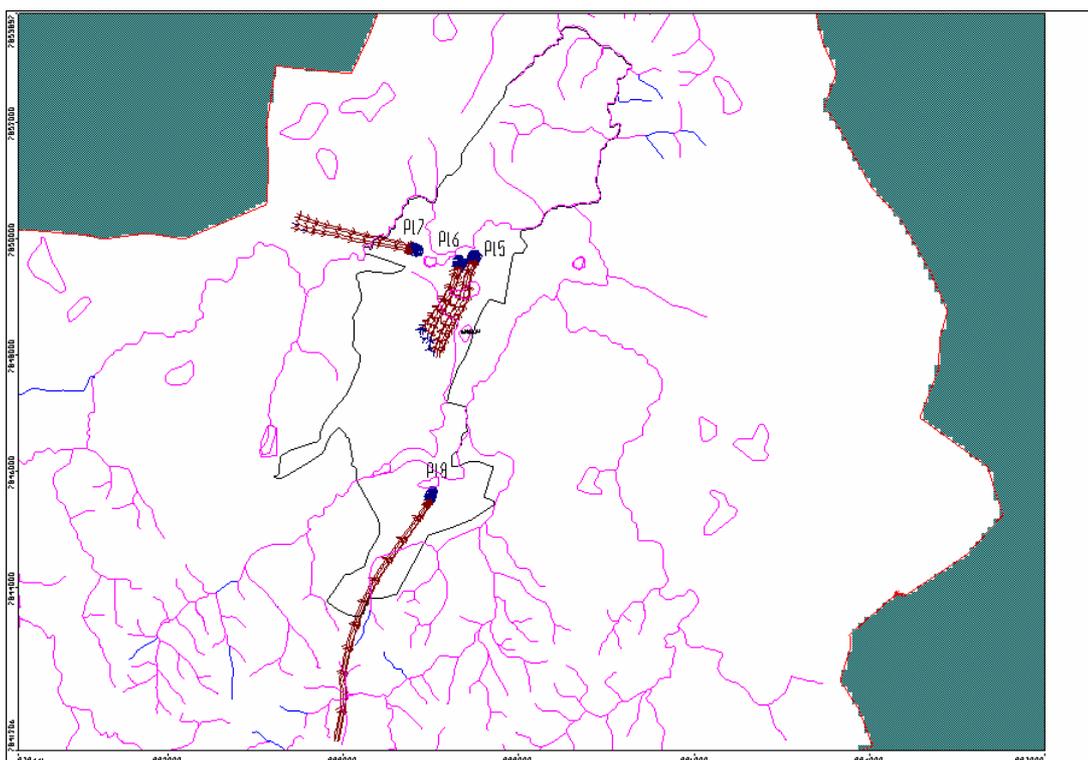


Figura 8-9 – Zonas de captura dos poços do CNPMS, com suas vazões nominais, em um período de 10 anos.

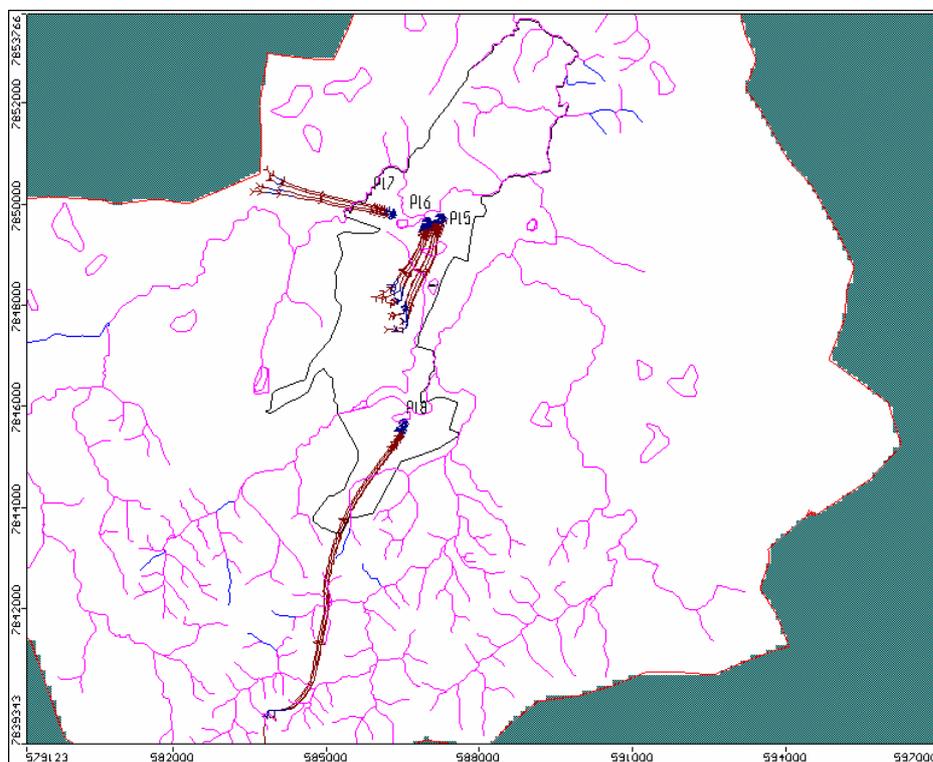


Figura 8-10 – Zonas de captura dos poços do CNPMS, com suas vazões nominais, em um período de 25 anos.

Observando as **Figuras 8.8, 8.9 e 8.10** nota-se que a zona de captura do poço P 17 passa pelo área do Ribeirão Marinheiro que apresenta uma alta carga de contaminação por esgoto. Esse fato põe em foco a atenção que deve ser dada à qualidade da água em tal poço que é utilizado para consumo humano. Análises preliminares da água não apresentaram, até o momento, nenhuma evidência de contaminação talvez devido às entradas de água desse poço se apresentarem bastante profundas mas, esse cuidado deve ser constante.

Ampliando a **Figura 8.10** em torno do poço 18, localizado mais ao sul em relação aos demais poços, obteve-se a **Figura 8.11** que será utilizada para avaliar a influência do aumento do bombeamento nesse poço, atingindo sua vazão máxima, através da comparação com a **Figura 8.12** que representa tal condição para os mesmos 25 anos.

Analisando as figuras citadas acima fica nítido um aumento do diâmetro da zona de captura do poço quando esse sofre um bombeamento igual à sua vazão máxima. Esse aumento no diâmetro é compensado por uma diminuição da contribuição à montante e é provocado pelo alargamento do cone de rebaixamento ao redor do poço.

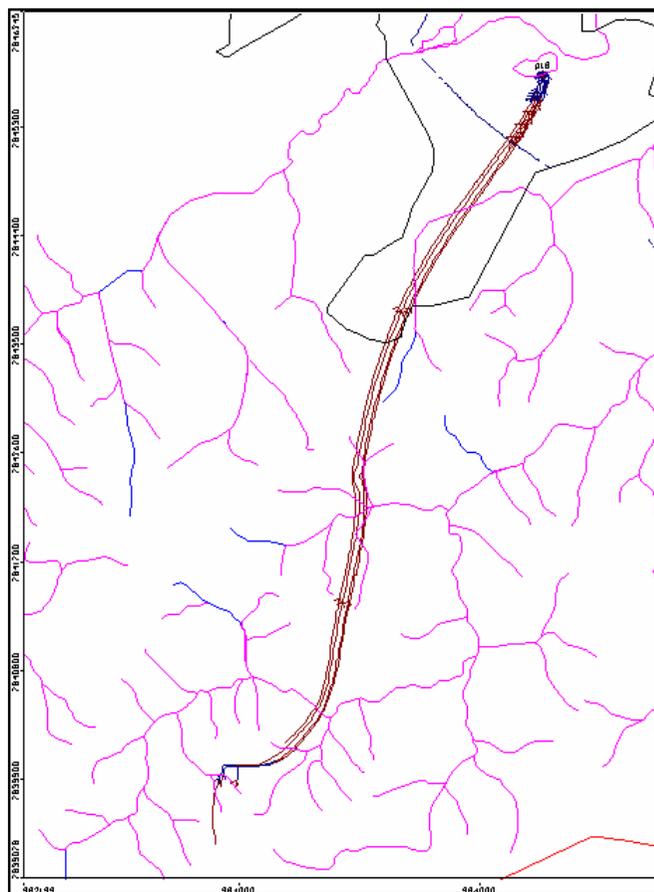


Figura 8-11 – Zona de captura do poço P18 com sua vazão atual.
Período: 25 anos.

