



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE TÉCNICAS DE RECARGA
ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS PARA A SUSTENTABILIDADE DAS
ÁGUAS TERMAIS DA REGIÃO DE CALDAS NOVAS - GO**

TESE DE DOUTORADO Nº 104

LEONARDO DE ALMEIDA

Brasília-DF
2011



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DE TÉCNICAS DE RECARGA
ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS PARA A SUSTENTABILIDADE DAS
ÁGUAS TERMAIS DA REGIÃO DE CALDAS NOVAS - GO**

LEONARDO DE ALMEIDA

Orientador: Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos - UnB

Prof. Dr. Chang Hung Kiang - UNESP

Prof. Dr. Waldir Duarte Costa - UFPE

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig - UnB

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha – UnB

Brasília-DF
2011

“O ambiente de hoje é diferente do ambiente de ontem e será diferente também no futuro. O Homem não é senão um dos momentos da Terra. Não é uma finalidade, é uma condição efêmera e transitória.”

“Todos os seres humanos devem compreender que a menor depredação do patrimônio geológico é uma mutilação que conduz a sua destruição, a uma perda irremediável. Todas as formas de desenvolvimento devem respeitar e levar em conta o valor e a singularidade deste patrimônio.”

Declaração Internacional dos Direitos à Memória da Terra.

*Aos meus filhos Nathalia Brisa, Matheus e
Anna Flora.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar registrado meu eterno agradecimento a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

Minha esposa Catarina, compreensiva, companheira, incentivadora e responsável pelos maiores presentes da minha vida, meus filhos Nathalia Brisa, Matheus e Anna Flora.

Minha mãe Lúcia, batalhadora, professora que me ensinou o caminho da educação.

Ao professor e amigo José Eloi, excelente orientador, grande mestre, muito obrigado.

Ao geólogo Fábio Haesbaert, profundo conhecedor das águas termais de Caldas Novas e colaborador em diversas etapas desta pesquisa.

À AMAT por todo apoio logístico e financeiro. Em especial aos estagiários Silvio Fagundes, Ricardo Mesquita e Wemerson Barbosa, que ao longo de 3 anos colaboraram nas etapas de campo e no monitoramento das diversas atividades. Ao amigo Johannes, alemão-brasileiro, companheiro em diversas etapas de campo, e ao Prof. Uwe Tröger, pelas críticas e considerações.

À ANA, na pessoa do Gerente de Águas Subterrâneas, Fernando Roberto de Oliveira pelo imenso apoio e colaboração ao longo do ano de 2011. Aos amigos Fernando Oliveira, Marco Gonçalves, Adriana Niemeyer, Flávio Nascimento e Fabrício Cardoso, pela compreensão durante a etapa final da tese. Meus agradecimentos especiais aos amigos Fernando, pela leitura e sugestões no texto, Marco, pela ajuda na confecção e formatação final de figuras e mapas, e Adriana, pela leitura e sugestões.

À SEMARH/GO, na pessoa do Superintendente de Recursos Hídricos Harlen Inácio dos Santos, e do Gerente de Águas Subterrâneas, Nédio Amado, pela compreensão e apoio durante o ano de 2009 e, principalmente, durante minhas ausências devido às diversas etapas de campo ao longo do ano de 2010.

Ao Rio Quente Resorts, na pessoa da Engenheira Ambiental Ariana Barbosa, pelo apoio e empréstimo do equipamento *Hach* para análises químicas.

Aos professores do IG/UnB, em especial aos professores Geraldo Boaventura e Henrique Roig, pelas críticas e sugestões no exame de qualificação e nos comitês de acompanhamento.

Ao meu sogro e geólogo Carlos Schobbenhaus, pelo exemplo, incentivo e sugestões no texto de geologia. Ao amigo geólogo Leonardo Resende pela leitura crítica e sugestões.

Ao químico Luis Rocha, do laboratório Aqualit, pelo apoio logístico e considerações.

Aos funcionários da Pousada do Ipê, em especial ao Zé do Tamburi, sempre prestativo e presente em todas as etapas de campo; e ao Sr. Adilson, diretor administrativo da pousada.

Ao Instituto de Geociências, pelo apoio logístico, e principalmente às funcionárias Sra. Lusilene e Sra. Stela, sempre prestativas e atenciosas desde os tempos de graduação.

Aos amigos e familiares que sempre me apoiaram e deram força nos momentos difíceis, e sempre presentes nos momentos de alegria.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1. APRESENTAÇÃO.....	01
1.2. JUSTIFICATIVA / HISTÓRICO DO PROBLEMA.....	02
1.3. OBJETIVOS.....	07
1.3.1. <i>Objetivo Geral</i>	07
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	07
1.4. MATERIAIS E METODOS.....	08
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO	
2.1. GEOLOGIA.....	10
2.1.1. <i>Grupo Paranoá</i>	10
2.1.2. <i>Grupo Araxá</i>	13
2.1.3. <i>Grupo Areado</i>	13
2.1.4. <i>Geologia Estrutural</i>	14
2.2. GEOMORFOLOGIA E SOLOS.....	20
2.3. RECURSOS HÍDRICOS.....	21
2.3.1. <i>Águas Superficiais</i>	21
2.3.2. <i>Águas Subterrâneas</i>	22
2.4. CLIMA.....	25
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS	
3.1. ASPECTOS CONCEITUAIS.....	26
3.2. TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL.....	28
3.2.1. <i>Sistemas de Recarga em Superfície</i>	29
3.2.2. <i>Sistemas de Recarga em Profundidade</i>	31
3.3. HISTÓRICO E RECARGA ARTIFICIAL NO MUNDO.....	35
3.4. RECARGA ARTIFICIAL NO BRASIL.....	39
3.5. BENEFÍCIOS E PROBLEMAS COM USO DA RECARGA ARTIFICIAL.....	43
CAPÍTULO 4 - ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE MECANISMOS DE RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS NA REGIÃO DE CALDAS NOVAS	
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	45
4.2. TRABALHOS PRÉVIOS.....	46
4.2.1. <i>Ensaio de Infiltração In Situ - Sistema Aquífero Intergranular</i>	46
4.2.2. <i>Geofísica</i>	47
4.3. PERFILAGEM ÓTICA DOS POÇOS TERMAIS.....	50
4.4. ENSAIOS HIDRÁULICOS.....	52
4.5. DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGEOLÓGICA.....	61
4.6. HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS DE RECARGA.....	65

4.6.1. <i>Águas Naturais dos Aquíferos</i>	65
4.6.2. <i>Águas de Piscinas Termais</i>	66
4.6.3. <i>Isótopos Estáveis</i>	76
4.7. QUALIDADE DA ÁGUA.....	79
4.7.1. <i>Sistemas de Tratamento de Água</i>	80
CAPÍTULO 5 - RECARGA ARTIFICIAL DO SISTEMA AQUÍFERO ARAXÁ NA REGIÃO DE CALDAS NOVAS	
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	88
5.2. SISTEMAS DE RECARGA PILOTO NO AQUÍFERO INTERGRANULAR.....	89
5.3. SISTEMA DE RECARGA ATRAVÉS DE POÇO DE INJEÇÃO.....	93
5.3.1. <i>Captação e Armazenamento das Águas Termais</i>	93
5.3.2. <i>Bombeamento e Condução das Águas Termais para Estação de Tratamento</i>	94
5.3.3. <i>Aeração</i>	95
5.3.4. <i>Filtragem Integrada</i>	96
5.3.5. <i>Monitoramento Quali-Quantitativo</i>	98
CAPÍTULO 6 - DISCUSSÕES	
6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	106
6.2. VIABILIDADE TÉRMICA.....	107
6.2.1. <i>Estimativas das Reservas Hídricas Subterrâneas</i>	107
6.2.2. <i>Variabilidade da Temperatura</i>	110
6.2.3. <i>Discussão de Cenários de Recarga Artificial</i>	112
6.2.4. <i>Considerações Finais</i>	115
6.3. VIABILIDADE QUANTITATIVA.....	117
6.4. VIABILIDADE QUALITATIVA.....	124
CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	126
7.2. CONCLUSÕES.....	128
7.2. RECOMENDAÇÕES.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
ANEXO 1 - Perguntas e Respostas Sobre as Águas Quentes de Caldas Novas e Rio Quente, no Estado de Goiás	149
ÍNDICE DE FIGURAS	
Figura 1.1 - Mapa de Localização da Região de Caldas Novas.	02
Figura 1.2 - Variação das Cotas Médias do Sistema Aquífero Araxá e Superfície Potenciométrica do Sistema Aquífero Paranoá (1979 a 2011).....	04
Figura 1.3 - Variação das Cotas Médias do Sistema Aquífero Araxá e Superfície Potenciométrica do Sistema Aquífero Paranoá (2005 a 2011).....	04
Figura 1.4 - Fotografia Aérea do Ano de 1964 (USAF) e Imagem de Satélite (Google Earth) do Ano de 2003.....	05
Figura 1.5 - Imagem de Satélite LANDSAT 5, Sensor TM, Composição Colorida RGB 543 de 09/10/2010.....	05
Figura 2.1 - Esboço Geológico-Tectônico da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília.....	11

Figura 2.2 - Coluna Estratigráfica do Grupo Paranoá Definida na Região de Alto Paraíso de Goiás - São João D'aliança, Goiás (Faria 1995), e sua Associação com a Região de Caldas Novas.....	12
Figura 2.3 - Estereograma de Planos de Acamamento So.	15
Figura 2.4 - Distribuição Estatística das Fraturas Medidas em Xistos e em Rochas do Grupo Paranoá na Região de Caldas Novas, de acordo com Campos <i>et al.</i> (2000).....	17
Figura 2.5 - Mapa Geológico da Região de Caldas Novas.....	19
Figura 2.6 - Estrutura Dômica da Serra de Caldas e Principais Características da Região de Caldas Novas.....	20
Figura 2.7 - Nascentes do Rio Quente, entre Fraturas de Rocha e em Piscina da Pousada do Rio Quente.....	22
Figura 2.8 - Modelo Hidrogeológico Conceitual da Região de Caldas Novas.....	23
Figura 2.9 - Precipitação Total, em Três Estações Climáticas na Região de Caldas Novas, Ano de 2008.....	25
Figura 3.1 - Sistema de Barragens de Recarga e Bacias de Inundação.....	30
Figura 3.2 - Sistema de Bacias de Infiltração e Tanques de Recarga.....	31
Figura 3.3 - Recarga em Planície de Inundação com Valas e Canais de Desvio.....	32
Figura 3.4 - Valas de Infiltração, com Uso de Água de Chuva Captada em Telhados.....	32
Figura 3.5 - Trincheiras de Infiltração.....	33
Figura 3.6 - Recarga Direta por Poços de Injeção e Bombeamento, <i>Aquifer Storage and Recovery</i>	35
Figura 3.7 - Poços de Recarga, Sistema Indireto de (Cadamuro 2002, Cadamuro <i>et al.</i> 2002, Cadamuro & Campos (2005).....	39
Figura 3.8 - Sistema de Tubos para Captação de Águas Pluviais, Proposto por Silva (2004), Silva <i>et al.</i> (2004) e Montenegro <i>et al.</i> (2005).....	40
Figura 3.9 - Sistema de Recarga Artificial Proposto por Diniz <i>et al.</i> (2007) e Diniz <i>et al.</i> (2008).....	41
Figura 3.10 - Diversos Poços de Infiltração em Estacionamento (Chagas 2008).....	42
Figura 4.1 - Exemplo de Seção de Resistividade Aparente na Serra de Caldas (Cunha 2007).....	48
Figura 4.2 - Exemplos de Seções de Caminhamentos Elétricos na Região Central de Caldas Novas com Indicação de Prováveis Estruturas Rúpteis (Zonas de Fraturas e Falhas) (Cunha 2007).....	49
Figura 4.3 - Equipamento de Perfilagem Ótica e Início de Filmagem no Poço Tamburi.....	50
Figura 4.4 - Perfilagem Ótica no Poço de Injeção.....	51
Figura 4.5 - Fraturas abertas no Sistema Aquífero Araxá.....	51
Figura 4.6 - Ensaio de Infiltração no Poço Sesi II, com Água Potável Transportada por Caminhão Tanque.....	52
Figura 4.7 - Localização dos Ensaios Hidráulicos.....	53
Figura 4.8 - Ensaio de Infiltração no Poço Tubular Sesi I.....	54
Figura 4.9 - Gráfico do Ensaio de Infiltração no Poço Tubular Sesi I.....	55
Figura 4.10 - Gráfico do Ensaio de Infiltração no Poço Tubular Sesi II, com 7.000 Litros de Água, Rápida Saturação, Boa Recuperação e Manutenção do Nível Recuperado Após o Ensaio.....	56
Figura 4.11 - Ensaio de Infiltração no Poço Paineiras - 11 Horas de Injeção Contínua.....	57
Figura 4.12 - Ensaio de Infiltração no Poço Tamburi Durante 79 horas Contínuas.....	57
Figura 4.13 - Gráfico do Ensaio de Infiltração no Poço Pousada, com 14.000 litros de Água, em 2 Etapas.....	58
Figura 4.14 - Gráfico do Ensaio de Infiltração Poço Paineiras, com 270.800 Litros de Água Injetados Durante 11 Horas, com Detalhe para Gráfico de Interferências em Poços Vizinhos.....	59
Figura 4.15 - Gráfico do Ensaio de Infiltração Poço Tamburi, com 14.000 Litros de Água, em 02 Etapas.....	60
Figura 4.16 - Ensaio de Infiltração com 79 horas de Injeção, no Poço Tamburi, Totalizando 2.452 m ³ de Água Injetada.....	61
Figura 4.17 - Proposta de Bacia Hidrogeológica Termal de Caldas Novas, com Delimitação de Sub-Bacias Hidrogeológicas.....	62
Figura 4.18 - Fotografia Aérea com Principais Lineamentos Estruturais, Evidenciando Direção Preferencial NE/E-W. (Fotografia USAF 1964).....	63
Figura 4.19 - Mapa do Perímetro Urbano da Cidade de Caldas Novas, Região Central, com Delimitação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão de Caldas, no Interior da Sub-Bacia Hidrogeológica Caldas Novas.....	64
Figura 4.20 - Piscina Termal e Caixa de Descarte de Águas Termais no Clube CTC.....	67
Figura 4.21 - Saída de Água na Parte Superior da Piscina Termal, com Descarte Constante Devido ao resfriamento da Piscina, e Lançamento Direto no Ribeirão de Caldas.....	67
Figura 4.22 - Concentração de NH ₄ (em mg/l Nitrogênio) nas Águas de Descarte das Piscinas Termais.....	69
Figura 4.23 - Concentração de Nitrato (em mg/l NO ₃) nas Águas de Descarte das Piscinas Termais.....	70
Figura 4.24 - Temperatura Média °C nas Águas de Descarte das Piscinas Termais.....	71
Figura 4.25 - Valores Médios de pH em Diversas Piscinas Termais.....	72
Figura 4.26 - Valores de Coliformes Totais, NMP/100 ml, nas Águas de Descarte das Piscinas Termais.....	73
Figura 4.27 - Equipamentos Hach Utilizados para Análise das Águas; e Piscinas Termais da Pousada do Ipê.....	74
Figura 4.28 - Concentrações de Nitrato (mg/l de NO ₃), nas Piscinas Termais da Pousada do Ipê.....	75
Figura 4.29 - Concentrações de NH ₄ (mg/l de N), nas Piscinas Termais da Pousada do Ipê.....	76
Figura 4.30 - Temperatura Média nas Piscinas Termais da Pousada do Ipê.....	76

Figura 4.31 - Diagrama $d^{18}O$ versus $d^{13}C$ em Poços Termiais do Sistema Aquífero Araxá.....	79
Figura 4.32 - Diagrama $d^{18}O$ versus dD em Poços Termiais do Sistema Aquífero Araxá.....	79
Figura 4.33 - Zeólitas com Granulometria 0,4-1,0 cm e < 1,0 mm.....	84
Figura 4.34 - Modelos de Filtros Experimentais, com 1,5 e 3,0 Metros, Preenchidos com Zeólitas.....	85
Figura 4.35 - Concentrações de NH_4 (mg/l de N), na entrada e saída dos filtros experimentais de Zeólitas.....	85
Figura 4.36 - Estação de tratamento simplificada - ETS, e Zeólita utilizada dentre os meios filtrantes.....	86
Figura 4.37 - Concentrações de NH_4 (mg/l de N), na entrada e saída da Estação de Tratamento Simplificada - ETS, monitoramento jun-nov/2010.....	86
Figura 5.1 - Sistema Piloto de Recarga Artificial. Poços rasos preenchidos com material granular. Estação experimental 1 -Amat.....	89
Figura 5.2 - Ensaio de infiltração nos poços de recarga do Clube Bica Pau, variações nos níveis de água dos poços 1 e 2, e piezômetro.....	90
Figura 5.3 - Recuperação dos níveis d'água no poço de recarga 1 e piezômetro, após ensaio de injeção.....	91
Figura 5.4 - Variação dos níveis d'água no piezômetro da estação experimental 1, em período sem injeção de água (jul-set/2008).....	91
Figura 5.5 - Estação de Infiltração Experimental AMAT 2. Poço de recarga construído em Cambissolos.....	92
Figura 5.6 - Piscinas Termiais utilizadas para captação de águas, e tubulações que as conduzem ao reservatório da Pousada do Ipê.....	94
Figura 5.7 - Lançamento de efluentes das piscinas termiais diretamente no Ribeirão Caldas; e tubulações que direcionam os efluentes para estação de tratamento simplificada – ETS.....	94
Figura 5.8 - Vista frontal da ETS. A esquerda entrada da caixa de aeração e caixa de bombeamento; e sistema de filtros integrados e aerador final (a direita).....	95
Figura 5.9 - Sistemas de aeração com bicos de injeção de ar, e queda d'água, entre a caixa de aeração e a caixa de bombeamento.....	96
Figura 5.10 - Estação de Tratamento Simplificado - ETS, com filtro ultravioleta em detalhe.....	97
Figura 5.11 - Saída de água da ETS, com poço de recarga ao lado; e parte interna do filtro integrado.....	98
Figura 5.12 - Planta de Espacialização do Sistema de Recarga Artificial Piloto, com captação e condução para Estação de Tratamento Simplificada - ETS.....	99
Figura 5.13 - Planta baixa, detalhe da estação de tratamento simplificada – ETS.....	100
Figura 5.14 -Resultados analíticos para Coliformes Termotolerantes na ETS (jun-dez/2010).....	102
Figura 5.15 - Resultados analíticos para Nitrato na ETS (jun-dez/2010).....	103
Figura 5.16 - Resultados analíticos para N Amoniacal na ETS (jun-dez/2010).....	103
Figura 5.17 - Estação de tratamento simplificada, durante realização de ensaio com Ozônio.....	104
Figura 5.18 - Resultados analíticos, com uso de Ozônio, para Nitrato na ETS (set-nov/2010).....	104
Figura 5.19 - Resultados analíticos, com uso de Ozônio, para Amônia na ETS (set-nov/2010).....	105
Figura 5.20 - Resultados analíticos, com uso de Ozônio, para Coliformes Termotolerantes na ETS (set-nov/2010).....	105
Figura 6.1 - Ilustração Esquemática de variações de temperatura e trocas de calor potencial entre os diferentes reservatórios/Aquíferos.....	112
Figura 6.2 - Mapa de lineamentos da região central da cidade de Caldas Novas. Notar a tendência preferencial de ocorrência de estruturas NS e N40E - N60E.....	114
Figura 6.3 - Poço de Injeção e proposta de monitoramento da Recarga Artificial no poço de recarga Tamburi, na Pousada do Ipê.....	116
Figura 6.4 - Proposta de instalação de poços de recarga no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas.....	118
Figura 6.5 - Proposta de instalação de poços de injeção no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas.....	121
Figura 6.6 - Mapa potenciométrico no interior da sub-bacia Caldas Novas.....	122
Figura 6.7 - Mapa de isotermas no interior da sub-bacia Caldas Novas.....	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Síntese dos eventos e fases de deformação observadas na região do Domo de Caldas Novas.....	14
Tabela 4.1 - Dados hidráulicos de poços termiais.....	62
Tabela 4.2 - Resultados físico-químicos e isotópicos de águas de Poços Termiais.....	75
Tabela 5.1 - Resultados analíticos período jun-dez/2010 (valores na entrada da ETS).....	97
Tabela 5.2 - Resultados analíticos período jun-dez/2010, saída ETS.....	98
Tabela 6.1 - Síntese dos parâmetros aplicados ao cálculo das reservas hídricas na região de Caldas Novas.....	106

RESUMO

A região de Caldas Novas, no estado de Goiás, abriga uma das maiores reservas hidrotermais do planeta não associada a magmatismo. Desde o início dos anos 80 o crescimento populacional e o elevado número de turistas desencadearam um consumo excessivo dos recursos hídricos subterrâneos, o que resultou em rebaixamento de 50 metros dos níveis piezométricos. As águas termais são extraídas principalmente por meio de poços tubulares profundos, com exploração dos Sistemas Aquíferos Paranoá e Araxá. A origem das águas termais é associada a regimes de fluxo intermediário e a um arranjo de fraturas que atingem profundidades maiores que 1.000 metros. Os poços termais possuem vazões que alcançam 63 m³/h e temperaturas superiores a 59°C. O rebaixamento dos níveis de água dos aquíferos é atribuído não apenas ao elevado bombeamento, mas também à ocupação e impermeabilização do solo na região, a qual limita a recarga natural dos sistemas aquíferos.