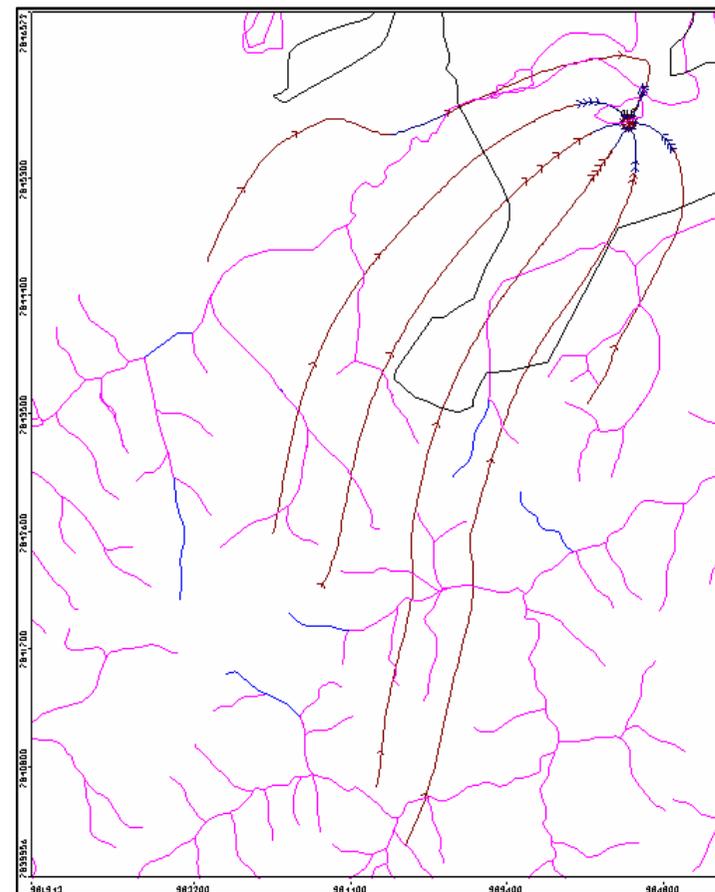


Figura 8-11 - – Zona de captura do poço P18 com vazão máxima. Período: 25 anos.

8.5 Cisternas

Para mapear as zonas de captura das principais cisternas localizadas no CNPMS e em seu entorno, foi considerado um valor médio de bombeamento de $86 \text{ m}^3/\text{dia}$ visto que não são conhecidos os dados reais de vazão.

A **Tabela 8.7** traz a identificação de cada uma dessas cisternas. Entre elas, merecem um cuidado especial as cisternas C5 e C6 que atualmente são utilizadas para uso doméstico.

Tabela 8.7 - Localização e identificação das cisternas avaliadas quanto à zona de captura.

Identificação	Descrição	UTM-E (m)	UTM-N (m)
C1	Cisterna em frente ao restaurante	587.311	7.849.482
C2	Cisterna da sede dos campos experimentais	587.368	7.849.663
C3	Cisterna do estábulo da Epamig - divisa com CNPMS	589.097	7.849.774
C4	Cisterna do estábulo da Epamig próximo à lagoa	587.750	7.848.711
C5	Cisterna da vila da Epamig	587.840	7.847.985
C6	Cisterna da Fazenda do Marinheiro	584.511	7.845.068
C7	Cisterna do SNT	587.717	7.849.663

Os mapas apresentando as zonas de captura das cisternas com bombeamento de $86 \text{ m}^3/\text{dia}$ são representados nas figuras: **Figura 8.13**, **Figura 8.14**, **Figura 8.15**. Como a taxa de bombeamento nessas cisternas é muito pequena, ocorrem poucas alterações quando elas deixam de ser bombeadas.

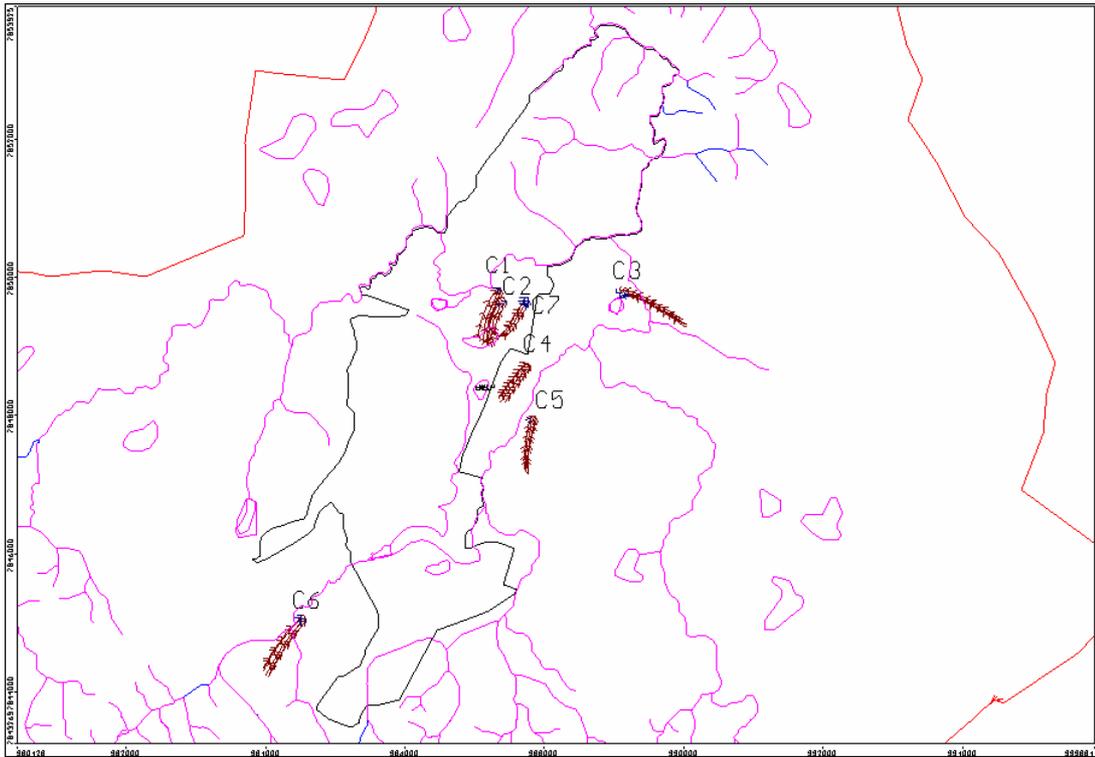


Figura 8-12 - Zonas de captura das principais cisternas considerando um bombeamento médio de $86 \text{ m}^3/\text{dia}$ por um período de 5 anos.

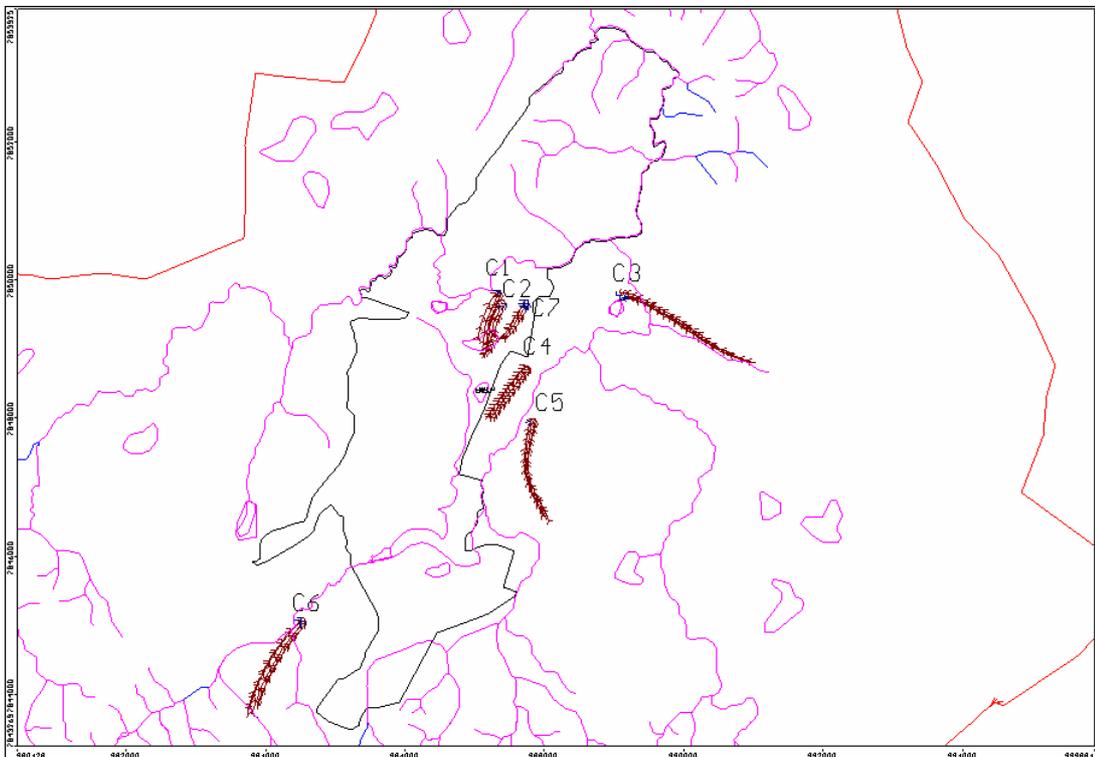


Figura 8-13 – Zonas de captura das principais cisternas considerando um bombeamento médio de $86 \text{ m}^3/\text{dia}$ por um período de 10 anos.

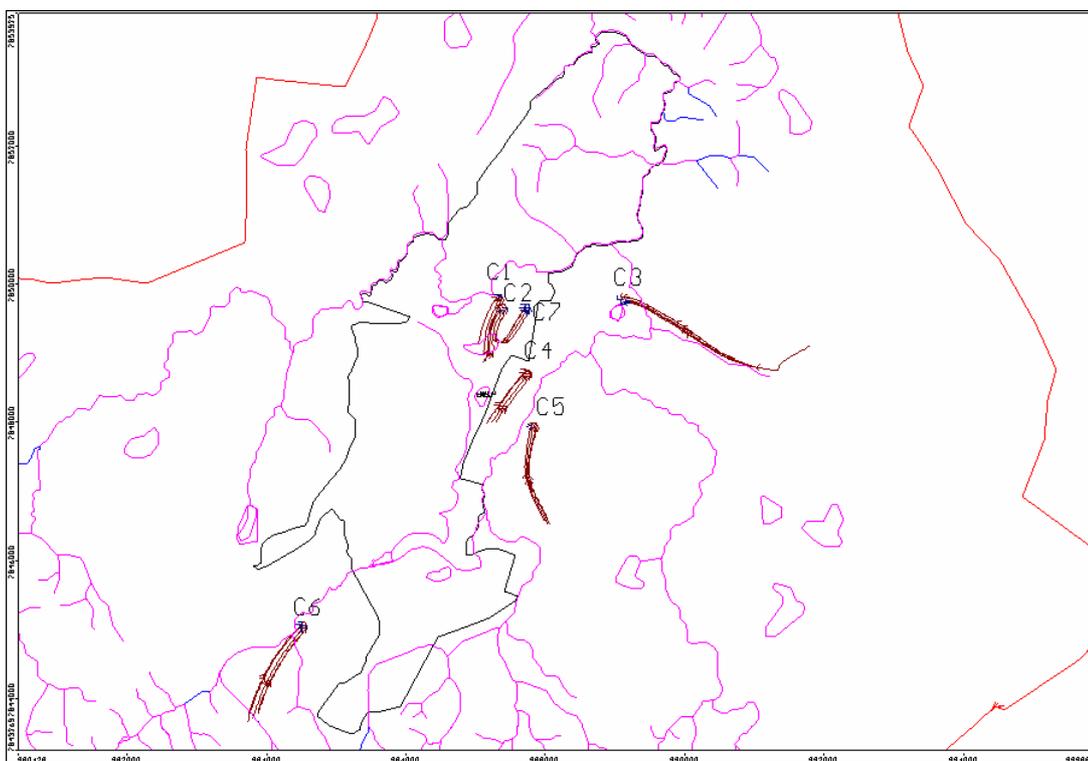


Figura 8-14 – Zonas de captura das principais cisternas bombeadas por um período de 25 anos.

8.6 Nascentes

A avaliação das nascentes consistiu da determinação das vazões das nascentes permanentes localizadas dentro do CNPMS e da nascente do Marinheiro, localizada próximo à divisa do Centro que é muito utilizada pela população local para uso doméstico. Tais vazões foram obtidas pela definição de uma zona de cálculo ao redor de cada uma das nascentes, utilizando o aplicativo Zone-budget. Foram realizadas simulações em duas condições: a primeira representa a condição atual e a segunda é uma simulação hipotética de como se comportariam as nascentes caso os poços fossem bombeados conforme sua vazão máxima calculada. Os resultados dessas simulações são apresentados na **Tabela 8.8**.

Tabela 8.8 - Vazão das nascentes nas condições atuais (vazão 1) e com os poços extraindo sua capacidade máxima de produção (vazão 2).

Identificação	Descrição	Vazão 1 (m ³ /dia)	Vazão 2 (m ³ /dia)	Variação (%)
N1	Nascente da usina de álcool	26,66	25,23	-5,4
N2	Nascente da matinha	25,89	11,10	-57,1
N3	Nascente do NIA	10,09	11,59	14,9
N4	Nascente da subida da estação	52,53	0,00	-100,0

A nascente N4 é a que mais sofre influência do aumento no bombeamento dos poços devido à sua proximidade com o poço P18 (ver **Figura 8.16**). Todas as demais nascentes onde houve redução na vazão sofrem a influência do mesmo poço como pode ser observado na **Figura 8.16**.

A **Figura 8.16** que apresenta a localização das nascentes em relação aos poços e as zonas de captura das nascentes no período de 5 anos foi ampliada para facilitar a visualização das zonas de captura conforme pode-se observar na **Figura 8.17**.

As zonas de captura das nascentes também foram simuladas para períodos de 10 anos (**Figura 8.18**) e 25 anos (**Figura 8.19**).

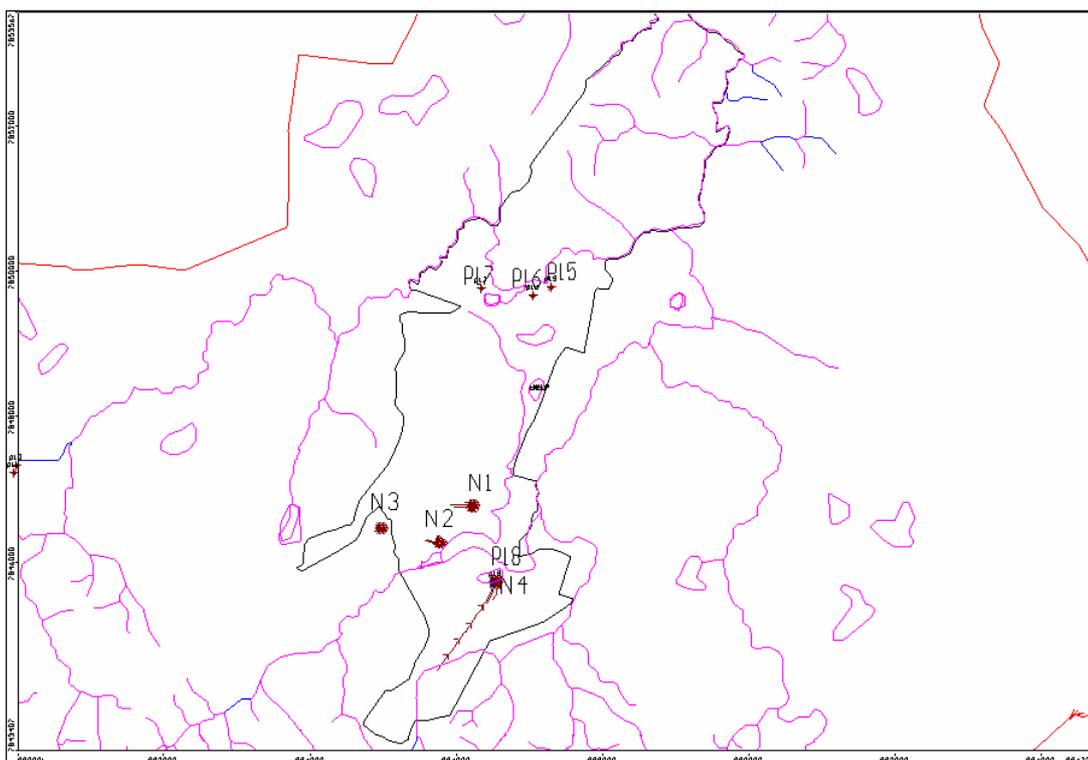


Figura 8-15 – Localização dos poços e nascentes e zonas de captura das nascentes. Período: 5 anos.