O presente estudo propõe metodologia para instalação de projeto piloto de recarga artificial e avalia a viabilidade de aplicação de mecanismos de recarga artificial da porção termal do Sistema Aquífero Araxá, com uso de águas previamente utilizadas na circulação em piscinas termais. Foram realizadas perfilagens óticas e ensaios hidráulicos nos poços termais, além de ensaios hidroquímicos e isotópicos. Estes dados, integrados com estudos anteriores de geofísica, geologia estrutural, e de solos, subsidiaram a instalação dos projetos pilotos de recarga artificial realizados em caixas de recarga, no aquífero freático, e em poço de injeção, no aquífero Araxá.

As reservas permanentes dos Sistemas Aquíferos Paranoá e Araxá foram estimadas em 1,8 x 10⁸ m³ e 4,5 x 10⁷ m³, respectivamente, e as reservas renováveis estimadas em 2,25 x 10⁶ m³/ano, para o Araxá, e 9,0 x 10⁶ m³/ano, no Paranoá. As atuais vazões outorgadas pelo DNPM nestes aquíferos totalizam 9,2 x 10⁶ m³/ano, que corresponde a uma vazão maior que as reservas renováveis do Sistema Aquífero Araxá.

A avaliação de volumes de misturas, entre diferentes volumes injetados de águas de recarga artificial e águas de reserva permanente, em cenários distintos de injeção, mostrou que os mecanismos de recarga artificial não devem alterar a temperatura das águas dos aquíferos. Como não é possível modelar o raio de influência de cada poço de injeção, devido às anisotropias/heterogeneidades dos sistemas aquíferos, a análise da provável diminuição da temperatura da água deverá ser feita a partir do monitoramento contínuo dos poços de injeção e poços adjacentes.

A viabilidade qualitativa da recarga artificial é obtida com tratamento das águas de descarte das piscinas através de estação de tratamento, com filtragem integrada utilizando gradeamento, aeração, filtro de areia, zeólitas, carvão ativado e ultravioleta. As águas de descarte das piscinas termais possuem boa qualidade, e o monitoramento realizado apresentou baixo incremento, em relação aos valores naturais, dos seguintes compostos antropogênicos: NH₄ entre 0,1 e 0,8 mg/l N, NO₃ entre 0,1 e 1,5 mg/l e coliformes totais entre 0 e 5000 NMP/100 ml. A temperatura das águas de descarte oscilou entre 24 e 39°C e o pH entre 6,4 e 8,1.

Os estudos desenvolvidos demonstraram viabilidade térmica, qualitativa e quantitativa para a recarga artificial proposta. As conclusões do trabalho mostram a efetividade da instalação de mecanismos de recarga artificial através de caixas de recarga e poços de injeção. Estes mecanismos são poderosos instrumentos de gestão e fundamentais para a manutenção do potencial termal existente na região de Caldas Novas.

Palavras-Chave: Recarga Artificial, Aquífero Termal, Caldas Novas.

ABSTRACT

The Caldas Novas region, state of Goiás, Brazil, presents one of the major hydrothermal reserves of the planet, not associated to magmatism. Since the beginning of the 1980's the expansion of the population and the increasing number of tourists had resulted in an extreme consumption of groundwater, what produced about 50 meters drawdown in water levels. The thermal waters are extracted mainly by deep wells, from the exploitation of the Paranoá and Araxá Aquifer Systems. The origin of thermal waters is associated to intermediate and regional hydrogeologic flow systems and to fracturing / faulting up to 1,000 meters depths. The thermal wells show yields up to 63 cubic meters per hour and maximum temperature of 59°C. The water levels drawdown is attributed to the increasing of pumping and also to the occupation and surface sealing of the region, which limit the natural recharge of the aquifer systems.

The present study considers the methodology for the installation of an artificial recharge pilot-plant and evaluates the viability to the application of these mechanisms to the thermal portion of the Araxá Aquifer System. It is purposed the use of water previously used in circulation in thermal swimming pools. Optical profiles and hydraulic assays had been carried out in the thermal wells, besides hydrochemical and isotopic studies. These data, integrated with previous geophysical, structural and hydrogeology studies, had supported the installation of pilot-projects for artificial recharge. To the recharge of the shallow aquifer it was used pebble filled dig wells and to the fractured Araxá Aquifer System it was applied an injection well scheme.

The permanent groundwater reserves of the Paranoá and Araxá aquifers systems had been estimated, respectively, as $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $4,5 \times 10^7 \text{ m}^3$, and the recharge reserves estimated as $2,25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, for the Araxá System, and $9,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, for the Paranoá System. The current outflows permits by DNPM (The Brazilian mineral bureau) in these aquifers totalize $9,2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, which corresponds to a higher yield than the recharge reserve for the Araxá Aquifer.

The evaluation of mixtures volumes, between different injected water volumes of artificial recharge and permanent reserve water, in distinct injection scenario showed that the mechanisms of artificial recharge should not modify the temperature of the groundwater. Since it is not possible to build a model of the distance of influence of each injection well, due to the aquifers anisotropies and heterogeneities, the analysis of the possibility of water temperature reduction will have to be made by the continuous monitoring of injection and adjacent wells.

The qualitative viability of the artificial recharge is reached by treatment of swimming pools discarding waters in a treatment station, with integrated filtering using aeration, sandy/zeolite/activated coal filter and ultraviolet light. The waters discarded from the swimming pools show good quality, and the monitoring shows that there is low increment, in relation to the natural values, of the following anthropogenic compounds: NH_4 from 0,1 up to 0,8 mg/l, NO_3 from 0,1 to 1,5 mg/l and total bacterial traces from zero to 5,000 MPN/100 ml. The temperature of discarding waters oscillated from 24 to 39°C and pH from 6.4 to 8.1.

The developed studies had demonstrated thermal, qualitative, and quantitative viability for the purposed artificial recharge system. The conclusions of the work indicate the effectiveness of the installation of artificial recharge mechanisms through dig wells and recharge injection wells. These mechanisms are powerful instruments of management and important for the maintenance of the thermal potential in the Caldas Novas region.

Keywords: Artificial Recharge, Thermal Aquifer, Caldas Novas.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A água é o recurso natural mais importante para a vida. Este recurso é renovável através de relações entre a atmosfera, biosfera, hidrosfera e litosfera, contudo é modificado intensamente pela ação antrópica. A capacidade de renovação das águas no ciclo hidrológico e sua consequente autopurificação está cada vez mais comprometida pela ocupação do solo e pelo uso indiscriminado dos recursos naturais.

Do total de água no planeta apenas 2,7% é doce e desconsiderando as calotas polares e geleiras 98% do volume de água doce disponível estão armazenados nos aquíferos (Fetter 1994). Em condições naturais de ocupação, com baixa impermeabilização da superfície, 5 a 50% das águas de precipitação pluvial infiltram nas zonas de recarga e alimentam os reservatórios subterrâneos de água doce. No entanto, o desequilíbrio ocasionado pela ocupação desordenada do solo, com impermeabilização de grandes áreas, aliado ao uso não controlado dos recursos naturais, comprometem consideravelmente a capacidade de infiltração do solo, contribuindo para a degradação da qualidade e diminuição da quantidade de reservas subterrâneas e aumento do escoamento das águas pluviais.

Este comprometimento das áreas de recarga é o grande responsável pelos eventos catastróficos que assolam o território brasileiro com frequência cada vez maior, como as enchentes urbanas, deslizamentos de encostas e o rompimento de diques em grandes barramentos.

Como as áreas de grandes cidades já se encontram em grande parte impermeabilizadas, com grande comprometimento das taxas naturais de recarga e consequente incremento do escoamento superficial, os mecanismos de recarga artificial de aquíferos tornam-se fundamentais para aumentar a capacidade de retenção das águas de precipitação, minimizando e compensando os efeitos do desequilíbrio do ciclo hidrológico.

Em regiões com histórico de exploração contínua dos recursos hídricos subterrâneos, com crescente aumento populacional, demandando quantidades cada vez maiores de água, o cenário é ainda mais problemático e a adoção de medidas que visem à preservação e uso sustentável dos recursos naturais é fundamental.

1.2 JUSTIFICATIVA / HISTÓRICO DO PROBLEMA

Os primeiros registros históricos sobre a ocupação da região de Caldas Novas datam de 1722 e são atribuídos ao bandeirante Bartolomeu Bueno da Silva. Em 1788 o também bandeirante Martin Coelho de Siqueira inicia a extração de ouro na região e dá início ao processo de ocupação territorial. O pesquisador francês Auguste de Saint-Hilaire chega à região em 1818, encontra diversas fontes de águas termais e as registra em seus livros. Atribui-se ao pesquisador o primeiro registro de águas termais da região do Planalto Central. Em 1920 o médico Orozimbo Correia Neto atribuiu benefícios medicinais às águas termais de Caldas Novas, contribuindo para início do aporte de turistas e ocupação territorial.

Em 1980 o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, preocupado com a sustentabilidade do recurso natural, inicia o monitoramento dos níveis de água, temperatura e vazões do aquífero termal de Caldas Novas.

A região de Caldas Novas, que compreende os municípios de Caldas Novas e Rio Quente, localiza-se na região central do Brasil, no sudeste do estado de Goiás, distante 170 km de Goiânia e 350 km de Brasília (Figura 1.1).

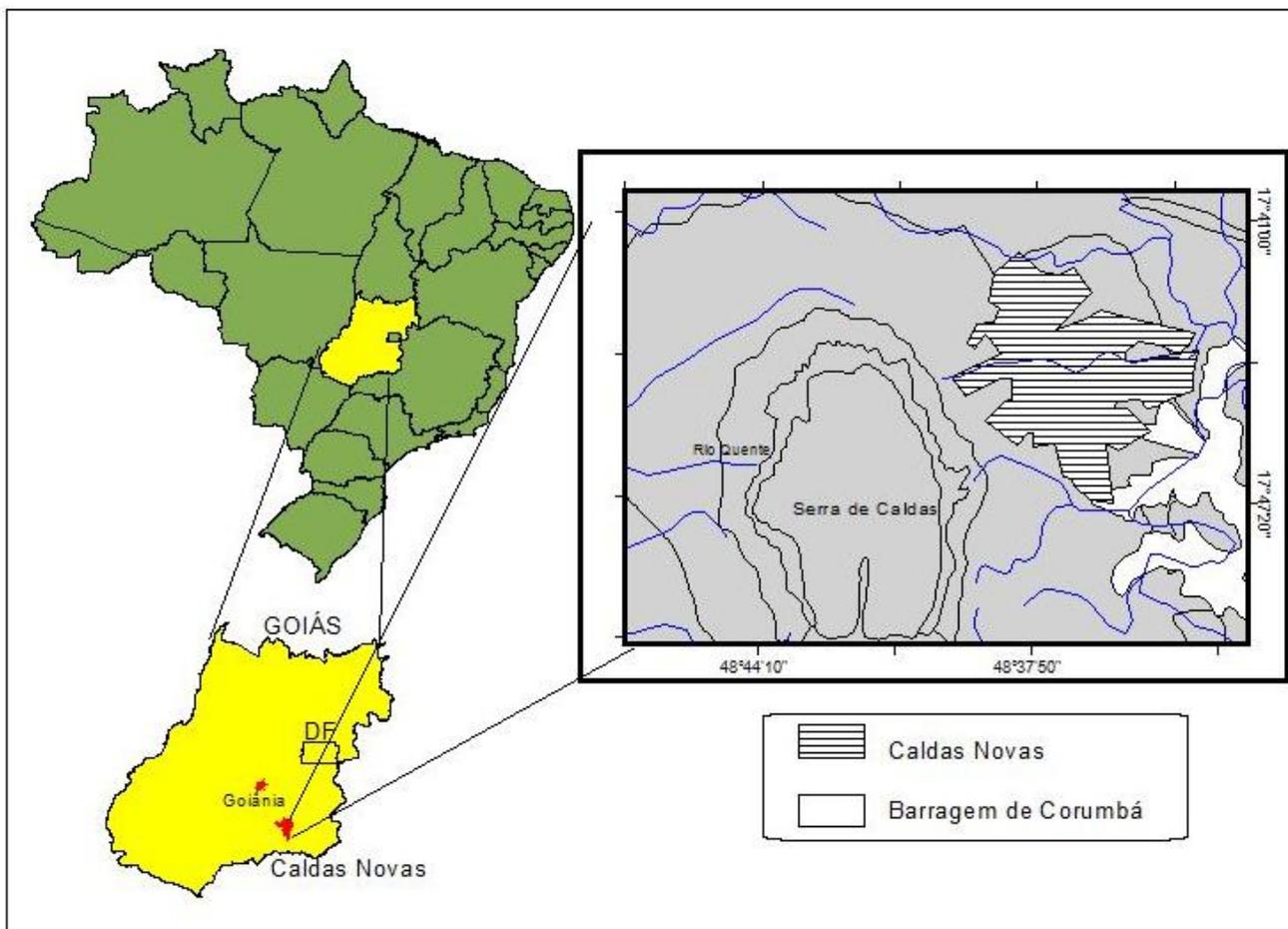


Figura 1.1 - Mapa de localização da região de Caldas Novas.

Amplamente visitada por turistas do mundo inteiro, a região possui uma das maiores reservas hidrotermais do planeta, não associada a magmatismo. Com uma população residente de aproximadamente 70.000 habitantes e população móvel atingindo 200.000 (SEPLAN 2010), a região de Caldas Novas apresenta grande expectativa de crescimento, e ao longo dos anos sofre com a sobrexploração de seu principal recurso natural.

As águas termais são extraídas principalmente através de poços tubulares profundos que apresentam vazões médias de 20 m³/h, podendo alcançar 63 m³/h. Em 2010 existiam 141 poços tubulares termais outorgados (DNPM 2011), com 89 poços em operação, que apresentavam profundidade entre 200 e 1000 metros, com média de 350 metros. A temperatura das águas termais varia entre 35°C e 49°C, oriunda do gradiente geotérmico do Sistema Aquífero Araxá, e entre 43°C e 59°C, no Sistema Aquífero Paranoá.

Entre o início dos anos 80 e meados dos anos 90 o crescimento populacional e o elevado número de turistas desencadearam um consumo exagerado dos recursos hídricos subterrâneos, com exploração permanente das águas e consequente rebaixamento dos níveis potenciométricos dos aquíferos que abastecem a região. Segundo Peixoto Filho (2000) no final da década de 90 haviam 411 poços cadastrados, e apenas 141 estavam regularizados, ou em processo de regularização, junto ao DNPM. O auge do rebaixamento ocorreu no ano de 1996 (Figura 1.2).

Em 1997, o DNPM disciplinou o uso das águas termais através da Portaria nº 54/97, posteriormente substituída pela Portaria nº 52/99, que suspendia por dois anos a outorga de novos Alvarás de Pesquisa e, conseqüentemente, a perfuração de novos poços tubulares profundos, destinados ao aproveitamento de água mineral e/ou termal do Aquífero de Caldas Novas e Rio Quente. Outras medidas reguladoras, como a instalação de hidrômetros nos poços tubulares profundos e a medição mensal dos níveis piezométricos, ajudaram a conscientizar os usuários sobre a necessidade de uma gestão sustentável das águas termais. Estas medidas estendem-se até os dias atuais, e são mantidas por sucessivas publicações do DNPM, sendo a última, a Portaria nº 42/2010, publicada em 09/02/2010, com validade de três anos.

Passados 14 anos percebeu-se uma curva ascendente dos níveis potenciométricos, no entanto, a exploração ainda é elevada e variações são constantes, inclusive com tendência de rebaixamento nos 4 últimos anos (Figura 1.3). A tendência de rebaixamento pode ser observada tanto no Sistema Aquífero Paranoá como no Sistema Aquífero Araxá.

Andrade & Almeida (2011) descrevem um rebaixamento de 20 metros entre os meses de janeiro de 2007 e fevereiro de 2011. Segundo os autores este rebaixamento pode estar associado à concessão temporária para exploração de água pela empresa de abastecimento público municipal - DMAE, que atualmente faz captação de 150 m³/h, durante 24 horas/dia.

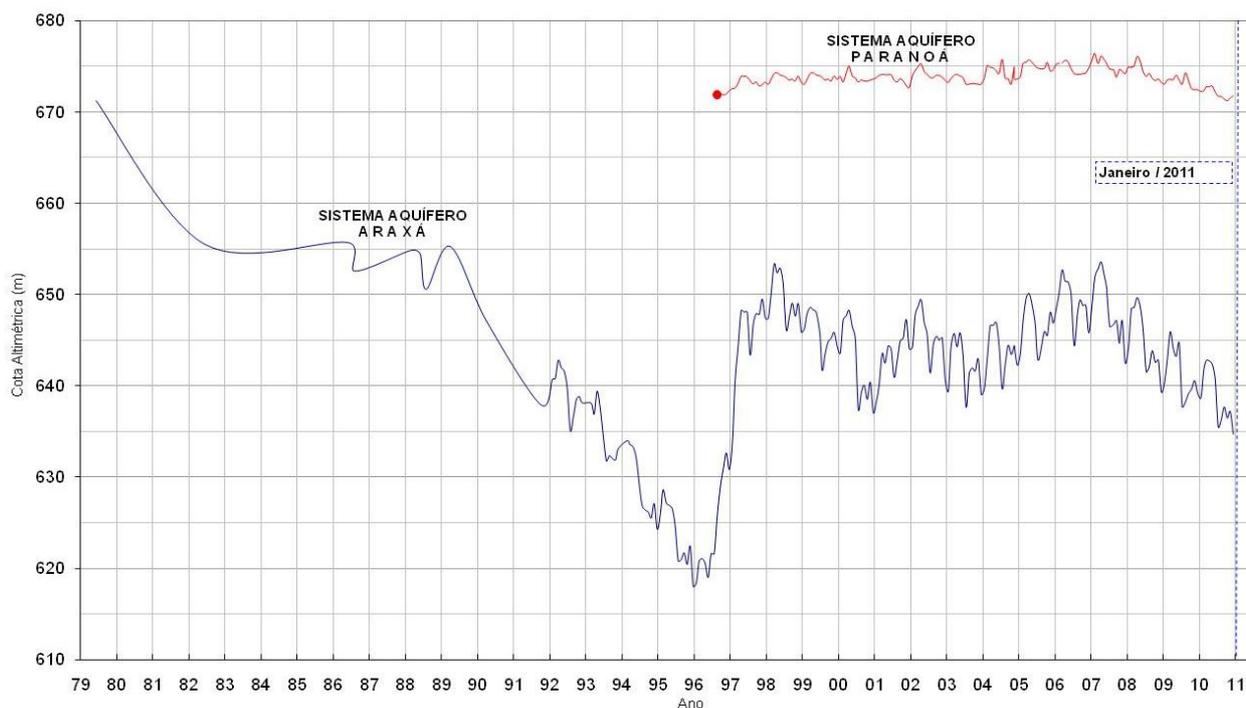


Figura 1.2 - Variação das cotas médias do Sistema Aquífero Araxá e superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Paranoá (1979 a 2011). Dados de monitoramento cedidos pelo DNPM e AMAT.

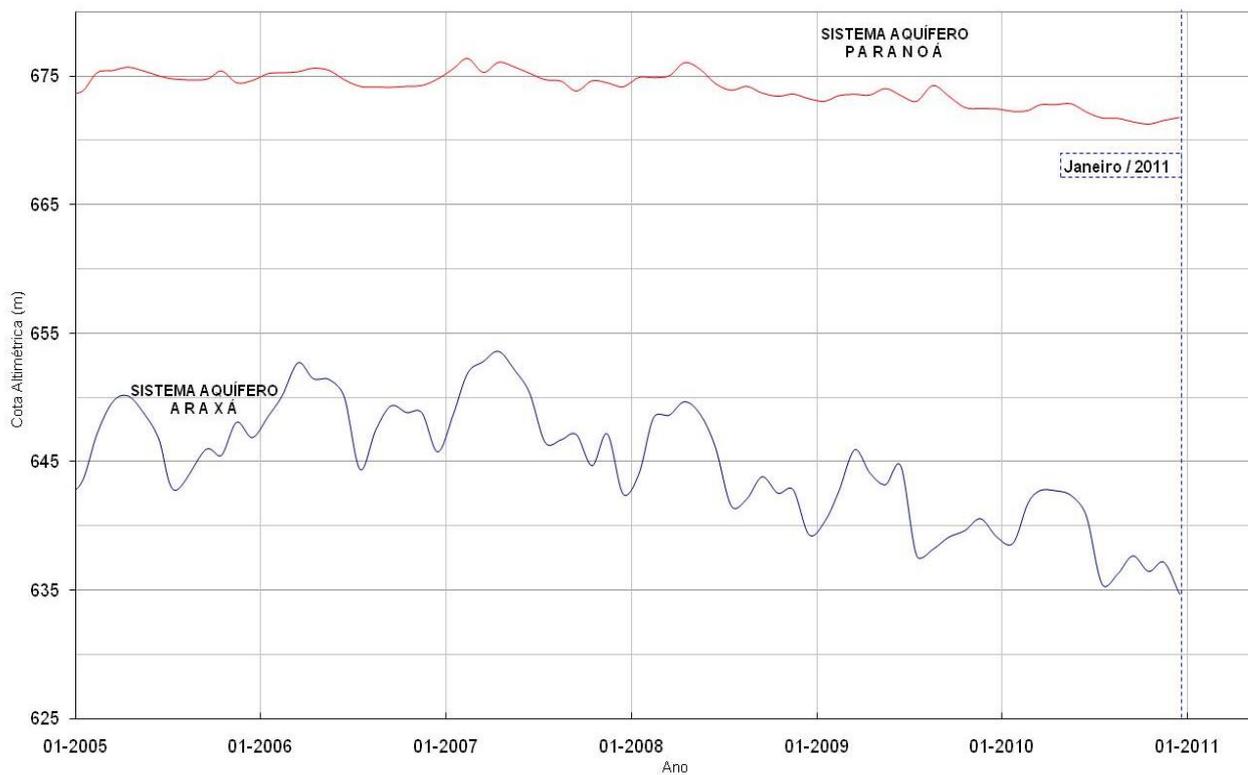


Figura 1.3 - Variação das cotas médias do Sistema Aquífero Araxá e superfície potenciométrica do Sistema Aquífero Paranoá (2005 a 2011). Dados de monitoramento cedidos pelo DNPM e AMAT.

O quadro de declínio dos níveis potenciométricos dos aquíferos deve ser atribuído não apenas ao bombeamento excessivo, mas também à ocupação e impermeabilização do solo na região da cidade de Caldas Novas, a qual limita a recarga natural do Sistema Aquífero Araxá a partir dos Latossolos que recobrem os aquíferos termais.

As Figuras 1.4 e 1.5 mostram três imagens que evidenciam o aumento da malha urbana e comparam a ocupação nos anos de 1964, 2002 e 2010. Este quadro se apresenta mais crítico com a ocupação dos últimos oito anos, com a pavimentação de bairros e aumento da densidade da ocupação. A Serra de Caldas, muito importante para a recarga natural, mantém sua capacidade de recarga e está inserida dentro de uma unidade de conservação (Parque Estadual da Serra de Caldas Novas - PESCAN).

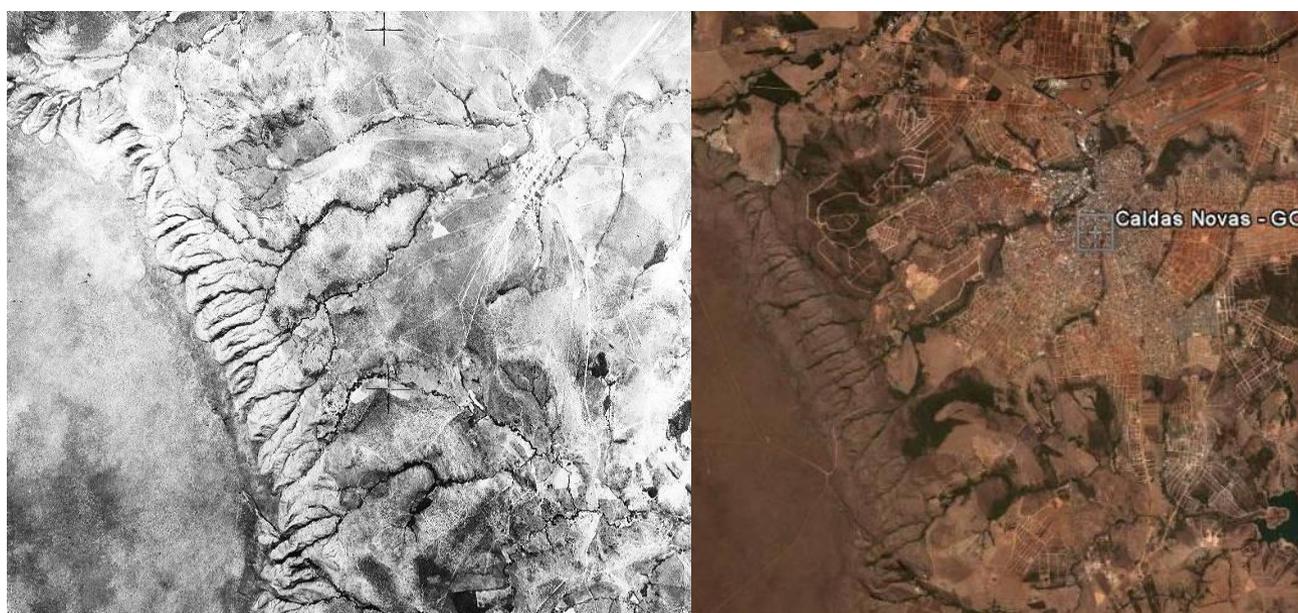


Figura 1.4 - Fotografia aérea do ano de 1964 (USAF), e imagem de satélite (Google Earth) do ano de 2003 que mostram o aumento da área urbana da cidade de Caldas Novas.



Figura 1.5 - Imagem de satélite LANDSAT 5, sensor TM, composição colorida RGB 543 de 09/10/2010.

Quase a totalidade do recurso hídrico utilizado pelo setor hoteleiro da região é oriunda de poços tubulares profundos, que abastece diversos empreendimentos turísticos, com águas termais armazenadas em piscinas e posteriormente lançadas em drenagens próximas, contribuindo para o desequilíbrio água superficial *versus* água subterrânea.

A substituição destes lançamentos diretamente aos cursos superficiais pelo redirecionamento de águas das piscinas novamente para os sistemas aquíferos, tanto para os aquíferos freáticos, quanto para os aquíferos profundos, é uma medida mitigadora do desequilíbrio no ciclo hidrológico. As águas que circulam pelas piscinas podem retornar ao sistema aquífero através de técnicas de recarga artificial de aquíferos. A recarga artificial trará, no mínimo, quatro benefícios ambientais significativos:

- Aumento da disponibilidade de água subterrânea, com minimização do impacto gerado pela superexploração do aquífero;
- Compensação da diminuição da recarga do aquífero Araxá em função da urbanização da cidade de Caldas Novas;
- Diminuição do lançamento das águas de circulação em piscinas diretamente nos cursos superficiais;
- Ampliação da recarga de águas de mistura do aquífero Paranoá termal que, de forma natural, apenas é abastecido pelas áreas do platô da Serra de Caldas.

As variações significativas nos níveis de água dos sistemas aquíferos ao longo dos anos e a tendência de rebaixamento destes níveis evidenciam a necessidade da aplicação de medidas que visem a sustentabilidade das águas termais, com monitoramento cada vez mais eficaz.

Estudos que visem a manutenção do potencial natural da região, como a aplicabilidade de técnicas de recarga artificial de aquíferos, para a sustentabilidade das águas termais, são poderosos instrumentos de gestão e fundamentais para a manutenção do potencial natural existente.

Os trabalhos de Tröger *et al.* (1999), Campos *et al.* (2000), Haesbaert & Costa (2000), Cadamuro *et al.* (2000), Peixoto Filho (2000), Tröger *et al.* (2003, 2004) e Campos *et al.* (2009), descrevem o potencial termal da região e seus aspectos hidrogeológicos e contribuíram para o conhecimento local e incremento de uma gestão sistêmica objetivando a sustentabilidade do potencial termal da região. Alguns destes trabalhos sugerem a implantação de mecanismos de recarga artificial de aquíferos na região de Caldas Novas.

A Associação dos Mineradores de Águas Termais do Estado de Goiás - AMAT/GO financiou um projeto intitulado “Projeto de proteção das águas termais da região de Caldas Novas e Rio Quente”. Os estudos visaram subsidiar a gestão dos recursos hídricos termais da região e a

ampliação do conhecimento e proteção destes recursos. Este projeto financiou, em parte, o desenvolvimento da presente Tese de Doutorado.

A hipótese de trabalho a ser testada a partir do desenvolvimento da presente tese deve responder, em seus mais diversos aspectos, à seguinte questão: “A RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS PROFUNDOS PODE SER UMA FERRAMENTA EFETIVA E VIÁVEL PARA O GERENCIAMENTO DAS ÁGUAS TERMAIS DA REGIÃO DE CALDAS NOVAS/GO?”

Uma compilação de dados históricos sobre a região, cedidos pela AMAT, e todas as publicações técnicas disponíveis irão integrar a presente tese, que tem os principais objetivos a seguir enumerados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar, propor metodologia, instalar projeto piloto de recarga e avaliar a viabilidade de aplicação de recarga artificial da porção termal do Sistema Aquífero Araxá, com uso de águas previamente utilizadas na circulação em piscinas de clubes, *resorts* e demais empreendimentos situados na cidade de Caldas Novas, estado de Goiás.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Ampliar o conhecimento acerca da geologia e do funcionamento hidrogeológico da região;
- ✓ Promover a estabilização do nível potenciométrico dos sistemas aquíferos termais da região;
- ✓ Diminuir a quantidade de lançamentos de águas de descarte das piscinas, contribuindo com a diminuição de possíveis eventos críticos de cheia;
- ✓ Propor e aplicar modelos de tratamentos de águas de piscinas, com diferentes tipos de filtros para remoção de amônia, nitrato e coliformes;
- ✓ Avaliar os teores naturais de nitrato em águas termais do Sistema Aquífero Araxá;
- ✓ Avaliar as reservas hídricas subterrâneas e as consequências do resultado de misturas de águas do reservatório natural com as águas de recarga artificial;
- ✓ Avaliar os resultados da recarga nos aquíferos freáticos e nos profundos, principalmente do ponto de vista de ampliação da disponibilidade e variabilidade da temperatura;
- ✓ Desenvolver projeto de educação ambiental, tendo como foco os moradores, empresários e turistas da região de Caldas Novas.

Os objetivos específicos visam maximizar o volume de informações científicas sobre o sistema termal com a análise detalhada do acervo de dados existentes e de todas as informações

geradas durante o período de desenvolvimento da tese, com incremento do conhecimento geológico e hidrogeológico local.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os principais métodos, técnicas e materiais aplicados ao desenvolvimento do trabalho são apresentados a seguir:

- ✓ **Pesquisa bibliográfica** - principalmente sobre recarga artificial de aquíferos e tratamento de efluentes. Levantamento e interpretação de dados disponíveis com posterior integração de todos os dados;
- ✓ **Perfilagem ótica em poços tubulares profundos** - foram realizadas perfilagens óticas em quatro poços termais do Sistema Aquífero Araxá, com profundidades que alcançaram 313 metros;
- ✓ **Ensaio hidráulico em poços tubulares profundos** - foram realizados dois tipos de ensaios: de curta duração com uso de água fornecida por caminhões pipa, com 7000 litros de água e ensaios prolongados com injeção de água bombeada de poços adjacentes, no mínimo com 12 horas ininterruptas. Poços tubulares próximos foram monitorados para avaliação de interferência;
- ✓ **Análises hidroquímicas *in situ* e coleta de amostras de águas de piscinas** - foram amostradas águas de diversas piscinas de clubes e condomínios da cidade de Caldas Novas. As amostras foram analisadas *in situ* e também enviadas para laboratórios de análises químicas. Ênfase foi dada aos compostos nitrogenados (nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito), coliformes fecais e totais, cloretos, pH, temperatura, entre outros compostos. Foram amostradas águas em períodos de máxima e mínima frequência de turistas (principalmente em feriados prolongados), de hora em hora, para avaliação completa dos parâmetros e variação temporal. As substâncias nitrogenadas foram amostradas com maior regularidade;
- ✓ **Instalação dos projetos-pilotos** - foram realizados projetos pilotos para recarga artificial, tanto em aquíferos rasos, como em aquíferos profundos. Os mecanismos de recarga direta, em poços rasos, foram implantados em poços de recarga na zona não-saturada, em profundidades variáveis (6-10 metros) e com preenchimento de material granular (areia e cascalho). A recarga em profundidade é realizada em poços tubulares profundos, com injeção de água diretamente no poço, após tratamento. Os poços foram selecionados através de critérios técnicos, após os ensaios hidráulicos e hidroquímicos;

-
- ✓ **Tratamento de dados de ensaios de bombeamento e ensaios de injeção** - periodicamente o DNPM realiza ensaios de bombeamento em poços tubulares profundos na região, dentro do programa de monitoramento do aquífero termal. Os dados disponibilizados pelo DNPM e os dados gerados nos ensaios de infiltração foram tratados utilizando o programa *Aquifer Test Pro*, da *Waterloo Hydrogeologic*, versão 4.0;
 - ✓ **Avaliação teórico/experimental dos mecanismos de retenção de amônia contida nas águas das piscinas, através de filtros com zeólita** - O dimensionamento do projeto piloto levou em consideração algumas características das águas como os teores de amônia, vazão, pH e temperatura. A quantidade de zeólita utilizada nos filtros de retenção varia de acordo com as características acima mencionadas. Foram testadas colunas *in situ* e colunas em laboratórios com uso de zeólita para eliminação/depuração de amônia. As colunas *in situ* foram confeccionadas em tubos de polietileno (PVC), preenchidos com zeólitas de diferentes granulometrias. O tempo de residência das águas, em contato com as zeólitas, foi testado ao longo do experimento e o local de coleta foi previamente selecionado em razão de elevados teores de Amônia. Em laboratório foram testadas colunas com variação dos seguintes parâmetros: pH, temperatura, concentração de amônia, vazão e tempo de residência;
 - ✓ **Acompanhamento do monitoramento realizado pelo DNPM** - algumas medições mensais de nível, temperatura e vazão, realizadas pelo DNPM, com o apoio da AMAT, foram acompanhadas. Este acompanhamento foi realizado em períodos aleatórios, quando a atividade coincidia com alguma etapa de campo da tese;
 - ✓ **Estudo de viabilidade de ampliação dos sistemas de recarga artificial para diversos clubes e hotéis da cidade** - a partir de uma análise de conjuntura do setor hoteleiro, foi proposta a implantação dos mecanismos de recarga artificial nos modelos do projeto piloto que será apresentado aos empresários do setor. A viabilidade técnica e econômica do projeto será apresentada aos moradores, empresários, turistas e órgãos oficiais da região, após a aprovação da banca examinadora da tese;
 - ✓ **Propostas de gestão dos sistemas hídricos** - distribuição de *folders* e cartilhas explicativas aos moradores e turistas; painéis e outdoor publicitário, com informações gerais sobre os mecanismos de circulação hídrica e a necessidade de gestão sustentável das águas termais.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

2.1. GEOLOGIA

A região de Caldas Novas está inserida na zona interna da Faixa de Dobramentos Brasília, que constitui um extenso sistema de dobramentos neoproterozóicos, na porção oriental da Província Estrutural Tocantins (Fuck 1994). A Figura 2.1 mostra o esboço regional da Faixa de Dobramentos Brasília, com destaque para a região em estudo. A Serra de Caldas é considerada uma janela estrutural em que o Grupo Paranoá é exposto em função da erosão diferencial. Neste caso unidades de idade Meso/Neoproterozóicas são sobrepostas por rochas Neoproterozóicas a partir de falha de empurrão em um contexto de tectônica pelicular (Dardenne 2000).

Drake Jr. (1980) descreveu uma janela estrutural associada aos grupos Bambuí e Araxá, e foi responsável pela primeira publicação que versava sobre uma origem não vulcânica para as águas termais da região de Caldas Novas. Campos *et al.* (2009) descrevem que o substrato rochoso da região é caracterizado pela superposição tectônica do Grupo Paranoá pelo Grupo Araxá, além de ocorrências subordinadas de conglomerados correlatos à Formação Abaeté, do Grupo Areado, de idade Eocretácea.

2.1.1 GRUPO PARANOÁ

O Grupo Paranoá corresponde a uma sequência psamo-pelito-carbonatada que se estende, continuamente, desde o Distrito Federal até o extremo norte do Estado de Goiás, com exposições isoladas na região de Caldas Novas. Braun (1968) associou esta sucessão de metassedimentos de baixo grau metamórfico à base do Grupo Bambuí, considerando-a como uma formação daquele grupo. Dardenne (1978ab e 1979) classifica estes metassedimentos como Grupo Paranoá e os retiram da base do Grupo Bambuí. Faria (1995) propôs a coluna estratigráfica do Grupo Paranoá com 11 unidades de natureza psamo-pelito-carbonatada (Figura 2.2), com área tipo na região da Chapada dos Veadeiros, no norte do estado de Goiás.