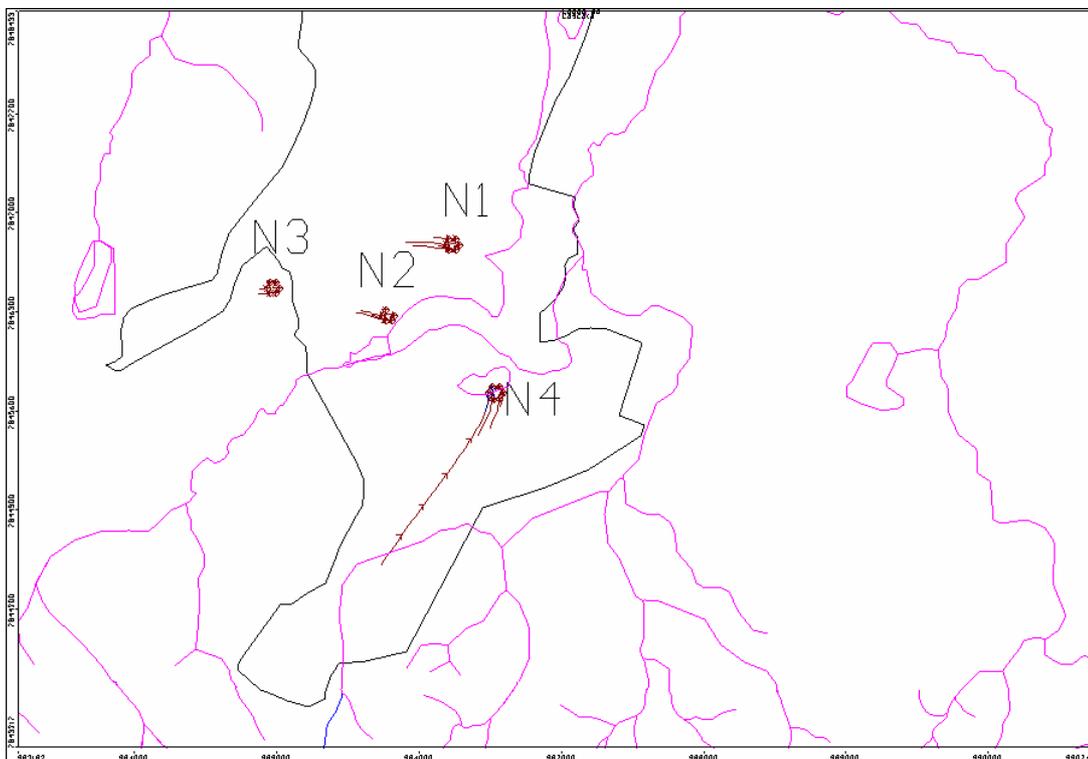


Figura 8-16 – Zonas de captura das nascentes. Período: 5 anos.

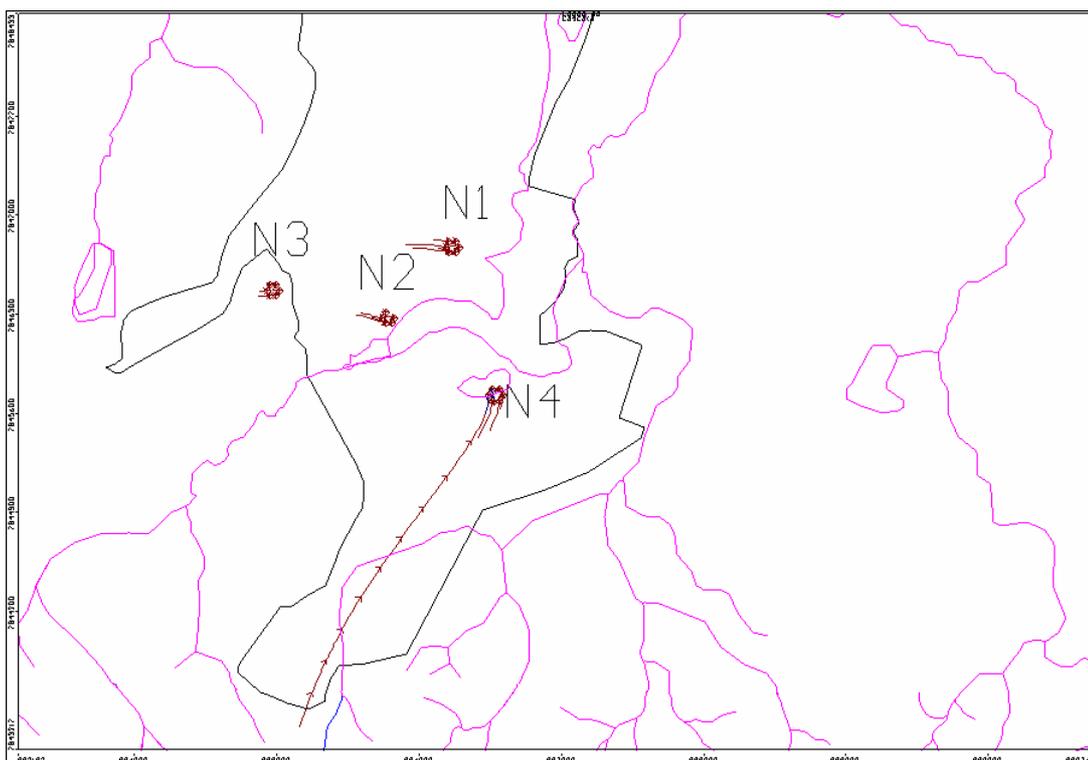


Figura 8-17 – Zonas de captura das nascentes. Período: 10 anos.

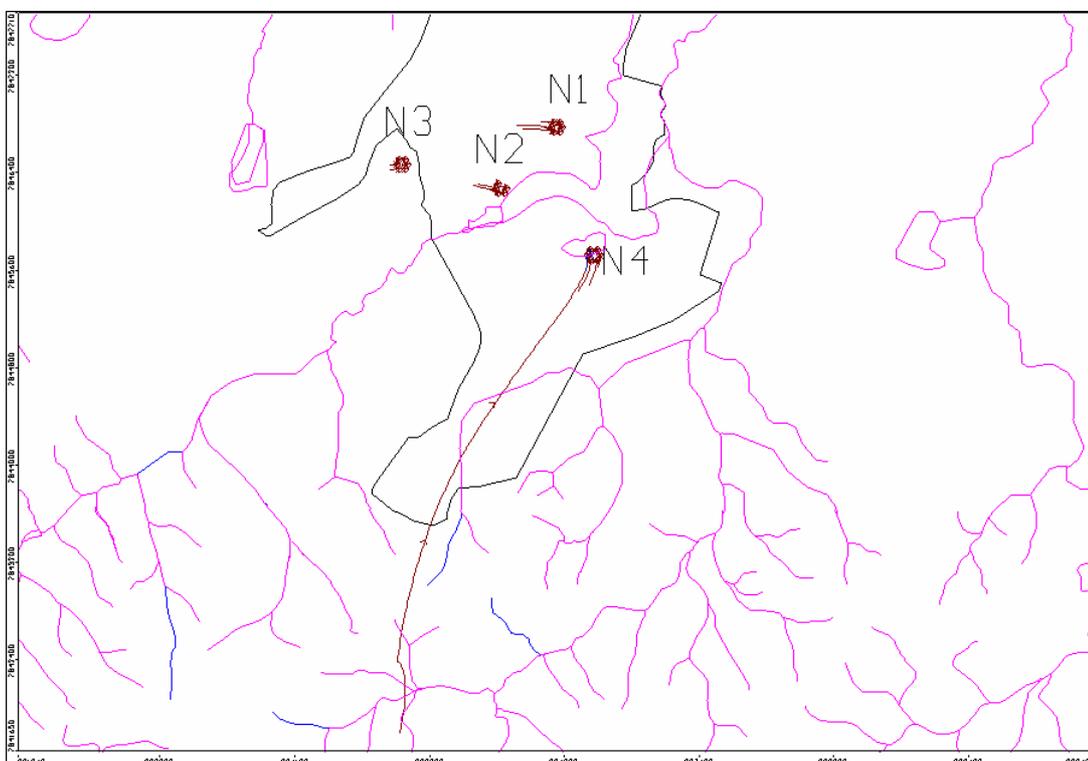


Figura 8-18 – Zonas de captura das nascentes. Período: 25 anos.

A pequena zona de captura das nascentes deve-se ao fato de que elas são alimentadas pelo lençol freático em suas porções mais rasas, onde o fluxo é lento em relação ao aquífero cárstico e ao escoamento superficial que contribuem para outros mananciais aqui analisados.

Os dados de alguns parâmetros químicos permitem confirmar essa curta trajetória da água das nascentes visto que elas apresentam pH e condutividade elétrica baixos (**Tabela 8.9**), indicando que essas águas são bastante jovens.

Tabela 8.9 – Parâmetros físico-químicos das nascentes.

Identificação	Descrição	pH	Condutividade elétrica (µS/cm)
N1	Nascente da usina de álcool	6,43	59,8
N2	Nascente da matinha	5,89	51,5
N3	Nascente do NIA	5,39	17,5
N4	Nascente da subida da estação	6,13	50,2

8.7 Lagoas

Dentro do CNPMS as lagoas têm um papel primordial como acumuladoras de água para irrigação. Neste trabalho tais lagoas foram simuladas como drenos, porém, muito pouco se conhece ainda sobre o seu comportamento e as interações dessas com a água subterrânea e com os aquíferos cársticos. Recomenda-se que essas interações sejam estudadas mais detalhadamente por meio da avaliação da qualidade da água, da medida do nível das lagoas com a utilização de réguas linimétricas e da medida da vazão nas saídas do canal para as lagoas que são abastecidas por ele.