Na região de Caldas Novas, Campos *et al.* (2009) subdividiram o Grupo Paranoá em quatro unidades litoestratigráficas, definidas, da base para o topo, de Ortoquartzito, Quartzito Argiloso, Metarritmito e Pelito-Carbonatada. Esta estratigrafia é correlacionada à porção topo da coluna proposta por Faria (1995) e representa provável variação lateral das unidades Quartzito Médio Q₃, Metarritmito Argiloso R₄ e Psamo-Pelito-Carbonatado PCC.

As rochas do Grupo Paranoá afloram nas bordas da Serra de Caldas e são responsáveis pela estruturação do relevo elevado da região de Caldas Novas.

A Unidade Ortoquartzito é composta essencialmente por quartzitos maduros brancos, intensamente silicificados, finos a médios, aflorando em grandes lajedos e matacões, normalmente apresentando um intenso fraturamento. Esta unidade aflora apenas nas bordas da Serra de Caldas, com Latossolos mascarando os afloramentos rochosos no platô.

A Unidade Quartzito Argiloso é representada por quartzitos finos, vermelhos, argilosos, mineralogicamente imaturos e localmente substituídos por pacotes pelíticos laminados.

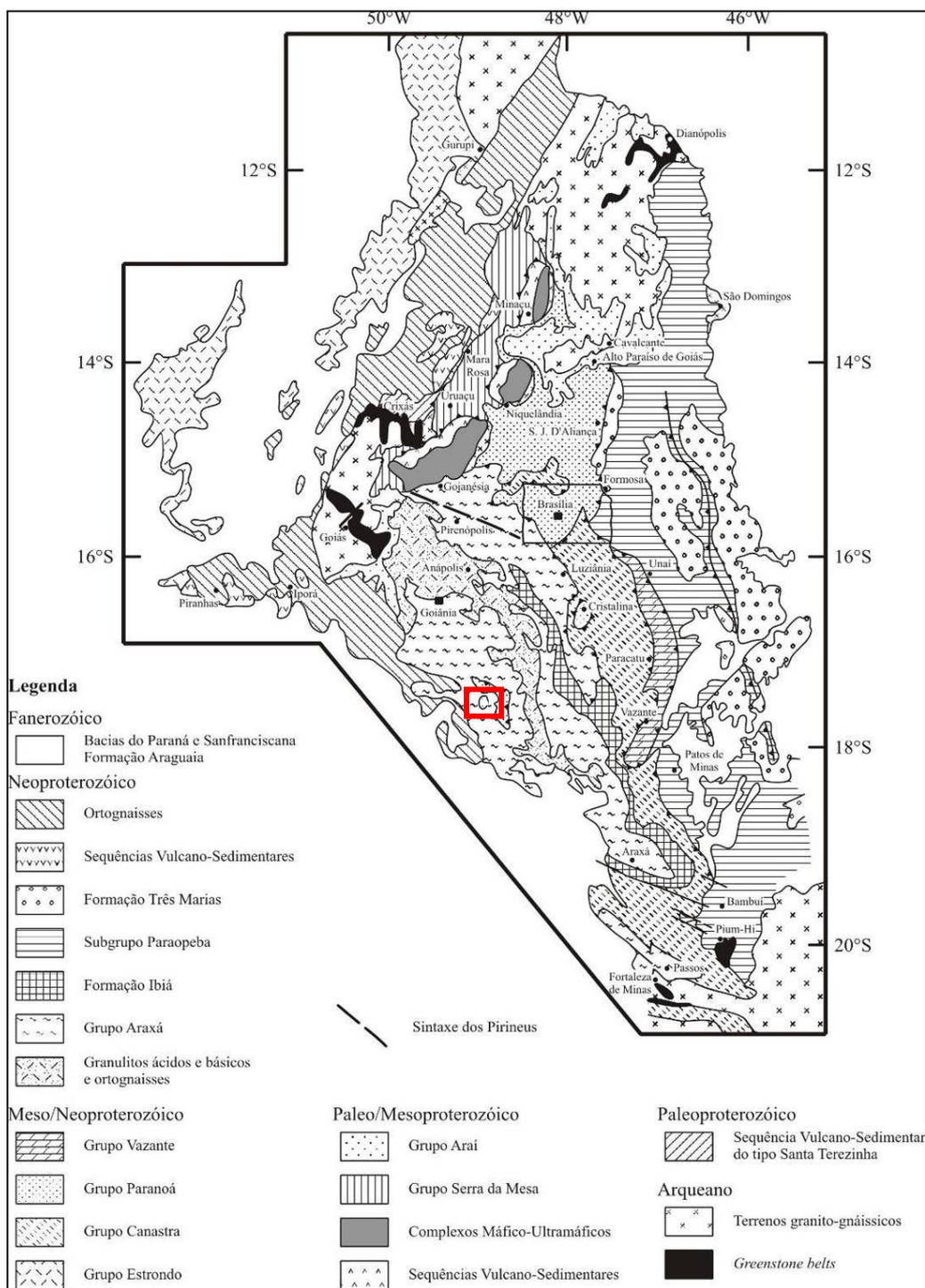


Figura 2.1 - Esboço geológico-tectônico da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília, com destaque em vermelho para a região de Caldas Novas (Dardenne 2000).

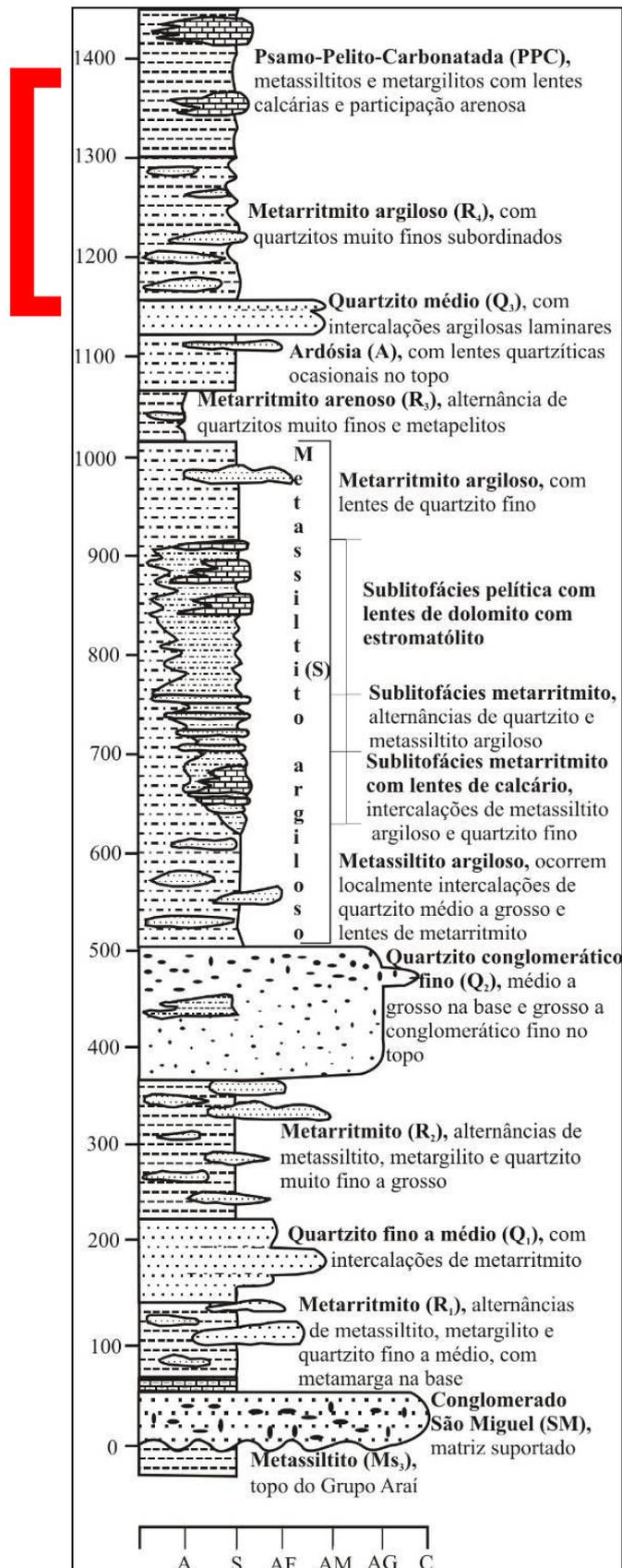


Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá definida na região de Alto Paraíso de Goiás - São João D'Aliança, Goiás (Faria 1995), e sua associação com a região de Caldas Novas. Destacado com a barra vermelha a seção que ocorre na região de Caldas Novas.

A Unidade Metarritmito é caracterizada por uma sequência de quartzitos finos a médios, feldspáticos, branco a rosados, intercalados com níveis centimétricos a decimétricos de materiais pelíticos, frequentemente ricos em mica branca detrítica.

A Unidade Pelito-Carbonatada é composta por um espesso pacote de metassiltitos maciços ou laminados. Lentes de mármore finos, bandados e ricos em minerais máficos prismáticos são encontrados subordinadamente (Campos *et al.* 2009).

2.1.2 GRUPO ARAXÁ

O Grupo Araxá corresponde a toda região plana a suave ondulada nas adjacências da Serra de Caldas, com amplo predomínio de xistos, como muscovita-quartzo-biotita xistos, muscovita-biotita xistos, muscovita-biotita-granada xistos, mármore impuros e calcixistos ricos em biotita e muscovita (Campos *et al.* 2009). Associado aos xistos e quartzitos ocorrem, em áreas restritas, faixas de rochas metaultramáficas (tremolita xistos, clorita-talco xistos e esteatitos) e tipos petrográficos interpretados como rochas metavulcânicas ácidas de composição dacítica (Campos & Costa 1980 e Drake Jr. 1980).

Microscopicamente os xistos apresentam paragêneses típicas da fácies xisto verde na zona da clorita. Os minerais do grupo do epidoto, titanita, óxidos e o zircão são os acessórios mais comuns encontrados em todas as fácies de xistos. Mais raramente ocorrem cristais mal formados de turmalina em pequenas proporções (Cadamuro *et al.* 2000).

A paragênese mineral do Grupo Araxá na área apresenta processos retrometamórficos definidos pela desestabilização da biotita e granada que passam para clorita em virtude da hidratação possivelmente ligada aos processos de descolamento tectônico durante o Ciclo Brasileiro. O contato entre os grupos Araxá e Paranoá é marcado por um espesso pacote de brechas tectônicas, visualizadas apenas em perfis litológicos de poços termais.

2.1.3 GRUPO AREADO

O Grupo Areado é composto de rochas sedimentares atribuídas ao Eocretáceo, definido, da base para o topo, nas formações Abaeté, composta de conglomerados e arenitos depositados em leques aluviais e canais fluviais entrelaçados; Quiricó, composta por folhelhos de origem lacustre; e Três Barras, composta por arenitos médios a finos, brancos, esverdeados ou rosados (Campos & Dardenne 1997b).

Ao longo das bordas leste e oeste, no topo da Serra de Caldas, o Grupo Areado aflora com conglomerados recobrimo os metassedimentos do Grupo Paranoá. Os conglomerados são clasto-suportados, com seixos e blocos arredondados e pouco esféricos, tendo sido depositados por sistemas de rios entrelaçados. Apesar da restrita área de exposição, estes sedimentos são

importantes, pois marcam a presença da Superfície de Aplainamento Sulamericana, na porção sudeste do estado de Goiás (Campos *et al.* 2009).

2.1.4 GEOLOGIA ESTRUTURAL

As informações sobre geologia estrutural apresentadas correspondem à síntese dos trabalhos de Campos *et al.* (2000 e 2009) e D’el-Rey Silva *et al.* (2004 e 2008), além das observações realizadas durante os trabalhos de campo.

Dois grandes eventos tectônicos foram responsáveis pela estruturação geomorfológica e gênese das águas termais da região de Caldas Novas. O evento E1, de tectônica dúctil-rúptil atribuído ao Ciclo Brasileiro, e o evento E2, de tectônica rúptil, vinculado à reativação Sul-Atlântica. Quatro conjuntos de estruturas planares e lineares, os quais apresentam uma relação genética entre si, desenvolvidos em regimes dúctil-rúptil durante o evento E1, são individualizados. Segundo Campos *et al.* (2009) o evento E2 não foi responsável pela geração de estruturas, mas apenas pela reativação de estruturas planares geradas durante o ciclo brasileiro.

Os autores descrevem que o evento E1 comporta quatro fases deformacionais progressivas que se sucedem no tempo ou podem ser parcialmente sincrônicas (F₁, F₂, F₃ e F₄), enquanto o evento E2 é considerado como desenvolvido por uma única fase (F₅) (Tabela 2.1).

EVENTO E₁ – CICLO BRASILIANO		
Fases	Principais estruturas	Orientação Máxima
F₁	Foliação S_n e S₁ de fluxo. Contato de baixo ângulo entre os grupos Paranoá e Araxá.	S_n N80W/32SW
F₂	Foliação S₂ de plano axial. Dobras em chevron D₂ .	E₂ 10/350 e 15/165
F₃	Ondulações D₃ e lineações minerais Lx e lineações de estria Le .	E₃ ~EW Lx/Le centrífugos.
F₄	Fraturas e falhas.	N60W, N20E, N60E
EVENTO E₂ – REATIVAÇÃO SUL-ATLANTIANA		
Fase	Principais estruturas	Orientação Máxima
F₅	Reativação de falhas normais e fraturas.	N60W e N20E

Tabela 2.1 - Síntese dos eventos e fases de deformação observadas na região do Domo de Caldas Novas.

Fase de Deformação F₁

Segundo Campos *et al.* (2000) na fase F₁ foi desenvolvida foliação S_n nos xistos do Grupo Araxá e a foliação S₁ nos metapelitos do Grupo Paranoá. Trata-se de uma foliação de fluxo gerada por recristalização de filossilicatos (micas nos xistos Araxá e clorita nos metapelitos Paranoá). A superfície S_n, representada por uma xistosidade, foi gerada quando o Grupo Araxá ainda se encontrava em porções mais internas da Faixa Brasília, enquanto a superfície S₁ é representada pela orientação de filossilicatos finos geralmente paralelos ao acamamento sedimentar.

Como não existem dobras precursoras das foliações S_1 e S_n sua geração é considerada como função do deslizamento interestratal associado à carga litostática. No primeiro caso apenas uma clivagem é desenvolvida, pois a carga sedimentar sobreposta é reduzida,. No caso da foliação S_n , como se trata de uma sequência que sofreu grande soterramento na porção interna do orógeno, a recristalização foi mais intensa, originando uma xistosidade.

Os planos de S_n , observados em xistos, mostram o padrão em baixo ângulo com mergulhos que variam em todos os quadrantes. Este efeito é função das fases de deformação subsequentes. Originalmente, em função da estruturação regional, a foliação S_n deveria apresentar um padrão de baixo ângulo com mergulho para oeste. A foliação S_1 apresenta-se bastante tênue e está presente apenas em metapelitos (Campos *et al.* 2000).

Fase de Deformação F_2

A fase F_2 é a principal etapa responsável pela estruturação do eixo principal NNW/SSE da Serra de Caldas. Da mesma forma, na escala de afloramentos, esta etapa da deformação resulta na formação de dobras com padrão em chevron com eixos variando em torno de NS. Os chevrons são geralmente do tipo assimétrico, com flancos curtos e longos, sendo particularmente mais evidentes na unidade dos metarritmitos.

A observação do diagrama de planos de S_0 (Figura 2.3) permite identificar as concentrações máximas de medidas cuja interpretação resulta em uma ampla dobra traduzida por um eixo construído NNW/SSE. Esta estrutura é interpretada como do tipo assimétrica, uma vez que o mergulho da superfície envoltória do flanco oeste apresenta mergulhos ligeiramente mais acentuados que aquela observada no flanco leste (Campos *et al.* 2000).

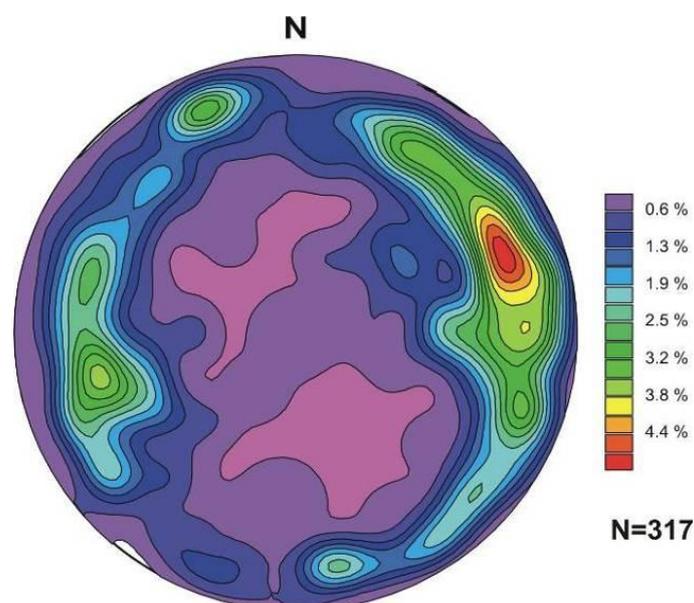


Figura 2.3 - Estereograma de planos de acamamento S_0 , de acordo com Campos *et al.* (2000).

Para a explicação cinemática desta fase, considera-se uma matriz de tensores com σ_1 aproximadamente EW (ENE/WSW), o que é coerente com a deformação regional com transporte de oeste para leste em direção ao Cráton do São Francisco.

Esta fase de deformação é responsável pelo desenvolvimento de uma foliação de plano axial, principalmente visível em metapelitos do Grupo Paranoá.

Fase de Deformação F₃

A fase de deformação F₃ é materializada pelo dobramento com eixo ortogonal ao da fase F₂. Trata-se de dobras amplas e ondulações com grande comprimento de onda, as quais causam um padrão de interferência do tipo “caixa de ovo”, observável desde a escala de afloramento até em escala megascópica (estrutura dômica da Serra de Caldas vista em imagem de satélite). No diagrama de planos de S₀ esta fase é evidenciada pelo padrão de mergulhos centrífugos.

Apesar de pouco evidente em campo, esta deformação é caracterizada por amplas ondulações de grande comprimento de onda e pequena amplitude. Em função do baixo ângulo de mergulho dos flancos (geralmente <10°), esta estrutura é de difícil percepção, sendo por isso pouco medida. O padrão desarmônico da foliação dos xistos também é resultante da atuação desta fase nas coberturas de xistos.

A explicação cinemática desta fase requer um tensor máximo compressivo perpendicular ao observado na fase F₂. Esta geometria de tensores é de certa forma incompatível com a estruturação regional da Faixa Brasília, portanto, este trabalho considera a mesma interpretação proposta por Campos & Freitas-Silva (1998), para a região do Distrito Federal. Os autores consideram que nos estágios finais da fase F₂, quando os pulsos de σ_1 EW se tornavam atenuados (alívio de pressão), ocorria uma equivalência entre os tensores σ_1 e σ_3 , quando o tensor σ_3 se equivaleria em magnitude ao tensor de máxima compressão. Esta explicação é corroborada pelo baixo valor de mergulho dos flancos norte e sul do domo e pelo padrão das ondulações F₃.

Uma tentativa de explicação alternativa, considerando uma rotação do tensor σ_1 de aproximadamente EW para NS é pouco provável, uma vez que na Faixa Brasília não existe um evento compressivo norte-sul.

A análise estatística do comportamento das lineações minerais e de estria, observadas geralmente, em veios de segregação de quartzo ao longo da foliação dos xistos, mostra um padrão dômico destas estruturas. Neste caso é importante salientar que a estrutura dômica foi formada após a estruturação da nappe do Grupo Araxá sobre o Grupo Paranoá, sendo que o padrão do domo foi então alcançado quando da evolução das dobras associadas às fases compressivas F₂ e F₃.

Fase de Deformação F₄

A fase de deformação F₄ representa uma etapa da deformação eminentemente rúptil, sendo caracterizada pela acomodação final da energia pelo fraturamento e falhamento do arcabouço gerado nas etapas anteriores.

Nesta fase o tensor principal σ_1 foi rotacionado, adquirindo uma posição vertical, favorecendo o desenvolvimento de fraturas e de falhamentos ao longo dos planos de fraqueza principais gerados nas fases anteriores. A análise qualitativa das fraturas, realizada nos trabalhos de Campos *et al.* (2000) e Cadamuro *et al.* (2000), considerou a estatística de mais de 700 medidas em todas as rochas da região. A roseta de fraturas da Figura 2.4 apresenta o comportamento das principais famílias de estruturas.

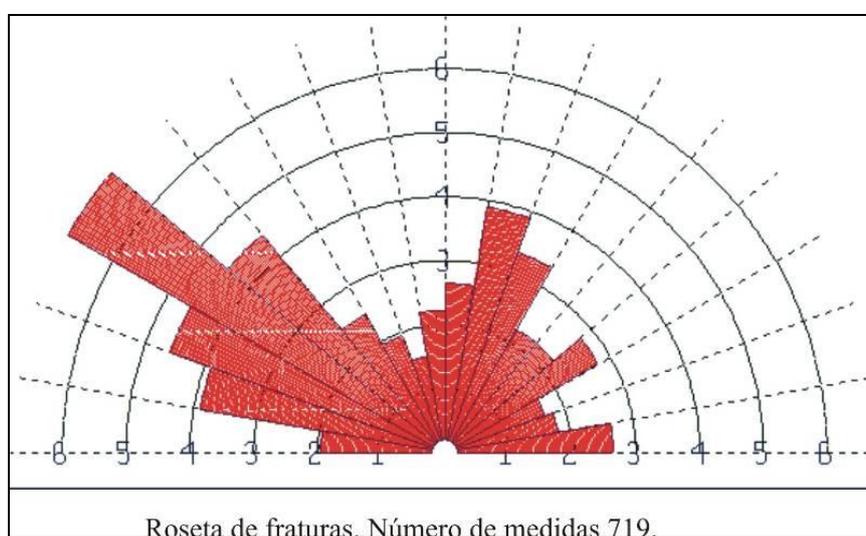


Figura 2.4 - Distribuição estatística das fraturas medidas em xistos e em rochas do Grupo Paranoá na região de Caldas Novas, segundo Campos *et al.* (2000).

- as fraturas N20E e N30-40W são consideradas uma família de fraturas de extensão, provavelmente geradas nas fases iniciais de deformação;
- as fraturas N60-70W e N60E são consideradas pares conjugados de cisalhamento, formados nos estágios compressivos da deformação;
- as fraturas de direção próximo a EW são consideradas como fraturas dilatacionais.

Além da geração das famílias de fraturas anteriormente discriminadas, esta fase de deformação também foi responsável pelo desenvolvimento de falhamentos, os quais localmente podem deslocar contatos litológicos ou lineamentos regionais.

Parte das fraturas estudadas é aberta e preenchida por veios de quartzo. Este grupo de estruturas é considerado como formadas nos estágios precoces da deformação, sendo preenchidos por sílica associada a fluidos hidrotermais que evoluíram nas fases mais tardias da deformação.

Fase de Deformação F₅

A fase de deformação F₅ é identificada como um evento de tectônica modificadora. Esta fase é relacionada à reativação da Plataforma Sul-Americana no Cretáceo, sendo particularmente importante como controladora dos sistemas de fluxo de água subterrânea e condicionadora do hidrotermalismo observado na região.

A reativação atuante na região é devida a esforços trativos durante o Cretáceo, em função da proximidade entre a região em estudo e as áreas submetidas a tectônica extensiva no Mesozóico. A região de Caldas Novas está situada na porção central do lineamento regional denominado Az 125 (Gonzaga & Tompkins 1991), o qual representa uma faixa submetida a elevadas taxas de extensão, inclusive contendo inúmeros corpos intrusivos de natureza alcalino-carbonatítica, em cidades próximas como Catalão, Pires do Rio e Ipameri.

Embora na região de Caldas Novas não ocorram registros de magmatismo alcalino ou carbonatítico, a área foi submetida a esforços responsáveis pela reativação e abertura das estruturas geradas na Fase F₄. O maior registro deste fato é a própria presença de água aquecida por gradiente geotérmico. Neste caso ocorre infiltração das águas de precipitação a profundidades maiores que 1000 metros, para alcançar as temperaturas observadas. Neste caso, a percolação de grande volume de águas a profundidades expressivas só é possível no caso das anisotropias (fraturas e falhas) permanecerem abertas em grandes profundidades. Assim conclui-se que a região sofreu extensão significativa para que as fraturas permaneçam abertas a centenas de metros.

É importante salientar que em outras áreas, como Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança, regiões com o mesmo conjunto litológico, não apresentam hidrotermalismo por grau geotérmico, uma vez que as fraturas não são suficientemente abertas e profundas para garantir a infiltração por centenas de metros a partir da superfície. Nestes casos as fraturas tendem a se acolmatar a partir das primeiras centenas de metros (300 - 400 metros).

Os dados estruturais levantados por D'el-Rey Silva *et al.* (2004 e 2008) deixam evidente que os mecanismos responsáveis pela subida das águas termais através de fraturas estão relacionados com uma combinação de antiformes regionais, com rochas mecanicamente mais resistentes e zonas de cisalhamento associadas ao evento tardio do Ciclo Brasileiro. A rede de estruturas planares e curvi-planares responsáveis pelo transporte de águas termais à superfície foi formada por tensões compressivas máximas dos eventos deformacionais, e pelo escorregamento gravitacional decorrente do soerguimento da Serra de Caldas Novas.

A Figura 2.5 apresenta o mapa geológico da região de Caldas Novas, adaptado a partir de Lacerda Filho (1999), Campos *et al.* (2000) e Almeida *et al.* (2006) e dados de campo. Sobre este arcabouço geológico se desenvolve todo o contexto hidrotermal da região de Caldas Novas.

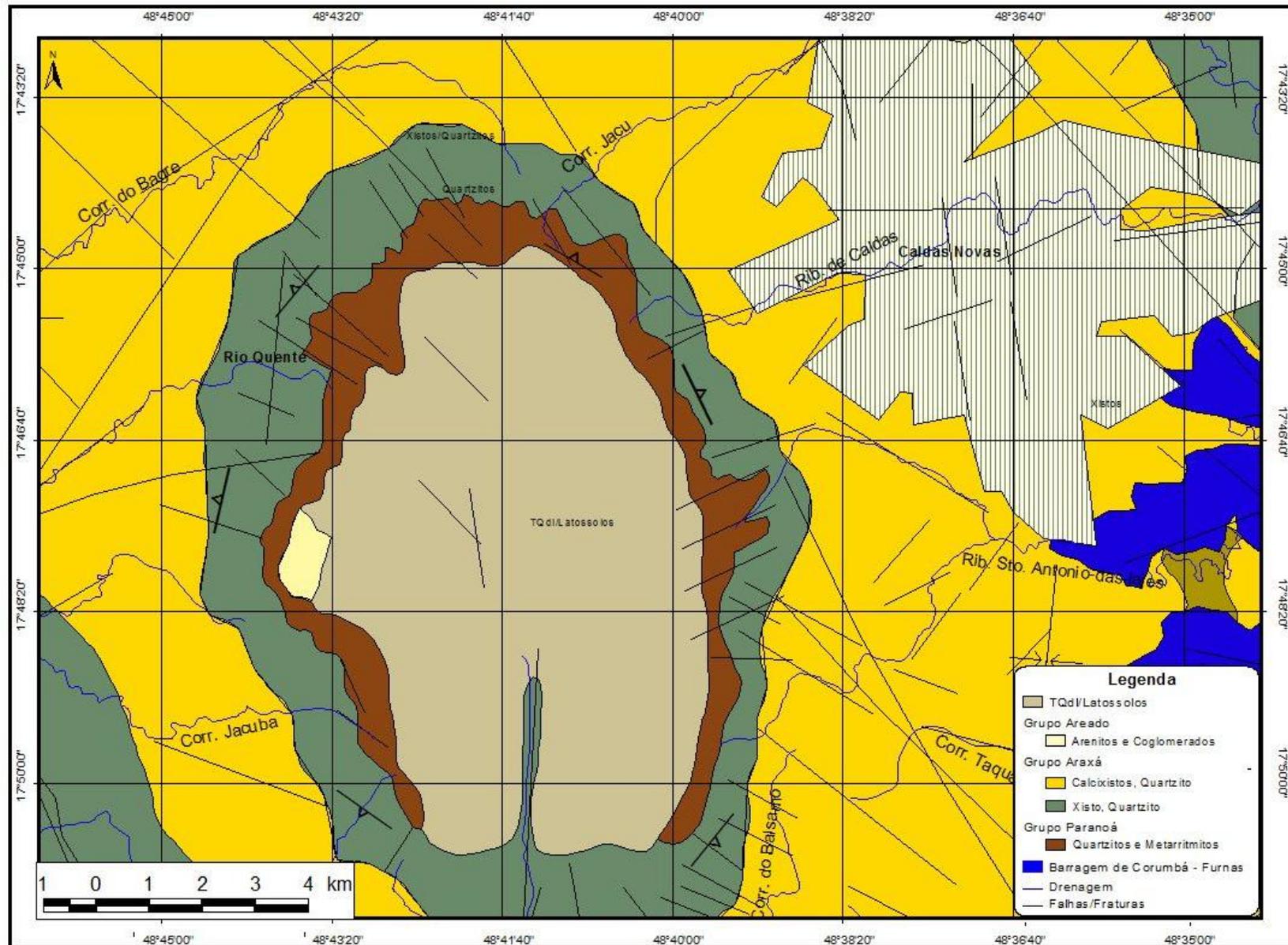


Figura 2.5 - Mapa Geológico da região de Caldas Novas. Base Cartográfica: SIG/Goiás.

2.2 GEOMORFOLOGIA E SOLOS

A região de Caldas Novas está inserida no Planalto Central Goiano, definido por Pena (1976) e também descrita por Mamede & Nascimento (1981) como um vasto planalto, compartimentado em níveis topográficos distintos, que especificamente na região de Caldas Novas encontra-se subdividida em Planalto Rebaixado de Goiânia e Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba.

O Planalto Rebaixado de Goiânia representa a parte mais baixa e erodida do relevo, com variações altimétricas entre 600 e 800 m, presença de formas convexas, tabulares e aguçadas, com forte presença regional. Nas imediações da cidade de Caldas Novas predomina um planalto dissecado, de formas amplas e suaves, drenagem dendrítica, com vales abertos de fundo plano e associado às rochas do Grupo Araxá (Haesbaert & Costa 2000).

O Planalto do Alto Tocantins-Paranaíba caracteriza-se por apresentar relevo bastante dissecado e heterogêneo, com formas convexas e tabulares constituindo os compartimentos topográficos mais elevados, representados por chapadas, serras e escarpas. A Serra de Caldas está inserida neste compartimento, associado às rochas do Grupo Paranoá.

Campos *et al.* (2009) descrevem o Domo Estrutural de Caldas ou Serra de Caldas (Figura 2.6) como uma feição fisiográfica/estrutural caracterizada pela elevação topográfica isolada no sudeste goiano, que alcança cotas superiores a 1.000 metros.



Figura 2.6 - Estrutura dômica da Serra de Caldas e principais características da região de Caldas Novas. Fonte: *Google Earth*, retirado de Almeida *et al.* (2006).

Latrubesse (2006) define a Serra de Caldas Novas como um pseudo-domo com estrutura tectônica complexa sobre rochas pré-cambrianas, com morfologia elíptica de aproximadamente

13x08 km, e eixo mais longo em direção norte/noroeste. Constitui uma mesa reliquiar/residual associada a uma Superfície Regional de Aplainamento - SRA.

Cadamuro *et al.* (2000) dividiram a região em três feições distintas, definidas em função da altitude e variações topográficas, as denominando de:

- Área de Topo de Chapada, com cotas entre 960 e 1040 metros, com relevo plano a suave ondulado;
- Área de Relevo Dissecado, que corresponde à borda da serra, com cotas entre 720 e 950 metros, com superfície escarpada e intenso processo erosivo; e
- Área de Relevo Medianamente Dissecado, com cotas inferiores a 720 metros, vertentes com baixa declividade e pouco profundas.

Cadamuro *et al.* (2000) também descreveram cinco tipos de solos na região de Caldas Novas, classificando-os como: Latossolo Amarelo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Cambissolo e Argissolo. Os valores de condutividade hidráulica destas coberturas são coerentes com aqueles obtidos por Almeida *et al.* (2006) e Fiori *et al.* (2010) em estudos no estado de Goiás.

O Latossolo Amarelo ocupa o topo da Serra de Caldas e áreas medianamente dissecadas nas regiões de baixada. O Neossolo Litólico e Cambissolo estão associados às encostas da Serra de Caldas, nas regiões mais dissecadas. O Neossolo Quartzarênico ocupa regiões mais baixas, com acúmulo de material arenoso em superfícies suave onduladas, enquanto o Argissolo tende a ocupar partes de colinas e morros já nas áreas mais rebaixadas, sendo associados à pedogênese dos xistos do Grupo Araxá.

2.3 RECURSOS HÍDRICOS

2.3.1 ÁGUAS SUPERFICIAIS

A região está inserida na região hidrográfica do rio Paranaíba (CNRH 2003) e em sua maior parte ocupa os interflúvios dos rios Corumbá e Piracanjuba, afluentes da margem direita do rio Paranaíba (Haesbaert & Costa 2000). O rio Quente e o ribeirão Pirapetinga, que forma a lagoa homônima, apresentam surgências termais e são importantes afluentes dos rios Piracanjuba e Corumbá, respectivamente.

O rio Quente nasce na Serra de Caldas, ao longo de um sistema de fraturas em rochas metamórficas associadas ao Grupo Paranoá (Figura 2.7). Com temperaturas variando entre 34 e 37°C, o rio Quente, deságua no rio Piracanjuba 13 km a oeste da região de Caldas. Todas as nascentes termais do rio Quente situam-se dentro de uma área particular, que compreende o maior empreendimento de turismo e lazer da região das águas quentes.

O ribeirão Pirapetinga forma a Lagoa da Pirapetinga e possui surgências termais que alcançam 46 °C. O ribeirão deságua no rio Corumbá e, assim como as nascentes do rio Quente, as principais fontes termais situam-se em propriedade particular.



Figura 2.7 - Nascentes do Rio Quente, entre fraturas de rocha e em piscina da Pousada do Rio Quente.

2.3.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O grande potencial termal da região é oriundo dos aquíferos profundos que, através de um arranjo de fraturas, fornecem águas quentes por intermédio de poços tubulares profundos. Costa e Campos (1980) e Drake Jr. (1980) definiram a origem das águas termais e foram pioneiros em estudos associando o potencial termal com o arranjo tectônico e estrutural da região de Caldas Novas.

Tröger *et al.* (1999) definiram 3 aquíferos na região e os denominaram de Aquífero Paranoá, Aquífero Araxá e Aquífero Freático. As características hidroquímicas das águas foram analisadas e utilizadas como parâmetros para a classificação dos aquíferos.

Cadamuro *et al.* (2000) e Haesbaert & Costa (2000) redefiniram os aquíferos propostos por Tröger *et al.* (1999) como Sistema Aquífero Poroso ou Freático, Sistema Aquífero Araxá e Sistema Aquífero Paranoá. Esta classificação é atualmente utilizada e citada em todas as publicações sobre a região.

O mapa hidrogeológico do estado de Goiás e Distrito Federal (Almeida *et al.* 2006) classifica os sistemas aquíferos da região em Sistema Aquífero Freático II, Sistema Aquífero Araxá e Sistema Aquífero Paranoá, e apresenta um modelo hidrogeológico conceitual, compilado de diversas publicações. Campos *et al.* (2009) descreve o aquífero freático como Sistema Aquífero Intergranular. A Figura 2.8 apresenta o modelo hidrogeológico para a região de Caldas Novas, adaptado de Campos *et al.* 2000, Almeida *et al.* (2006) e Campos *et al.* (2009).

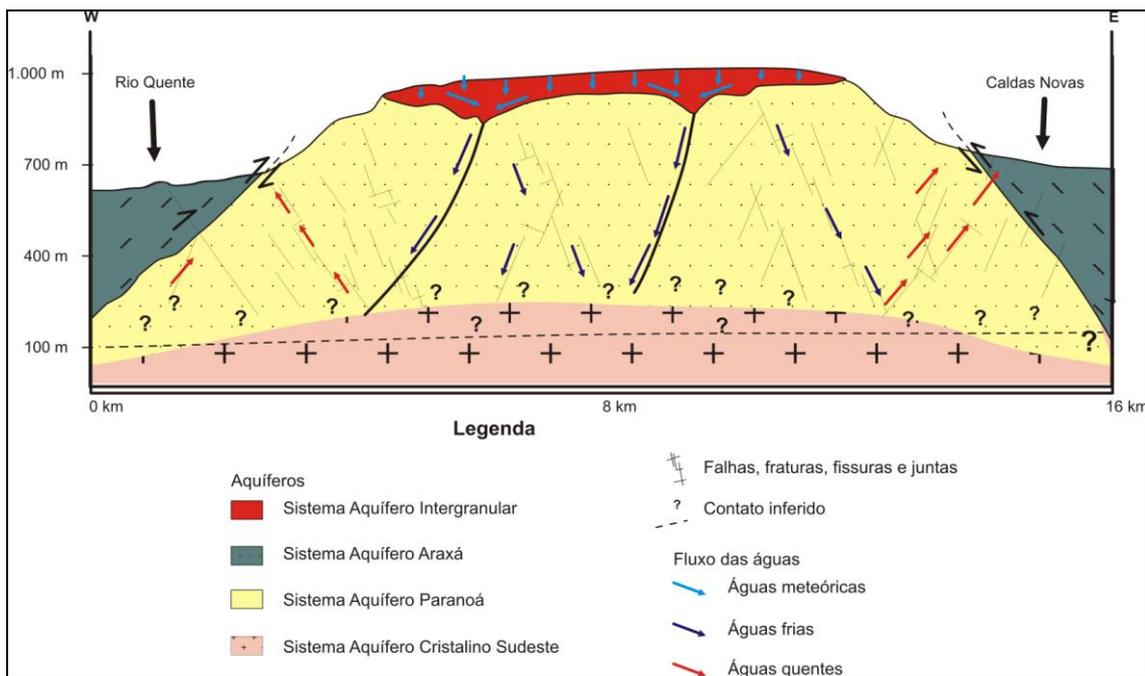


Figura 2.8 - Modelo Hidrogeológico conceitual da região de Caldas Novas.

Sistema Aquífero Intergranular

O Sistema Aquífero Intergranular corresponde ao aquífero freático, com características de aquíferos livres, contínuos lateralmente, de ampla extensão, com espessura saturada muito variável e de grande importância hidrogeológica local. Estes aquíferos funcionam como filtros, favorecem a recarga dos aquíferos sotopostos e regularizam a vazão de base das drenagens superficiais nos períodos de recessão de precipitações pluviométricas (Campos *et al.* 2009).