A área de influência das principais lagoas do CNPMS e de seu entorno foi delimitada simulando-se a trajetória da partícula reversa. Deve-se dar uma atenção especial, dentro da área do Centro, à lagoa da Baiana que, através do canal de irrigação, abastece a maioria das demais lagoas. As lagoas aqui avaliadas são identificadas na **Tabela 8.10**.

Tabela 8.10 - Identificação das lagoas avaliadas quanto à sua zona de captura.

Identificação	Descrição
L1	Lagoa Olhos D'água
L2	Lagoa da Capivara
L3	Lagoa da Cascata
L4	Lagoa da Baiana
L5	Lagoa da Estação
L6	Lagoa do Estábulo - Epamig

A trajetória das partículas nos diversos períodos de tempo: 5 anos (**Figura 8.20**); 10 anos (**Figura 8.21**) e 25 anos (**Figura 8.22**) são apresentadas a seguir.

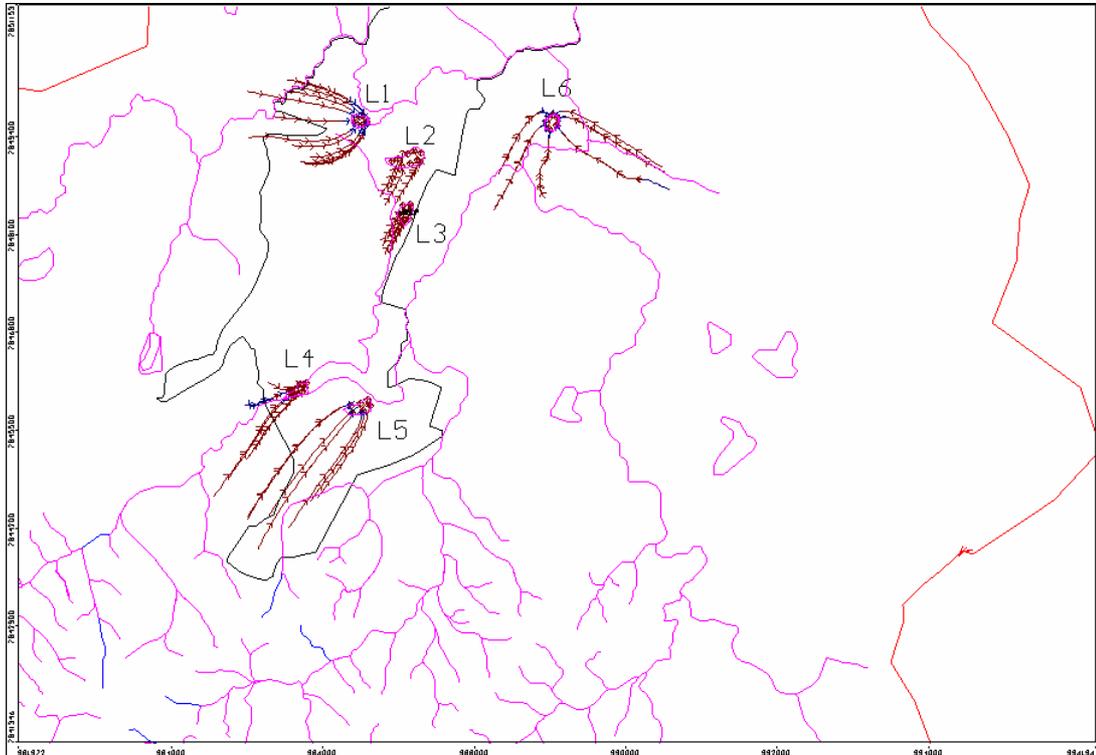


Figura 8-19 – Zonas de captura das lagoas no período de 5 anos.

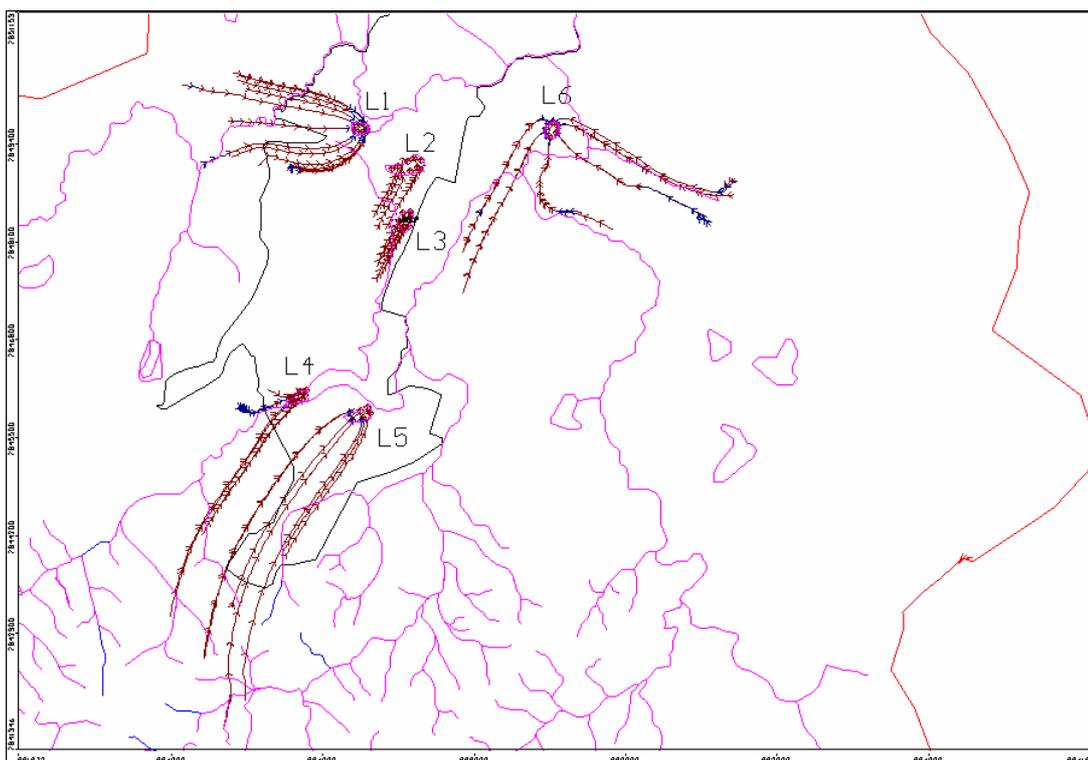


Figura 8-20 – Zonas de captura das lagoas no período de 10 anos.

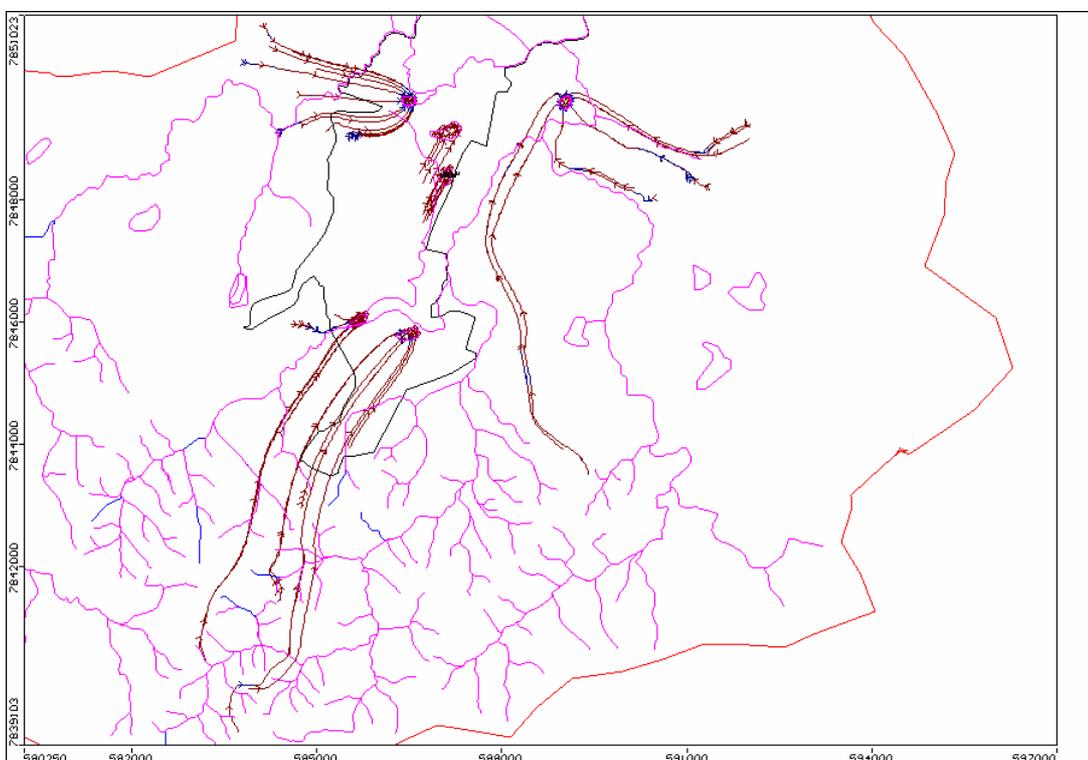


Figura 8-21 – Zonas de captura das lagoas no período de 25 anos.