Esse sistema aquífero é classificado como intergranular e está associado às coberturas regolíticas, principalmente Latossolos, que no topo da Serra de Caldas podem atingir espessuras de 50 metros. São aquíferos que apresentam águas frias, com temperaturas próximas às médias anuais locais, além de águas pouco mineralizadas.

Segundo Peixoto Filho (2000), a perfuração de poços no centro da cidade de Caldas Novas intensificou a conexão hidráulica entre os aquíferos, aumentando a mistura das águas e causando amplas variações nas suas composições e temperaturas, provocando um aumento de 2 a 6°C na temperatura das águas do sistema aquífero intergranular.

Sistema Aquífero Araxá

O Sistema Aquífero Araxá é representado por aquíferos fraturados muito heterogêneos e anisotrópicos, livres, frios ou termais, com extensão lateral restrita, controlada pela distribuição das zonas de fraturamento (Campos *et al.* 2009). As águas frias são associadas às zonas fraturadas com

recarga direta pela infiltração de águas meteóricas a partir do sistema intergranular e relacionados às duas primeiras centenas de metros dos xistos do Grupo Araxá.

O Sistema Aquífero Araxá Termal tem sua recarga por fluxo ascendente a partir das águas aquecidas do Aquífero Paranoá termal sotoposto, e está relacionada com as zonas fraturadas mais profundas, entre 200 e 500 metros, próximo ao contato com o Grupo Paranoá. As águas termais do Aquífero Paranoá confinado, ao encontrar fratura nos xistos, sobem e misturam-se as águas do Aquífero Araxá, elevando a temperatura das mesmas. Os poços termais apresentam temperaturas entre 35°C e 49°C.

Sistema Aquífero Paranoá

O Sistema Aquífero Paranoá corresponde a um sistema de aquíferos fraturados, livres ou confinados, frios ou termais, anisotrópicos e heterogêneos. As águas frias do sistema estão relacionadas às zonas de fraturas com águas de fluxos descendentes em profundidades inferiores a 400 metros e, neste caso, estão associadas aos aquíferos livres, próximos a Serra de Caldas.

O Sistema Aquífero Paranoá termal confinado está associado a condições de fluxo descendente em profundidades maiores que 450 metros, ou em qualquer profundidade, quando mantiver o fluxo ascendente a partir de fraturas abertas mais profundas. Na região central da cidade de Caldas Novas os poços tubulares possuem entre 450 e 1000 metros de profundidade. As maiores temperaturas do sistema Paranoá, entre 43°C e 59°C, tem levado a um aumento na exploração deste sistema aquífero nos últimos anos. O contato entre os sistemas aquíferos Araxá e Paranoá é marcado por brechas tectônicas que representam um excelente controle hidrogeológico.

AQUECIMENTO DA ÁGUA

Define-se como grau geotérmico, a profundidade necessária para aumentar a temperatura da água em 1°C. É variável, numa mesma vertical, pelo menos nos primeiros quilômetros da crosta terrestre e depende da condutibilidade térmica das rochas, da proximidade do foco térmico, da estrutura das rochas e da morfologia. O valor médio adotado na terra é de 33 m/1°C, podendo variar entre 20 e 40 metros na maioria dos casos (Custódio & Llamas 1983).

Peixoto Filho (2000), interpretando a perfilagem térmica de 57 poços da área urbana de Caldas Novas, concluiu que a média para região varia de 50°C a 36°C por quilômetro.

Campos & Costa (1980) indicaram que os baixos valores dos elementos químicos B, As, Cs e Rb inviabilizava a associação dos fluidos termais a processos ígneos. Os autores também verificaram através da realização de perfis magnetométricos, a inexistência de intrusões magmáticas de natureza básica-ultrabásica ou alcalina, sob a Serra de Caldas.

Segundo Campos *et al* (2009) o aquecimento das águas está vinculado exclusivamente ao gradiente geotérmico da região e a principal área de recarga está situada no platô da Serra de Caldas. Os autores atribuíram o aquecimento das águas a regimes de fluxo regionais que alcançam profundidades maiores que 1.000 metros, em uma região onde o gradiente geotérmico é da ordem de 25°C a 30°C por quilômetro. Análises hidroquímicas realizadas por Campos *et al.* (2009) e Cadamuro *et al.* (2000) corroboram com a idéia de aquecimento por gradiente geotérmico.

2.4 CLIMA

A região de Caldas Novas é caracterizada por possuir clima tropical, com duas estações bem definidas, uma chuvosa e quente, entre outubro e abril, e outra seca, com temperaturas mais amenas, entre maio e setembro.

Tröger (2007) descreve a região como subtropical, com precipitação média anual de 1600 mm, e variação entre 1100 e 2300 mm/ano. Os índices de umidade relativa do ar alcançam 15% em períodos secos, a temperatura média é de 23°C, e a evapotranspiração real média é de 850 mm/ano.

Dados de três estações pluviométricas monitoradas pela AMAT na região de Caldas Novas caracterizam a região com índices pluviométricos anuais médios de 1600 mm (Figura 2.9), temperaturas médias de 20,6 °C e umidade relativa do ar média de 60,8% (AMAT 2011). As normais climatológicas do INMET, período 1961-1990, para estação Itumbiara, próxima à cidade de Caldas Novas, e o trabalho de Silva *et al.* (2006), também apresentam médias anuais semelhantes às descritas por Tröger (2007) e AMAT (2011).

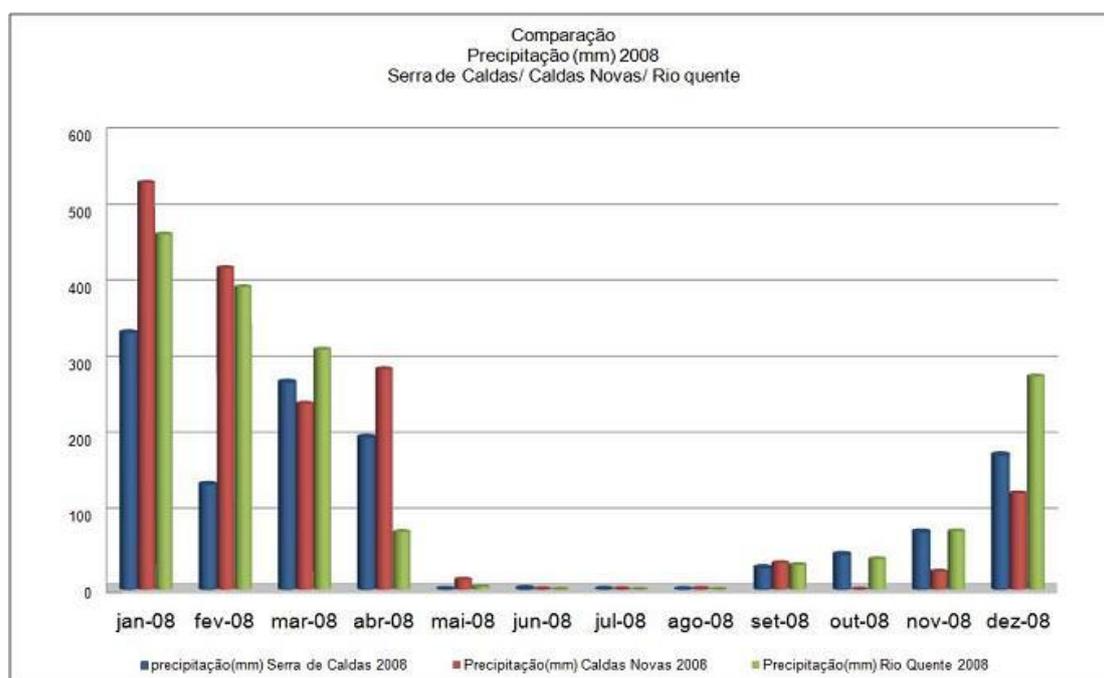


Figura 2.9 - Precipitação Total, em três estações climáticas na Região de Caldas Novas, ano de 2008.
Fonte: AMAT (2011).

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE RECARGA ARTIFICIAL DE AQUÍFEROS

3.1 ASPECTOS CONCEITUAIS

Os efeitos climáticos e principalmente a ação antrópica desordenada estão comprometendo seriamente a recarga dos sistemas aquíferos. As alterações sobre o uso e manejo do solo, como o desmatamento e urbanização, diminuem as taxas de infiltração favorecendo o aumento das vazões máximas em cursos superficiais, com incremento do escoamento e diminuição da recarga natural (Tucci & Mendes 2006).

A crescente demanda por água subterrânea, associada às alterações na ocupação territorial, pode comprometer a sustentabilidade dos aquíferos, com superexploração e rebaixamento dos níveis piezométricos. Fetter (1994) afirma que a superexploração das águas subterrâneas resulta na exaustão do aquífero.

Esta superexploração promove um cone de depressão que pode ser revertido somente após um acréscimo considerável nos níveis de recarga dos aquíferos (Theis 1938). Como em grandes regiões urbanizadas a possibilidade de aumento das áreas de recarga natural é praticamente impossível, os mecanismos de recarga artificial são as únicas ferramentas capazes de contribuir para o restabelecimento das reservas hídricas dos sistemas aquíferos.

A recarga artificial de aquíferos é uma prática bastante utilizada em diversas partes do mundo, mas pouco conhecida e difundida no Brasil. Trata-se de uma excelente ferramenta de gestão dos recursos hídricos, que não apenas regulariza as reservas hídricas subterrâneas, mas alcança resultados significativos no controle de enchentes, deslizamentos de terra, estabilização de intrusão da cunha salina em ambientes costeiros, mitigação de subsidência em terrenos cársticos, entre outros problemas gerados pelo desequilíbrio e degradação dos recursos naturais.

Bouwer (2002) afirma que, com o aumento populacional e crescente demanda por água subterrânea, os mecanismos de recarga artificial de aquíferos terão um grande incremento mundial. Hirata & Ferreira (2001) afirmam que a recarga dos aquíferos acontece de duas formas distintas, natural e artificialmente, e descrevem o grande avanço da recarga artificial nos últimos anos.

Diamantino (2005) descreve cinco formas de recarga de aquíferos: Recarga Natural, Recarga Facilitada, Recarga Induzida, Recarga Acidental e Recarga Artificial. As recargas facilitadas e induzidas compreendem técnicas que objetivam aumentar a infiltração de águas superficiais e também podem ser consideradas técnicas de recarga artificial de aquíferos.

Alguns vazamentos em tubulações de água e esgoto contribuem para a recarga dos aquíferos e alteram suas características de potabilidade. A recarga pode ocorrer a partir da inadequada disposição de efluentes em fossas sépticas não impermeabilizadas, infiltração em aterros sanitários e grandes áreas irrigadas, escoamento superficial em áreas urbanas, vazamentos em sistemas de abastecimento de água e esgotos, ou demais vazamentos.

A recarga acidental pode ser extremamente prejudicial aos sistemas aquíferos, com degradação de suas águas e propagação de plumas de contaminação, porém, também podem contribuir consideravelmente para as reservas subterrâneas. Hirata *et al.* (2011) descrevem que a recarga acidental ocasionada por vazamentos na rede da concessionária pública, representa de 40% a 60% da recarga total na cidade de São Paulo. Em diversas regiões metropolitanas brasileiras o cenário é semelhante.

A recarga artificial de aquíferos consiste em armazenar água superficial em bacias, valas, trincheiras, poços ou qualquer outra estrutura que consiga direcionar água para os aquíferos e deve ser realizada em solos permeáveis, com boa espessura da zona vadosa e controle rígido da qualidade da água (Bouwer 2002).

Recarga artificial é a introdução não natural de água em um aquífero, através da construção de estruturas projetadas para aumentar a recarga natural, para facilitar a percolação das águas superficiais ou para introduzir diretamente a água no aquífero. A recarga artificial aumenta a disponibilidade hídrica do reservatório subterrâneo, dificulta o rebaixamento do nível de água e promove melhoria na qualidade da água subterrânea (Diamantino 2005).

A recarga artificial é uma atividade planejada e pode ser utilizada em qualquer formação geológica que possua permeabilidade e tenha condições para armazenar e transmitir água e seu principal objetivo é aumentar a disponibilidade de água subterrânea, contribuindo com o equilíbrio do ciclo hidrológico, aumentando as taxas de infiltração e diminuindo o escoamento superficial.

Custódio & Llamas (1975) definem os mecanismos de recarga artificial como um conjunto de técnicas com o objetivo principal de permitir uma exploração eficiente e sustentável dos aquíferos, com aumento de seus recursos e criação de reservas, mediante uma intervenção direta ou indireta no ciclo natural da água.

O aumento da população mundial está acarretando em um aumento significativo na demanda por recursos hídricos subterrâneos e conseqüente aumento no uso de técnicas de recarga artificial de aquíferos, em todo mundo. A baixa qualidade das águas superficiais contribui para o aumento de consumo dos recursos subterrâneos, com conseqüente necessidade de incremento na recarga efetiva dos aquíferos.

3.2 TÉCNICAS DE RECARGA ARTIFICIAL

São inúmeros os exemplos de aplicação de técnicas de recarga artificial de aquíferos em diversos países do mundo e o sucesso na obtenção dos resultados esperados depende de um conjunto de fatores, como a origem da água, as vazões do projeto e seus aspectos qualitativos; o tipo de solo e rocha e suas características hidráulicas; os índices pluviométricos; o relevo; o uso e ocupação do terreno; os aspectos sociais e legais; além dos custos totais de instalação e operação dos sistemas de recarga.

Os métodos de aplicação de recarga artificial de aquífero são variáveis e objetivam diferentes resultados. Em geral os métodos são divididos em diretos ou superficiais e indiretos ou profundos. Bouwer (2002) caracteriza três mecanismos de recarga artificial denominados de recarga em superfície, recarga na zona vadosa dos aquíferos e recarga em profundidade.

Os métodos em superfície são mais utilizados para aquíferos freáticos, livres, e podem ser realizados através de barragens, espalhamento de água, canais, valas, sulcos, trincheiras e fossas, aproveitando ou não o leito de um curso d'água superficial (Bouwer 2002). Estes métodos permitem a infiltração da água através de uma ampla superfície de contato entre a água e o solo.

Bouwer (2002) ainda descreve dois sistemas de recarga em superfície, e os classifica em sistemas de recarga artificial dentro e fora do leito dos cursos d'água. Os sistemas dentro do leito dos rios compreendem barramentos/represas, podendo ou não, estar associado à modificação no canal principal do rio. Os métodos utilizados fora do leito dos rios são denominados de bacias de infiltração, tanques de infiltração, valas, trincheiras, sistemas de recarga por alagamento ou sistemas de recarga por irrigação, também descritos por Gale *et al.* (2002).

Os métodos indiretos, descritos pelos autores, funcionam principalmente através de poços de injeção de água, e são mais recomendados para aquíferos confinados. Diamantino (2005) descreve poços perfurados na zona não saturada, trincheiras de infiltração e aquíferos artificiais como novos métodos de recarga artificial de aquíferos. Em uma análise mais ampla os poços de injeção podem ser descritos como mecanismos de recarga direta, pois funcionam como condutores de água diretamente para o aquífero. Costa (2008) descreve a recarga artificial em 2 mecanismos denominados de método superficial direto e método subsuperficial direto.

As principais técnicas de recarga artificial compiladas e integradas principalmente de Bouwer (2002), Gale *et al.* (2002) e Diamantino (2005) são descritas a seguir. O histórico sobre uso de técnicas de recarga artificial e as aplicações em alguns países do mundo, descritos posteriormente, foi, em sua ampla maioria, obtida dos trabalhos publicados em sete edições do Simpósio Internacional sobre Recarga Artificial (ISAR), realizados pela Associação Internacional de Hidrogeólogos (IAH), os quais representam a base de informações deste capítulo.

3.2.1 SISTEMAS DE RECARGA EM SUPERFÍCIE

- BARRAGENS/REPRESAS DE RECARGA

O barramento de excedentes hídricos em leitos de rio compreende uma das técnicas mais utilizadas de recarga de aquíferos. As barragens podem armazenar grandes volumes de água, em terrenos planos, ou pequenas quantidades, funcionando como barragens de retenção de fluxo em regiões com relevo movimentado.

A construção de barreiras hidráulicas, que retardam o escoamento superficial e aumentam as taxas de infiltração é alternativa comum para incremento da recarga efetiva e diminuição do fluxo concentrado em períodos de cheia. A deposição de material fino nas barragens deve ser contida para controle da eficiência deste mecanismo de recarga artificial.

Diamantino (2005) descreve que as represas de armazenamento de areia são muito adequadas para reter água em períodos de cheia, em regiões de terrenos irregulares e clima árido. Descreve ainda, sistemas de barreiras ao longo do leito do rio e afirma que estas medidas retardam o escoamento da água, aumentando as taxas de infiltração e reduzindo a erosão do solo.

A aplicação destas técnicas pode minimizar os efeitos devastadores das fortes chuvas que acometem em diversas regiões do mundo anualmente, incluindo inúmeras cidades brasileiras. A Figura 3.1 ilustra este mecanismo de recarga artificial, evidenciando as barragens de recarga e pequenas bacias de inundação.

- BACIAS DE INFILTRAÇÃO/INUNDAÇÃO/TANQUES DE RECARGA

Os mecanismos de recarga artificial denominados de bacias de inundação, bacias de infiltração e tanques de recarga são descritos separadamente por alguns autores. Bouwer (2002) descreve sistemas de recarga por alagamento/espalhamento com características muito semelhantes às bacias de inundação. Os sistemas são similares e tratam de retenção de água superficial em construções rasas, fora do leito dos rios.

Estes mecanismos são muito eficazes para aquíferos rasos e podem ocupar extensas áreas, captando grandes volumes de água de chuva e excedentes de escoamento de rios. São bacias ou tanques escavados no solo com pequenas profundidades.

Berger & Gientke (1998) descrevem barragens de recarga e bacias de inundação para contenção de intrusão salina na planície de Oxnard, na Flórida. A construção de uma grande barragem com capacidade de armazenamento de 107 milhões de m³, associada a bacias de espalhamento/inundação, conseguiu conter o avanço da cunha salina, segundo os autores.

As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram as barragens de recarga e as bacias/tanques de inundação muito semelhantes às descritas por Bouwer (2002) e Gale *et al.* (2002), com recarga dentro e fora do leito dos rios e por Berger & Gientke (1998), na costa oeste dos Estados Unidos.

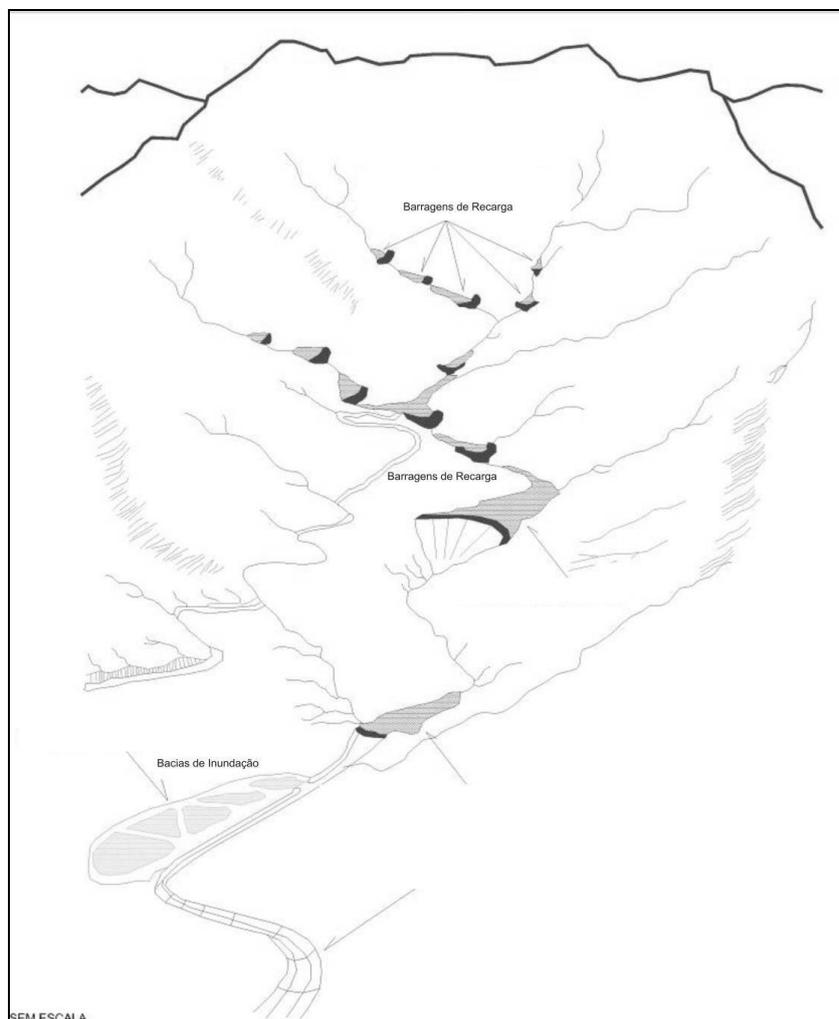


Figura 3.1 - Sistema de barragens de recarga e bacias de inundação semelhantes às descritas por Bouwer (2002), Gale *et al.* (2002) e Berger & Gientke (1998).

- CANAIS E VALAS DE INFILTRAÇÃO

Os canais e valas de infiltração são mecanismos construídos principalmente para aproveitar o excedente hídrico de um rio ou córrego. São instaladas barreiras hidráulicas que direcionam a água para sistemas de canais e valas de recarga, aproveitando a topografia do terreno.

Diamantino (2005) define vala de infiltração como uma trincheira longa e estreita, com largura inferior à profundidade. Em geral, estes sistemas de recarga funcionam com um grande canal principal distribuindo água para valas menores, pouco profundas, e podem estar associadas a grandes superfícies de inundação.

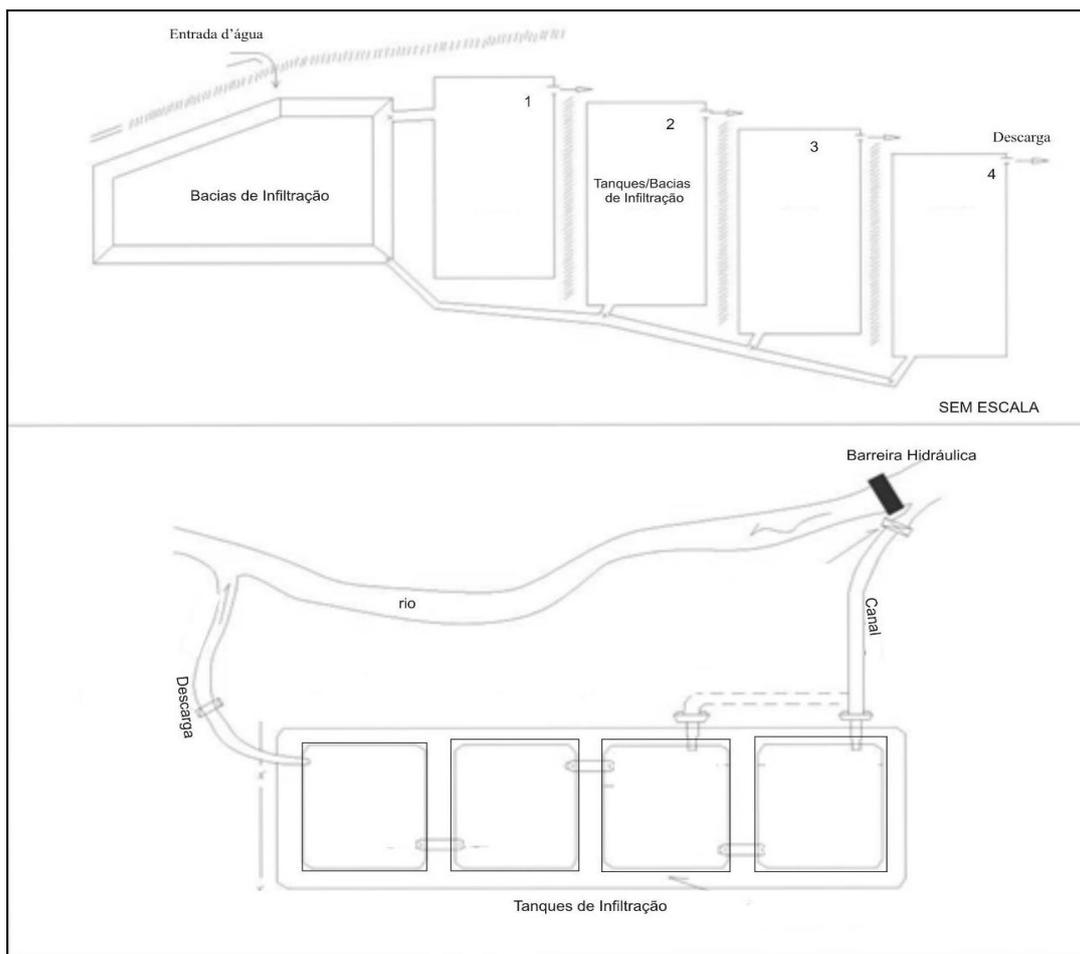


Figura 3.2 - Sistema de Bacias de Infiltração e Tanques de Recarga, semelhante aos descritos por Bouwer (2002), Diamantino (2005) e Berger & Gientke (1998).

As valas de infiltração também podem ser construídas em áreas urbanas, sob calçadas, avenidas ou estacionamentos. Pequenas obras de captação de água de chuva através de coberturas de edificações residenciais/comerciais podem ser realizadas, com direcionamento destas águas para valas rasas. As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram estes mecanismos de recarga.

3.2.2 SISTEMAS DE RECARGA EM PROFUNDIDADE

- TRINCHEIRAS E CAIXAS DE INFILTRAÇÃO

As trincheiras de infiltração são mecanismos de recarga que captam água de excedentes hídricos, armazenando-a e possibilitando uma infiltração lenta para os aquíferos freáticos. As trincheiras são construídas com material granular e geralmente revestidas para evitar a colmatção do sistema. Alguns autores descrevem caixas de recarga com características semelhantes às trincheiras de infiltração.

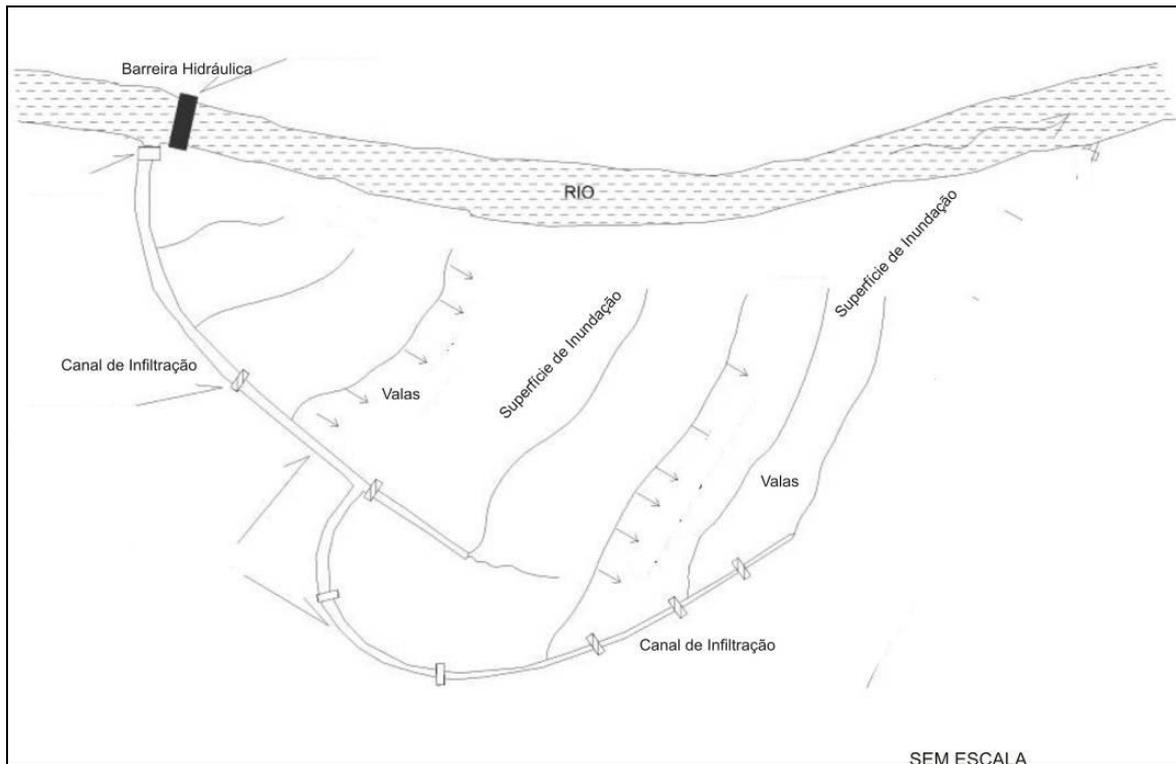


Figura 3.3 - Recarga em planície de inundação com valas e canais de desvio.

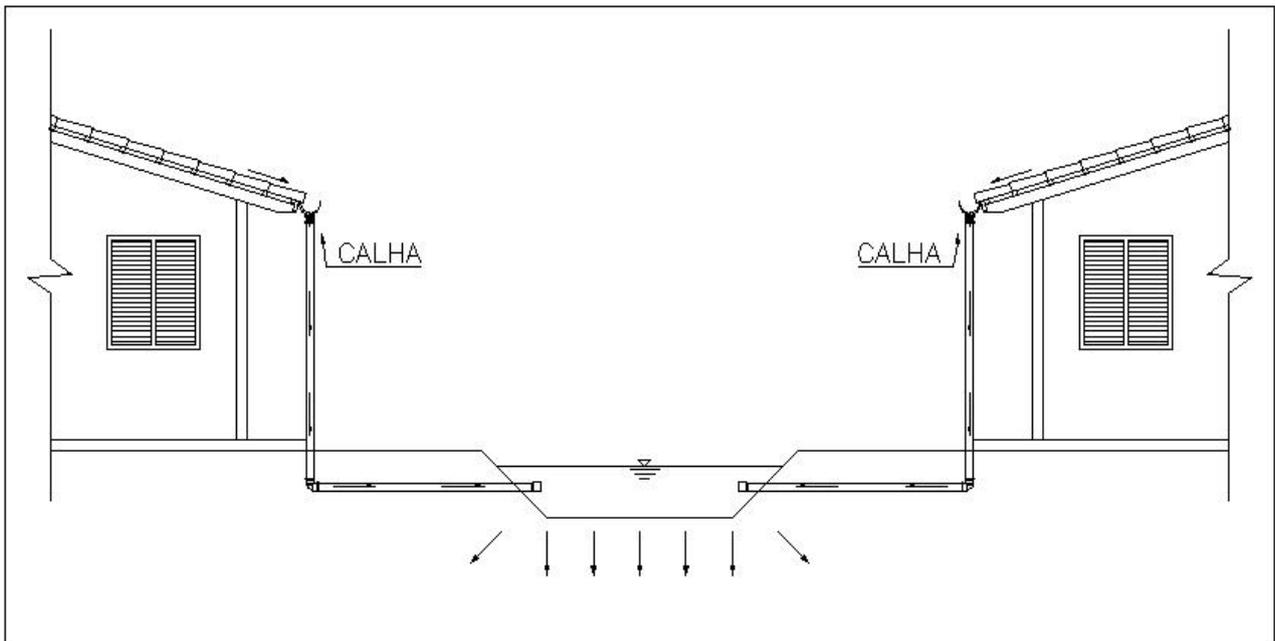


Figura 3.4 - Valas de Infiltração, com uso de água de chuva captada em telhados.

Segundo Diamantino (2005) as trincheiras de infiltração são escavações com aproximadamente 1 metro de largura e cerca de 10 metros de profundidade, preenchidas com material granular, areia grossa ou cascalho fino. A autora afirma que a utilização deste sistema de recarga é muito eficiente quando utilizada água com baixo teor de sólidos suspensos, evitando o

risco de entupimento do sistema. As trincheiras de infiltração correspondem a um dos mecanismos de recarga na zona vadosa de aquíferos, denominado por Bouwer (2002).

Souza & Goldenfum (2002) avaliam que trincheiras de infiltração são muito eficientes para drenagem urbana, reduzindo os riscos de inundação e são mecanismos de recarga artificial adequados para pequenas áreas de drenagem. A Figura 3.5 ilustra o mecanismo.

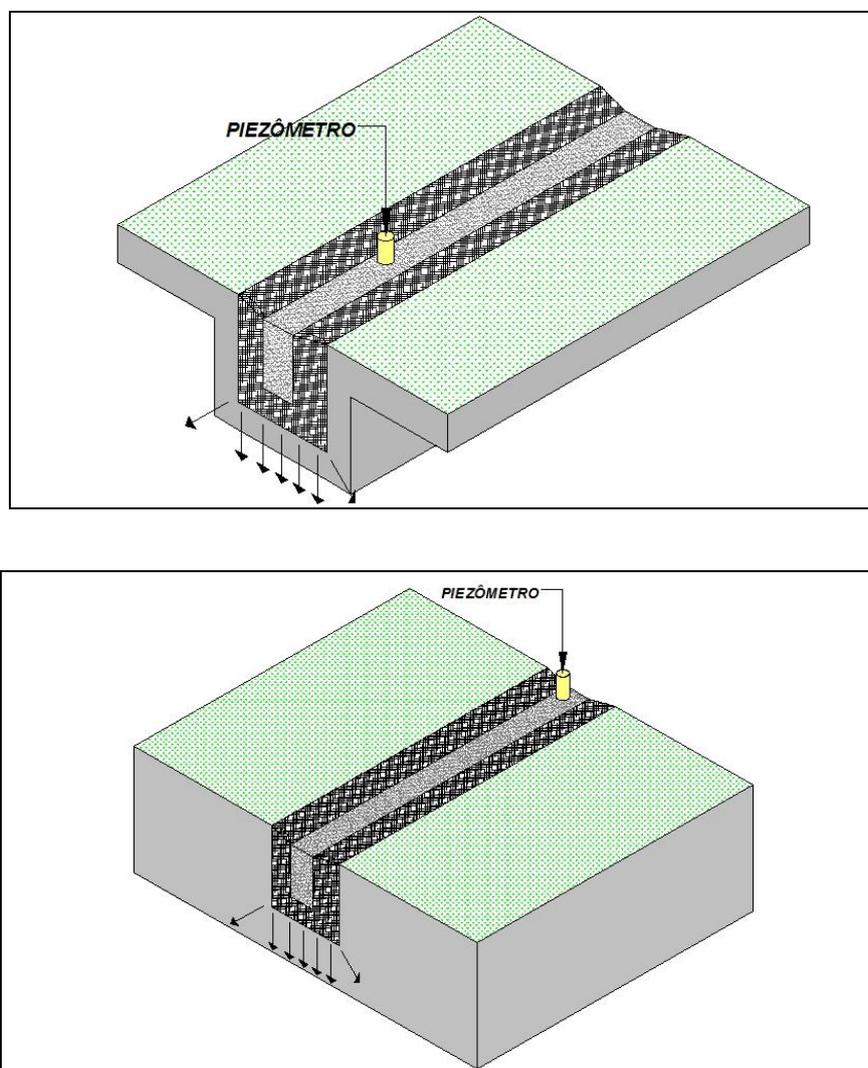


Figura 3.5 - Trincheiras de Infiltração (Souza & Goldenfum 2002).

- POÇOS DE RECARGA

Os poços de recarga são mecanismos construídos para captação de água em situações onde as técnicas de recarga em superfície são ineficientes ou inviáveis. Bouwer (2002) descreve poços de recarga perfurados na zona vadosa, com profundidades não superiores a 60 metros, e poços profundos, denominados também de poços de injeção, com profundidades variáveis.

Os poços rasos são perfurados preferencialmente em solos com elevada condutividade hidráulica e diâmetro médio de 1 metro. Os problemas com colmatção dos poços podem ser minimizados com a utilização de materiais granulares, como seixos e areia grossa.

Segundo Costa (2006) os poços de injeção são semelhantes aos poços tubulares profundos utilizados para extração de água e construídos com revestimento, filtros e pré-filtros. Os poços de injeção são utilizados nos casos em que não estão disponíveis zonas permeáveis na zona não saturada, quando a zona vadosa apresenta camadas impermeáveis e/ou em aquíferos confinados.

O autor afirma que os poços de recarga em profundidade permitem uma elevada taxa de recarga do aquífero, porém, são mais dispendiosos que os demais métodos de recarga artificial. A tecnologia para implantação e os requisitos de qualidade da água de recarga são mais exigentes do que nos sistemas de recarga na superfície ou na zona vadosa.

- POÇOS DE RECARGA E BOMBEAMENTO - ASR

Os poços de recarga e bombeamento, também conhecidos como *Aquifer Storage and Recovery-ASR*, são muito utilizados em diversas partes do mundo. A grande vantagem dos poços ASR é a possibilidade de recarga do aquífero, em períodos de excedentes hídricos, e bombeamento, em períodos de escassez.

Dos diversos mecanismos de recarga conhecidos, os poços ASR são os mais recentes e que apresentam maior incremento nos últimos anos. Maliva & Missimer (2010) descrevem os mecanismos de recarga utilizando poços ASR, nos últimos 60 anos, e os consideram extremamente vantajosos e necessários para a sustentabilidade das águas subterrâneas, no entanto, afirmam que as condicionantes hidrogeológicas locais devem ser previamente avaliadas, para evitar, principalmente, problemas com a qualidade das águas. A Figura 3.6 ilustra a aplicação de mecanismo de recarga em poços tipo *Aquifer Storage and Recovery*, em aquífero confinado.

Historicamente os mecanismos de recarga em regiões rurais, como barragens, canais e valas, eram muito comuns e representavam grande parte das técnicas de recarga artificial aplicadas no mundo. Com o avanço dos grandes centros urbanos e consequente impermeabilização, os poços de recarga tornaram-se os mecanismos mais usados para recarga artificial de aquíferos.

Os poços rasos, preenchidos por material granular e definidos dentro de certa profundidade, são muito eficazes no incremento da recarga dos aquíferos rasos e profundos. Em áreas urbanas, a utilização de poços, valas e trincheiras, para captação de água de chuva, é uma alternativa recomendável para diminuição e contenção de grandes cheias e enchentes.