As zonas de captura das lagoas em geral, apresentam um diâmetro maior, pois elas se encontram nas regiões mais baixas da paisagem recebendo um grande aporte por meio do escoamento superficial de toda a área ao seu redor. Além disso, as lagoas também recebem contribuição dos aquíferos mais profundos, com exceção da Lagoa da Capivara, que tem seu fundo impermeabilizado por uma camada de sedimentos depositados no fundo ao longo do tempo.

A Lagoa da Baiana apresenta um formato diferenciado das demais em sua zona de captura visto que a principal contribuição para sua formação são as águas represadas do Córrego do Marinheiro o que torna grande a zona de captura a montante.

9 CONCLUSÕES

O presente trabalho consiste em uma caracterização hidrogeológica ambiental de caráter preliminar da área de influência do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo (CNPMS). Para tal foi proposto, baseado em dados de campo e em pesquisa bibliográfica, um modelo conceitual a partir do qual foi gerado um modelo computacional.

Esse modelo hidrogeológico computacional descreve o comportamento hidrodinâmico dos principais aquíferos presentes na área de estudo o que permitiu avaliar diversos aspectos ambientais relacionados a esse comportamento.

A análise ambiental aqui proposta teve como principais objetivos avaliar a capacidade de produção dos poços, mapear as zonas de captura dos poços, cisternas, nascentes e lagoas e avaliar a influência dos poços em alguns outros mananciais hídricos.

Após essas análises chegou-se às seguintes conclusões:

- Os poços atualmente em uso exploram apenas aproximadamente 7,7 % das reservas hídricas existentes na região o que causa variações muito pequenas na superfície potenciométrica local.
- Apesar de a exploração ser pequena ocorreu uma perda de 17 % na vazão da estação do Curtume, localizada no Ribeirão Matadouro, próximo à região de maior densidade de poços.
- A vazão dos principais cursos d'água foi estimada em: Ribeirão Jequitibá: 164.354 m³/dia; Ribeirão Matadouro: 28.577 m³/dia; Córrego Forquilha: 13.753 m³/dia e Córrego Marinheiro: 3.536 m³/dia.
- O fluxo da água subterrânea no aquífero cárstico é mais intenso nas regiões próximas ao contato com formações geológicas menos permeáveis que acabam concentrando o fluxo no carste ocasionando uma maior capacidade de produção para poços instalados nesses locais.
- A vazão atual dos poços existentes dentro da área do CNPMS é muito menor que a capacidade máxima de produção dos poços que se encontra em torno de 19.000 m³/dia.

- Caso todos os poços do CNPMS sofram um bombeamento igual à sua vazão máxima, os três poços que se encontram próximos, na região central, tornam-se secos.
- A zona de captura em superfície dos poços tubulares, quando esses atingem sua capacidade máxima de produção, tem um aumento em seu diâmetro que é compensado por uma diminuição da contribuição a montante. Esse fato se deve ao alargamento do cone de rebaixamento.
- As zonas de captura das cisternas sofrem alterações insignificantes na ausência de bombeamento visto que este é muito pequeno.
- De acordo com as simulações do modelo computacional as nascentes apresentam as seguintes vazões: nascente da usina = 25,66 m³/dia; nascente da matinha = 25,89 m³/dia; nascente do marinho = 10,09 m³/dia; nascente da lagoa da estação = 52,53 m³/dia.
- Todas as nascentes sofrem alterações em suas vazões devido às variações nas condições de fluxo quando se considera a hipótese de todos os poços bombearem sua vazão máxima. Quanto menor a distância maior a influência do poço.
- As zonas de captura das nascentes estão, em geral, dentro de uma área menor que os demais casos aqui propostos visto que elas têm como principal fonte o lençol freático, com fluxo mais lento e pouca influência do escoamento superficial e de aquíferos mais profundos.
- As lagoas apresentam grande influência do escoamento superficial, pois se encontram nas regiões mais baixas da paisagem atuando como armazenadores de água, porém elas também têm contribuição dos aquíferos mais profundos, com exceção para a Lagoa Capivara que tem seu fundo impermeabilizado por uma camada de sedimentos depositados ao longo do tempo.
- A caracterização hidrogeológica aqui proposta mostrou-se adequada, sendo compatível com os dados do balanço hídrico da região, com dados de permeabilidade dos aquíferos apresentados em outros trabalhos e com padrões de calibração aceitáveis em trabalhos de modelagem hidrogeológica.

10 RECOMENDAÇÕES

A proposta deste trabalho como uma avaliação preliminar da área de estudo traz inerente a ela uma gama de incertezas que aparecerão aqui como questionamentos a serem tratados nos próximos trabalhos realizados por este grupo de estudos. Seguem aqui algumas recomendações que devem ser observadas.

- Revisão do mapa topográfico;
- Mapeamento em uma escala maior da geologia e dos solos;
- Realização de um levantamento geológico-estrutural com mapeamento dos eixos de fraturamento;
- Perfuração de poços e piezômetros com perfilagem, principalmente nas áreas de contato geológico com o embasamento cristalino;
- Realização de testes de bombeamento nos poços já existentes e nos que serão perfurados;
- Medida da vazão nos córregos, principalmente onde é nítida a variação no volume de água, no canal de irrigação para avaliar perdas de água e o consumo geral do Centro e próximo às confluências dos principais córregos com o Ribeirão Jequitibá;
- Instalação de réguas linimétricas nas lagoas naturais que não apresentam seu nível controlado pelos canais de irrigação;
- Análise da qualidade da água e avaliação da influência do carste nas águas superficiais a partir da presença, principalmente, de íons como cálcio, magnésio e da medida do pH.
- Avaliação constante da qualidade da água nos poços, principalmente no poço da associação de funcionários.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W.W. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Califórnia: Academic Press, 1992. 381 p.
- ALKMIM, F. F.; MARTINS-NETO, M.A. A bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte, 2001. p. 9 – 30.
- AVELLAR, G.; SILVA, A. F. Novas Trilhas no Sertão. História da pesquisa agropecuária em Sete Lagoas: das origens à Embrapa. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 183p.
- BARBOSA, A. L. M. Simpósio das formações paleozóicas do Brasil, Série Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 19, Rio de Janeiro, 1965. *Anais...*Rio de Janeiro, SBG, p.11.
- BONGANHA, C. A.; GUIGUER JR., N.; PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. C.; RIBEIRO, M. L. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. *Revista Analytica*, n.30, p. 116-120, 2007.
- BRAUN, O. P. G. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 14, Belo Horizonte, 1968. *Anais...*Belo Horizonte, SBG, p. 155-166.
- COSTA, M. T.; BRANCO, J. J. R. Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 14., 1961, Belo Horizonte, *publicação* 15. p. 9 – 25.
- COSTA, W. D.; SILVA, A. B. Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: FEITOSA, F. A. C.; MANUEL FILHO, J. Hidrogeologia – conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000.
- CPRM. v.1. Informações básicas para a gestão territorial: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa. Belo Horizonte: CPRM, 1994. v. 1 (Município de Capim Branco).
- CPRM. v.5. Informações básicas para a gestão territorial: região de Sete Lagoas – Lagoa Santa. Belo Horizonte:CPRM, 1994. v. 5 (Uso da terra e caracterização da cobertura vegetal do município de Sete Lagoas).
- CPRM. Relatório final: mapeamento geológico: região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia. Belo Horizonte: CPRM, 2003 – CD-ROM.
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Recife, 1978. *Anais...*SBG, 2: 597-610.
- EMBRAPA, Plano Diretor da Embrapa Milho e Sorgo 2004 – 2007. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005.
- FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997. 412p.
- FETTER, C. W. Contaminant hydrogeology. New York: Macmillan, 1993. 458 p.
- FORD, D., WILLIAMS, P. Karst geomorphology and Hydrology. 1.ed. Cambridge: Chapman & Hall, 1989. 601 p.

GUIGUER, N., FRANZ, T. Visual MODFLOW. User's Manual. Waterloo Hydrogeologic Inc.. Waterloo, Canadá. 1996. 231p.

GROSSI SAD, J. H.; QUADE, H. Revisão estratigráfica do Grupo Bambuí (Bloco oriental), em Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3, Belo Horizonte, 1985. Anais...Belo Horizonte, SBQ-MG, p.68-83.

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS APLICADAS (IGA). Município de Sete Lagoas. Belo Horizonte: IGA, 1988. Escala – 1:70.000.

IBGE 2004, Mapa de biomas do Brasil. 2004. (Publicado em 21/05/2004 em <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias>).

IRITANI, M.A. *Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea*. 1996. 200 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p. 113-138.

MARCUZZO, F. F. N., ARANTES, E. J. WENDLAND, E. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial direta para a região de São Carlos – S.P., Irriga, Botucatu, v.13, n.3, p.323-338, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano nacional de recursos hídricos: síntese executiva. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MISI, A. Estratigrafia isotópica das seqüências do supergrupo São Francisco, coberturas neoproterozóicas do Craton do São Francisco. Idade e correlações. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte, 2001. p. 67 – 92.

MOURÃO, M. A. A.; CRUZ, W. B.; GONÇALVES, R. L. F. Caracterização hidrogeológica da porção mineira da bacia hidrográfica do São Francisco. In: Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte, 2001. p. 327 – 349.

NOGUEIRA, Marly. *Sete Lagoas: a dinâmica funcional de um lugar na rede urbana de Minas Gerais*. 2003. 291 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, M. A. M. Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobrás, DEPIN, CENPES, Rio de Janeiro, Coletâneas de relatórios de exploração, 1:71-105, 1967.

PANOSO, L. A.; RAMOS, D. P.; BRANDÃO, M. Solos do campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro. Boletim de pesquisa e desenvolvimento 5. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2001.

PESSOA, Paulo Fernando Pereira. *Caracterização hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG: potencialidades e risco*. 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

PESSOA, P. Fernando Pereira. *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos da região de Lagoa Santa, MG*. 2005. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

- PINTO, C. P.; MARTINS-NETO, M. A. Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia – núcleo Minas Gerais, 2001. 349 p.
- RAIJ, B. V. Solo e meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, junho 2003.
- REBOUÇAS, A.C.; RICCOMINI, C.; ELLERT, N.; DUARTE, U.; MELITO, K.M.; SENF, L.A.; SOUZA, J.C.S. 1994. Diagnóstico Hidrogeológico da R.M.S.P. Uso e Proteção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife, 1994. Anais...Recife, ABAS/DNPM/CPRM, p. 93-102.
- RIMANN, E. A. Kimberlita no Brazil. Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, Ouro Preto, n.15, p. 27-32, 1917.
- SCANLON, B. R.; MACE, R. E.; BARRET, M. E.; SMITH, B. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. Journal of Hydrology, n. 276, p. 137-158, 2003.
- SCHOLL, W. U. Estromatólitos (Conophyton) em dolomitos do Grupo Macaúbas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29: Ouro Preto, 1976. Anais...Ouro Preto, SBG, 2:67-73.
- SILVA, D. B.; SILVA, J. A.; JUNQUEIRA, N. L. V.; ANDRADE, L. R. M. *Frutas do cerrado*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. 178 p.
- SILVA, J. C. S. Caracterização hidrogeológica ambiental da área de influência da Mina da Lapa Vermelha, na região cárstica de Lagoa Santa, MG. 2003. 270 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Universidade/UFRGS, 2001. p. 253-288.
- TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Universidade/UFRGS, 2001. p. 391-442.
- VASCONCELOS, S. M. S. Estimativa da recarga subterrânea a partir do balanço hídrico: exemplo de Fortaleza (CE). Revista de Geologia, Fortaleza, v.1, p.27-34, 1994.

12 ANEXO 1 – DADOS DOS POÇOS TUBULARES LOCALIZADOS NA CIDADE DE SETE LAGOAS. FONTE: SIAGAS, CPRM.

Anexo 1A – Modelo de ficha técnica de cadastro de poços pelo SIAGAS

Anexo 1B – Tabela de dados contendo o perfil dos poços cadastrados

Anexo 1C – Localização dos poços do Anexo 1B

Anexo 1A – Modelo de ficha técnica de cadastro

 waterloo hydrogeologic SOFTWARE • CONSULTING • TRAINING	Waterloo Hydrogeologic, Inc. 460 Phillip Street - Suite 101 Waterloo, Ontario, Canada - N2L 5J2 ph: (519) 746-1798 Fax: (519) 885-5262 www.waterloohydrogeologic.com
---	---

FICHA TÉCNICA DETALHADA

DADOS TÉCNICOS

3100002552

Estado: MG	Município: Sete lagoas
Nome:	Latitude: 19°27'50" UTM N: 7.847.656,0
Conclusão:	Longitude: 44°14'00" UTM E: 580.468,0
Natureza: Poço tubular	Hemisfério: S Meridiano: 45
Situação: Equipado	Data: 27/11/1978 Base Cartog.: SE.23-Z-C-II
Profund. (m): 80,00	Data: 20/8/1970 Denominação: Sete lagoas
Objetivo:	Bacia Estadual: Bacia do rio sao francisco
Localização: SETE LAGOAS	Bacia: Rio São Francisco
Local. Abast.:	Subbacia: Rios São Francisco e das Velhas
Proprietário: SAAE	

DADOS CONSTRUTIVOS

Data Perf.: 20/8/1970	Prof. (m): 80,00	Perfurador:	Perfuratriz:	Método de Perfuração:
Desen. (h):	Estim. (h):	Método de Desenvolvimento:	Estimulante:	Flúido de Perfuração:
CREA Resp. Perf.:	Responsável pela Perfuração:		Autor do Projeto:	Locador:

DIÂMETRO DE PERFURAÇÃO

Data de Perfuração	Profundidade (m)	De (m)	Até (m)	Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)
20/8/1970	80,00	0,00	51,00	10	254,00
20/8/1970	80,00	51,00	80,00	8	203,20

DADOS DE REVESTIMENTO

REVESTIMENTO					
Material do Revestimento	De (m)	Até (m)	Diâm. (pol)	Diâm. (mm)	Ranh. (mm)
Aço sem costura com rosca e luva	0,00	51,00	8	203,20	

ESPAÇO ANULAR

De (m)	Até (m)	Material
0,00	10,00	Cimentação
10,00	51,00	Material da formação

DADOS LITOLÓGICOS

De (m)	Até (m)	Descrição Litológica
0,00	7,50	Argila Siltosa amarela
7,50	14,00	Argila Siltosa vermelha
14,00	28,00	Argila Siltosa amarelo avermelhada

30/10/2007

1 de 3

FICHA TÉCNICA DETALHADA

DADOS LITOLÓGICOS

De (m)	Até (m)	Descrição Litológica
28,00	48,00	Argila Siltosa vermelha
48,00	50,00	Calcario alterado
50,00	71,00	Calcário compacto, cinza claro com água
71,00	80,00	Calcário cinza fragmentado com muita água

FORMAÇÃO GEOLÓGICA

De (m)	Até (m)	Formação Geológica
0,00	80,00	Sub-grupo paraopeba

DADOS TOPOGRÁFICOS

Data Medição	Cota (m)	Corte (m)	Método Medição
16/1/1993	746,00	0,00	Nivelamento barométrico (Barômetro)

BOCA DO TUBO

Data	Altura (m)	Diâmetro (pol)	Diâmetro (mm)
17/5/1991	0,95	8	203,20

ENTRADA D'ÁGUA

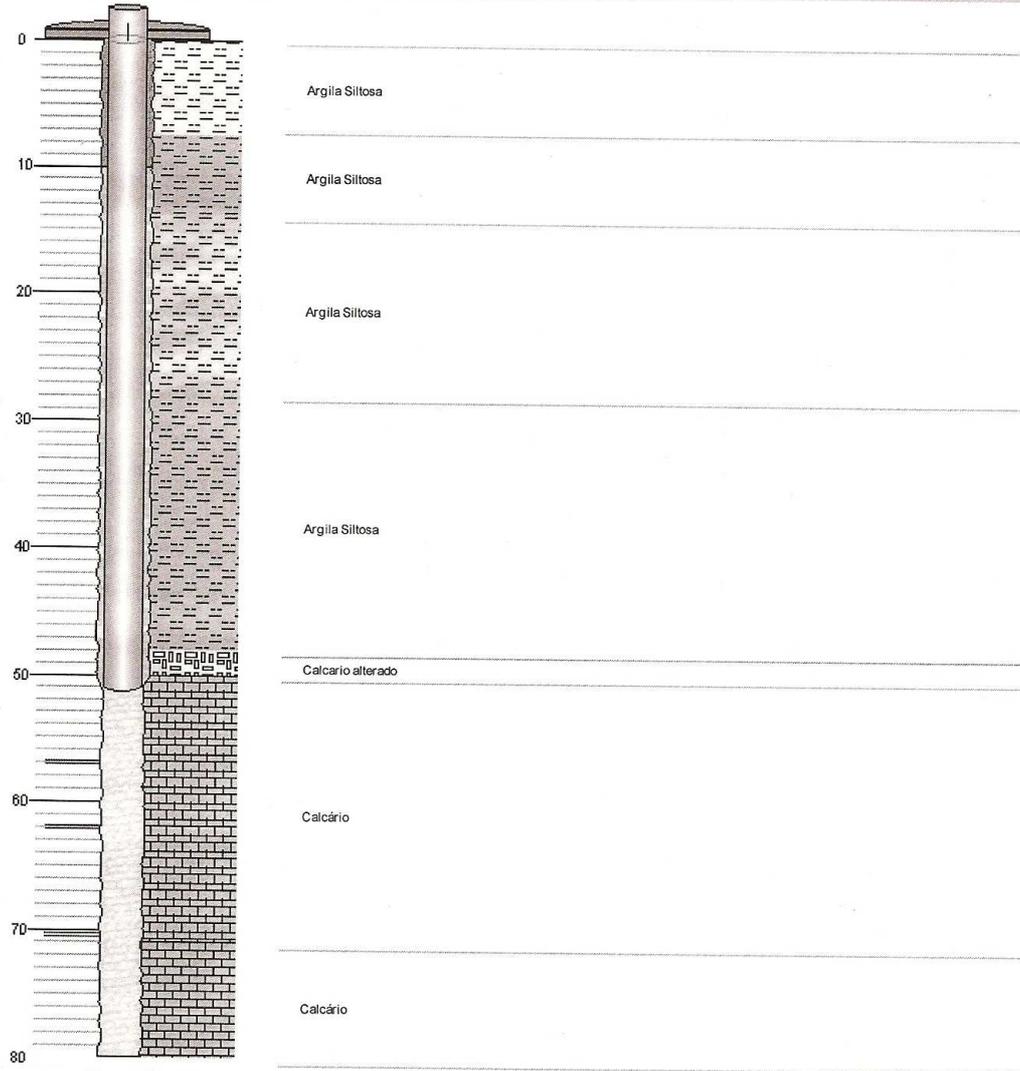
Profundidade (m)
57,00
62,00
70,50

PROFUNDIDADE ÚTIL

Data	Profundidade Útil (m)
20/8/1970	80,00

FICHA TÉCNICA DETALHADA

PERFIL LITOLÓGICO



30/10/2007

3 de 3

Anexo 1B – Tabela de dados contendo o perfil dos poços cadastrados

Código de identificação	Profundidade inicial da camada	Profundidade final da camada	Descrição da camada estratigráfica
3100002532	0	25	argila plástica.
3100002532	25	40	lateritia do calcário.
3100002532	40	57	calcário
3100002532	57	73	gnaisse
3100002552	0	7.5	Argila Siltosa amarela
3100002552	7.5	14	Argila Siltosa vermelha
3100002552	14	28	Argila Siltosa amarelo avermelhada
3100002552	28	48	Argila Siltosa vermelha
3100002552	48	50	Calcario alterado
3100002552	50	71	Calcário compacto, cinza claro com água
3100002552	71	80	Calcário cinza fragmentado com muita água
3100003271	0	26	Argila arenosa amarelada contendo raros seixos de Quartzo.
3100003271	26	34	Calcário cinza esbranquiçado com fragmentação do tamanho de seixo
3100003271	34	36	Argila vermelho contendo pequena fração de areia fina.
3100003271	36	100	Calcário branco com fragmentação variando de seixo a areia
3100003279	0	6	Argila arenosa amarelo avermelhado
3100003279	6	80	Ardósia cinza esverdeado
3100003279	80	150	Calcário cinza oolítico
3100003284	0	4	Areia grossa
3100003284	4	10	Argila arenosa amarela
3100003284	10	26	Calcário cinza oolítico com fragmentação predominante de areia
3100003284	26	80	Ardósia cinza clara com intercalações de Calcário branco
3100003284	80	90	Calcário cinza esbranquiçado
3100003284	90	130	Ardósia cinza
3100003291	0	24	Argila arenosa amarela rosada
3100003291	24	30	Calcário oolítico cinza escuro, ligeiramente alterado

3100003291	30	70	Calcário oolítico cinza escuro
3100003291	70	74	Ardósia cinza clara com intercalações carbonáticas
3100003291	74	80	Calcário oolítico cinza
3100003291	80	118	Ardósia cinza esbranquiçado com intercalações carbonáticas
3100003291	118	130	Ardósia verde com intercalações de Calcário branco
3100003291	130	170	Calcário dolomítico, com fragmentação média rosado
3100003292	0	6	Argila arenosa rosada
3100003292	6	14	Silte arenoso amarelado com fragmentos de Ardósia
3100003292	14	58	Calcário cinza oolítico
3100003292	58	70	Ardósia cinza esbranquiçado com int. carb.
3100003292	70	94	Calcário cinza esbranquiçado com fragmentação média a fina
3100003292	94	138	Calcário bege com fragmentação tamanho de areia fina
3100003292	138	144	Mármore puro de coloração branca com fragmentação média
3100003292	144	155	Calcário branco com frag. média
3100003293	0	22	Argila arenosa amarelo avermelhado contendo seixos de Quartzo, fragmentos de Ardósia e presença de carbonatos
3100003293	22	44	Calcário cinza escuro ligeiramente alterado, oolítico
3100003293	44	94	Calcário cinza escuro, oolítico, apresentando cristais de Calcita escura
3100003293	94	98	Ardósia cinza clara com int. carb.
3100003293	98	110	Ardósia cinza clara com frag. do tamanho de areia
3100003305	0	20	Solo argiloso marrom com pequena proporção de grãos de Calcita
3100003305	20	54	Calcário cinza semi compacto com fragmentação de areia grossa
3100003305	54	64	Calcário verde rosado semi compacto com fragmentação pred. de areia grossa
3100003305	64	108	Calcário cinza compacto com frag. pred. areia de fina a méd.
3100003305	108	140	Calcário cinza esbranquiçado compacto com frag. pred. de areia fina
3100003310	0	5	Argila marrom AVERMELHADA com fração arenosa e frag. de Quartzo e Limonita
3100003310	5	20	Gnaisses alterado com frag. tamanho areia grossa
3100003310	20	70	Gnaisses alterado com frag. areia fina
3100003310	70	90	Gnaisses biotítico com granulação fina mezotráfico. Fragmentação predominante, tamanho areia fina.
3100003318	0	12	Argila arenosa amarelada
3100003318	12	16	Ardósia verde ligeiramente alterada
3100003318	16	70	Ardósia cinza esverdeada

3100003318	70	80	Calcário cinza escuro oolítico com faixas brancas
3100003320	0	6	Argila arenosa vermelho com frag. areia
3100003320	6	68	Calcário cinza oolítico com faixas brancas
3100003320	68	100	Ardósia cinza clara com intercalações carbonáticas
3100003353	0	10	Argila plástica amarelo avermelhado, com intercalações de silito calcífero.
3100003353	10	62	Calcário cinza
3100003357	0	5	Solo argiloso cinza com fragmentos de rocha carbonática e restos de matéria orgânica
3100003357	5	15	Solo argiloso amarelo com fragmentos de rocha carbonática alterada
3100003357	15	80	Calcário cinza claro com faixas brancas
3100003384	0	38	Areia média marrom com pequena fração de argila
3100003384	38	39	Granito alterado cinza
3100003384	39	100	Granito cinza
3100003447	0	4	Argila marrom clara, contendo fragmentos de ardósia alterada.
3100003447	4	10	Ardósia cinza amarronzado, ligeiramente alterada, com fragmentação predominante do tamanho de seixo.
3100003447	10	68	Ardósia cinza, com fragmentação pedominante do tamanho de seixo, contendo seixos de quartzo e intercalações de níveis carbonáticos.
3100003447	68	74	Ardósia cinza, com fragmentação do tamanho de seixo. Apresenta intercalações de níveis carbonáticos e veio de quartzo na base do intervalo.
3100003447	74	78	Calcário oolítico cinza esbranquiçado, com fragmentação variando de seixo a areia.

Anexo 1C – Localização dos poços do Anexo 1B

Código de identificação	UTM-N (m)	UTM-E (m)	Descrição do Local
3100002532	7838111	583922	PEDRAS
3100002552	7847656	580468	SETE LAGOAS
3100003271	7850990	586095	FAZENDA DAS AREIAS
3100003279	7850585	569290	SIDERURGICA PLANTAR
3100003284	7851830	570885	GRANJA JULIANA
3100003291	7847355	573635	BR 040 - KM 468
3100003292	7847385	573470	BR 040 - KM 468
3100003293	7847510	573760	BR 040 - KM 468
3100003305	7843980	575750	BR 040 - KM 472
3100003310	7842730	577350	BR 040 - KM 475
3100003318	7859405	578385	ESTIVA
3100003320	7847510	571515	FAZENDA CAPAO GRANDE
3100003353	7849800	586365	MG 424 - KM 64
3100003357	7845970	583790	GRANJA JULIANA
3100003384	7852320	580230	FAZENDA J. K.
3100003447	7861675	579905	SILVA XAVIER