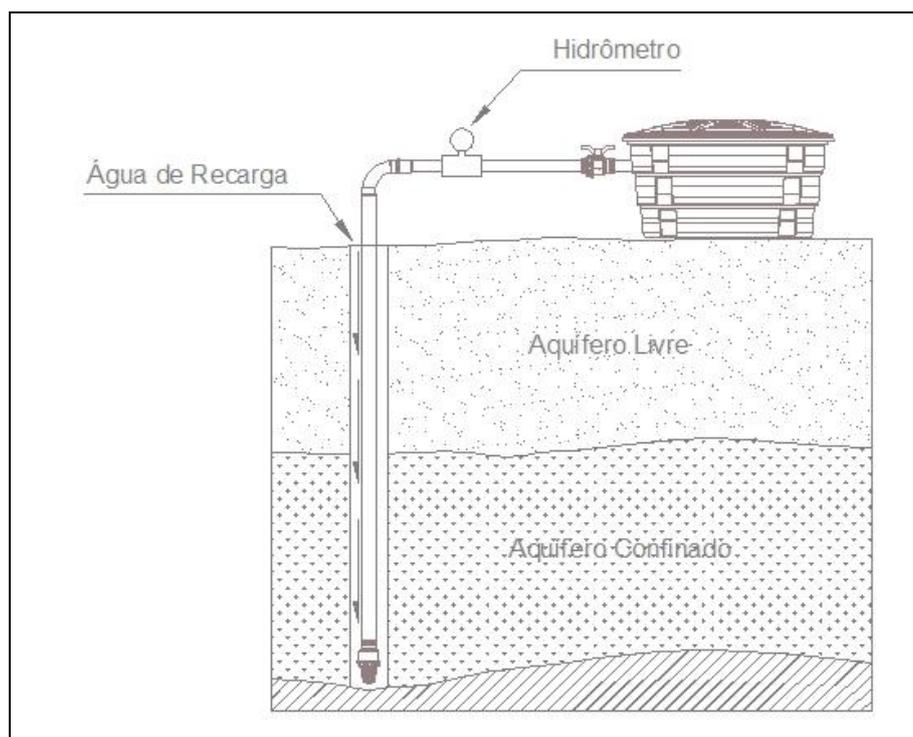


Figura 3.6 - Recarga direta por poços de injeção e bombeamento (*Aquifer Storage and Recovery*).

A maioria das técnicas de recarga artificial é realizada em aquíferos rasos. Nos aquíferos profundos a eficácia com uso de poços de injeção ou poços tipo *ASR* depende da porosidade do material rochoso. Em aquíferos fraturados a análise integrada de dados, com uso de imagens de satélite, fotografias aéreas, dados de poços próximos, geologia estrutural e geofísica, é fundamental para a eficácia da recarga artificial. O arranjo estrutural do aquífero irá definir seu potencial de recarga.

A recarga artificial em aquíferos fraturados é aplicada em diversas regiões do mundo. Entre os vários estudos sobre recarga artificial em aquíferos fraturados estão os trabalhos de Cadamuro *et al.* (2002), Murray & Tredoux (2002), Sankaranna (2002), Limaye (2002), Harrington *et al.* (2002), Palanisami (2005), Ismail *et al.* (2005), Shawky (2005), Eaton & Winship (2007), Heilweil *et al.* (2007), Dillon *et al.* (2010), entre outros.

3.3 HISTÓRICO E RECARGA ARTIFICIAL NO MUNDO

As práticas de recarga artificial de aquíferos, com o objetivo específico de aumentar a disponibilidade hídrica subterrânea, são atividades recentes. O grande incremento das práticas de recarga artificial ocorreu no final do século XIX, porém, práticas de acumulação de água em barragens são descritas há séculos. Em Machu Picchu, no Peru, no século XV, os Incas construíram canais e valas de recarga para conter inundações, deslizamentos de terra e drenar água de chuva (Blainey 2009).

Os primeiros usos de técnicas de recarga artificial de aquíferos provavelmente remontam às comunidades antigas, principalmente em regiões de clima árido, com longos períodos secos, onde a necessidade de acúmulo de água em raros períodos chuvosos era de extrema importância para o abastecimento das populações.

Trabalhos clássicos descrevem barragens construídas para favorecer a infiltração das águas de chuva no período romano. Há alguns séculos, se constroem represas em rios e em algumas ilhas áridas ao redor do mundo, com o objetivo de armazenar água em períodos de cheia. Em diversas regiões áridas os usos de técnicas de recarga artificial são extremamente comuns (Lluria 1998, Attia *et al.* 1998, Sadek & Fadel 1998, Viswanathan & Senafly 1998, Gerard 2002, Ramasesha *et al.* 2002, El-Sheikh & Hamdan 2002, Zeelie 2002, Gale 2005, Gossel *et al.* 2005, Ismail *et al.* 2005, Salajegheh & Keshtkar 2005, Heilweil *et al.* 2007, Fathelbari & Masoud 2010, entre outros).

Registros de uso de técnicas de recarga artificial são comuns na Europa desde o final do século XIX, sendo amplamente difundida em diversos países, com inúmeros trabalhos publicados. No início dos anos 70, a Associação Internacional Científica de Hidrologia (IASH) e a UNESCO publicaram uma compilação de trabalhos sobre recursos hídricos e recarga artificial de aquíferos (IASH 1970). O primeiro simpósio internacional sobre recarga artificial ocorreu em 1979, em Dortmund, na Alemanha.

As primeiras técnicas de recarga artificial de aquíferos, na sociedade moderna, ocorreram nas regiões de Duseldorf e Dresden, na Alemanha, em 1870. Eckert *et al.* (2005) e Fischer & Grischek (2005) descrevem sistemas de recarga artificial que contribuem para o incremento dos sistemas de abastecimento de água potável das respectivas regiões.

Na Alemanha, desde o início do século XX são conhecidas normas para projetos de barragens de recarga objetivando solucionar passivos ambientais e problemas bacteriológicos, em águas para abastecimento. Canais de infiltração preenchidos com areia são muito utilizados para captação de água em períodos de cheias (Eckert *et al.* 2005).

Diversas técnicas de recarga artificial são aplicadas em várias cidades alemãs, e as práticas de infiltração de águas fluviais em barragens com fundo de areia são muito comuns. Poços de injeção e poços *ASR*, valas em canais e drenos enterrados também são mecanismos de recarga bastante utilizados na Alemanha.

Desde 1959 existe um mecanismo que recarrega água tratada do rio Sena, na França. Fournier *et al.* (2005) estudaram as condições de transporte de particulados associados com aquíferos cársticos e a consequente interferência em mecanismos de recarga artificial, na região do rio Sena. Segundo Haeffner *et al.* (1998) as técnicas de recarga artificial são indispensáveis para a manutenção do potencial hídrico da região de Paris.

Na Holanda os mecanismos de recarga artificial são os responsáveis pela manutenção do potencial hídrico e abastecimento de água potável desde meados do século XIX. Problemas nos padrões de qualidade das águas que abasteciam a cidade de Amsterdã induziram a perfuração de canais de recarga em dunas próximas da região. Os sistemas de recarga continuam contribuindo com o abastecimento de água potável e são extremamente eficazes, com boa qualidade das águas (Horst 1998, Mosch 1998 e Olsthoorn & Mosch 2002).

Cerca de 75% da água potável disponível para a cidade de Amsterdã são oriundas destas regiões de dunas. Diversas publicações mostram a regularidade do uso da recarga artificial de aquíferos na Holanda (Ruiten & Stuyfzand 1998, Stuyfzand 1998, Duijvenbode & Olsthoorn 1998, Hoogendoorn 2002, Jonge *et al.* 2002, Drijver & Willemsen 2005, Stuyfzand *et al.* 2005, Stuyfzand *et al.* 2007a, Stuyfzand *et al.* 2007b, entre outros).

A recarga artificial também é utilizada na Espanha (Diaz *et al.* 2000, Escalante & Senent 2010, Escalante 2005) e na Itália (Passadore *et al.* 2010), entre outros países europeus.

Nos Estados Unidos diversos autores descrevem aplicações de recarga na região de Los Angeles, com utilização de poços de recarga para controle da intrusão marinha. Edworthy & Downing (1979) citam a experiência com 200 valas para infiltração de água de escoamento urbano, com capacidade para 114.000 m³/dia, no estado de Nova York.

Berger & Gientke (1998) descrevem modelos de barragens construídas para captação de água e recarga artificial de aquíferos no litoral da Califórnia. O avanço da intrusão marinha, ocasionado pela superexploração dos aquíferos desde os anos 1940 foi significativo e, desde então, as técnicas de recarga artificial são amplamente aplicadas no estado da Califórnia. Wendel & Glanszman (1998) também descrevem sobre a aplicação de recarga artificial na Califórnia, com usos de poços tipo *ASR*.

Pyne (2002) mostra o incremento dos sistemas de recarga nos Estados Unidos e cita 56 sistemas tipo *ASR*, com grande preocupação com a qualidade das águas de recarga. Os poços tipo *ASR* são amplamente utilizados nos Estados Unidos, Europa e Austrália. Em 2005, havia mais de 300 sistemas tipo *ASR*, nos Estados Unidos (David & Pyne 2005), e em 2007 mais de 1000 poços *ASR* em uso ou em implantação no país.

O reuso de águas e recarga através de poços *ASR*, nos Estados Unidos, é destacado em diversos trabalhos e a preocupação com a qualidade das águas injetadas é uma constante (Bouwer 1998, Fujita *et al.* 1998, Mills 2002, Asano *et al.* 2002, Dillon *et al.* 2005, Woodside & Wehner 2007, Gamache *et al.* 2010, Mirecki 2010).

Na Austrália a recarga artificial também é amplamente difundida, com diversas publicações sobre o tema (Bosher *et al.* 1998, Dillon & Pavelic 1998, Vanderzalm *et al.* 2002, Barry & Dillon

2005, Pipe-Martin 2005, Rinck-Pfeiffer *et al.* 2005, Malcolm & Wilson 2005, Gorey & King 2005, Barry *et al.* 2007, Harris *et al.* 2010, entre outros). Os mecanismos de recarga com poços tipo ASR estão em crescente uso na Austrália, como observado nos trabalhos de Dillon *et al.* (2010), Franklin & Butcher (2010), Franklin *et al.* (2010) e Evans (2010).

Na China, os primeiros experimentos foram realizados em Pequim, no ano de 1960, porém aplicados regularmente apenas em 1990 (Yao *et al.* 2002). Outras aplicações de recarga artificial foram posteriormente efetivadas (Zaisheng 2002 e Pei *et al.* 2002).

Em diversos países do mundo a recarga artificial de aquíferos é uma prática comum, em outros, ainda é uma prática pouco usual, ou totalmente desconhecida. Diversos países africanos (Tredoux *et al.* 2002, Attia *et al.* 1998, Egboga & Okoro 2007, Murray *et al.* 2007) e asiáticos, como Índia, Irã e Israel (Malik *et al.* 2002, Kalantari & Goli 2005, Salim & Wilde 2005, Gaus *et al.* 2007, Hollander *et al.* 2007, Perrin *et al.* 2010) utilizam a recarga artificial com regularidade. Em Israel as técnicas de recarga artificial alcançaram grande desenvolvimento e são responsáveis pelo incremento no abastecimento de água em várias regiões do país. Em Cuba a recarga artificial é uma prática extremamente comum e utilizada principalmente para contenção da intrusão marinha.

Na América do Sul as técnicas de recarga são pouco difundidas e, raros são os exemplos de usos significativos de sistemas de recarga artificial de aquíferos. Na região da Filadélfia, no Chaco Paraguai, existe um sistema de recarga por caixas escavadas diretamente na zona não saturada do aquífero (tajamares), que recebem o fluxo superficial e otimizam a recarga em uma região em que a água subterrânea é naturalmente muito salinizada (Godoy *et al.* 1994).

Bucich (2005) aplicou um modelo matemático para avaliar as condições de recarga na província de San Luis, região árida, situada na porção oeste da Argentina. Os estudos provaram a viabilidade dos mecanismos de recarga artificial, com possível redução da evapotranspiração e aumento das reservas hídricas subterrâneas. São conhecidas experiências na região do rio San Juan, com barramentos construídos para captação de água em períodos de cheia.

Nos últimos anos as práticas de recarga artificial de aquíferos tornaram-se extremamente comuns e eficazes no gerenciamento de recursos hídricos em diversas regiões do mundo. A ampliação de projetos e experimentos envolvendo recarga artificial é evidenciada com o crescente número de publicações sobre o tema, com destaque para os trabalhos publicados em sete edições do *International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*, realizados na Califórnia (1988), Flórida (1994), Amsterdã (1998), Adelaide (2002), Berlim (2005), Phoenix (2007) e Abu Dhabi (2010). O Brasil não acompanhou os avanços dos últimos anos e a prática de recarga artificial de aquíferos ainda é incipiente. Os escassos exemplos no Brasil serão apresentados a seguir.

3.4 RECARGA ARTIFICIAL NO BRASIL

A recarga artificial no Brasil é uma prática ainda incipiente. Na última década algumas técnicas foram aplicadas em regiões específicas e com resultados vagamente conhecidos ou disseminados. A recarga artificial de aquíferos não é uma técnica comumente usada no país, mas alguns avanços existem, com projetos acadêmicos experimentais e com a ampliação da agenda de discussões sobre gestão das águas subterrâneas. Em 2008 o Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH publicou a Resolução 92/2008, que condiciona a implantação de mecanismos de recarga artificial de aquíferos após autorização do órgão ambiental competente.

No final dos anos 90 iniciaram-se estudos visando à aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados, em área de condomínio horizontal na Região Administrativa de Sobradinho, Distrito Federal (Cadamuro 2002, Cadamuro *et al.* 2002 e Cadamuro & Campos 2005). Os autores avaliaram técnicas de recarga artificial em aquíferos profundos, com captação de água de chuva através de calhas, em telhados experimentais (Figura 3.7).

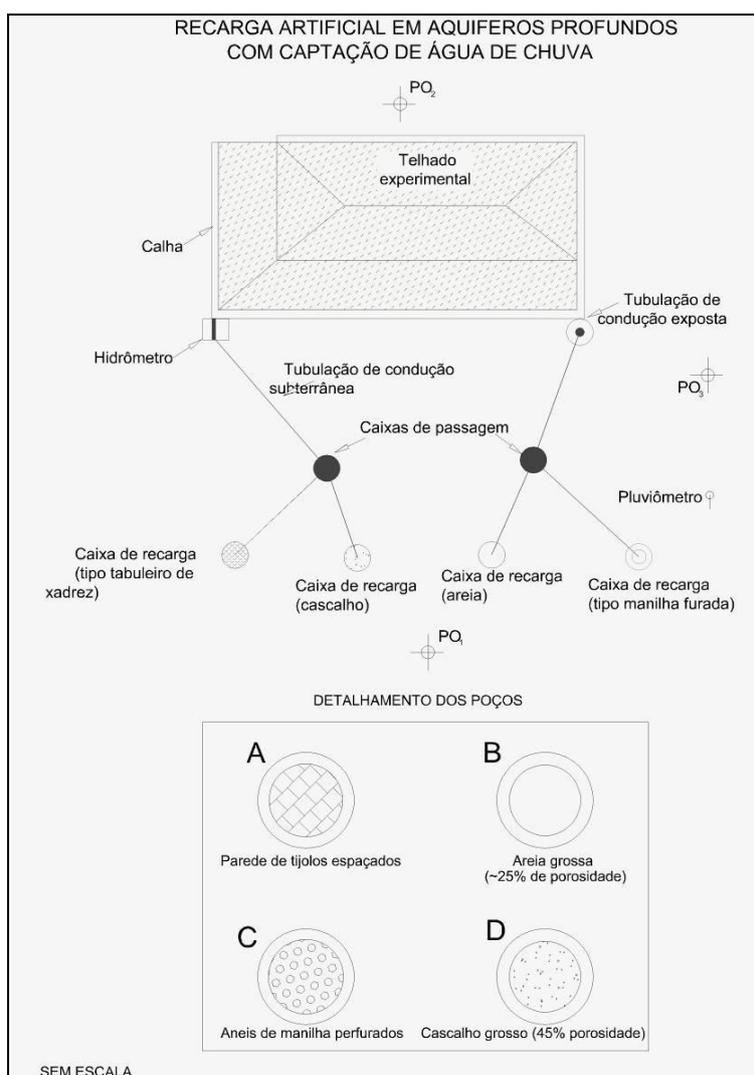


Figura 3.7 - Poços de Recarga, sistema indireto de (Cadamuro 2002, Cadamuro *et al.* 2002, Cadamuro & Campos 2005).

Foram testadas duas técnicas distintas de recarga artificial, com injeção direta e indireta de água no aquífero fraturado. A recarga indireta é realizada por caixas de recarga rasas, através da zona não saturada do aquífero freático, enquanto que a recarga direta era direcionada para as fraturas dos aquíferos, através de um poço de injeção com 180 metros de profundidade. As caixas cilíndricas têm 1 metro de diâmetro e 2,5 metros de profundidade, tendo sido testados quatro sistemas de caixas de recarga: uma revestida com anéis de manilhas perfuradas, uma revestida com parede de tijolos espaçados, uma preenchida com areia grossa (~25% de porosidade) e uma preenchida com cascalho grosso (40% de porosidade).

Os resultados alcançados sugerem que as técnicas de recarga aplicadas possibilitam aumento da disponibilidade hídrica, com o incremento das áreas de recarga e minimização dos efeitos da impermeabilização do local, funcionando como importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos da região.

Na cidade de Recife, Silva (2004), Silva *et al.* (2004) e Montenegro *et al.* (2005) utilizaram técnicas de recarga artificial de aquíferos com águas pluviais. Através de sistemas pilotos experimentais (Figura 3.8) e modelos matemáticos, foram definidos cenários futuros possíveis que objetivem recuperar os níveis potenciométricos do aquífero costeiro, impedindo o avanço da cunha salina e contribuindo com a qualidade das águas dos aquíferos contaminados. Os autores utilizaram um sistema de poço de injeção, com captação de água de chuva através de calhas em telhados e reservatórios em superfícies impermeabilizadas de um condomínio residencial, com área total de 2.270 m². Os resultados foram extremamente satisfatórios, possibilitando simular um cenário com vazão de 2.160 litros/hora, injetados durante três horas por dia, durante os três meses de chuvas mais intensas.



Figura 3.8 - Sistema de tubos para captação de águas pluviais, proposto por Silva (2004), Silva *et al.* (2004) e Montenegro *et al.* (2005).

Experimento semelhante, na cidade de Taubaté, estado de São Paulo, utilizou dois poços de recarga para injeção de águas pluviais oriundas dos telhados da Universidade de Taubaté (Figura 3.9). Além de funcionar como poços de injeção para recarga artificial, também realizavam bombeamento de água para irrigação de culturas experimentais realizadas no campus (Diniz *et al.* 2007 e Diniz *et al.* 2008). Os mecanismos utilizados são semelhantes aos poços ASR.

Os autores monitoraram o aquífero em ensaios e utilizaram uma teoria denominada de poço imagem espelho d'água, que mostrou que o cone de recarga tem um comportamento similar ao de um cone de rebaixamento, e concluíram que a vazão de extração pode ser a mesma vazão recarregada. Os resultados são favoráveis à ampliação dos mecanismos de recarga artificial para o aquífero pesquisado.



Figura 3.9 - Sistema de recarga artificial proposto por Diniz *et al.* (2007) e Diniz *et al.* (2008).

Chagas (2008) descreve sistemas de captação de águas de chuvas em estacionamentos e em diversas áreas impermeabilizadas no Clube de Engenharia de Goiás, na cidade de Goiânia. As captações das águas pluviais são realizadas através de 256 poços rasos de pequeno diâmetro, entre 15 e 30 cm (Figura 3.10), em uma área de aproximadamente 14.700 m². Dentre os resultados alcançados pela recarga destacam-se a elevação do nível freático local, com afloramento de uma antiga nascente e diminuição significativa das áreas alagadas no clube.

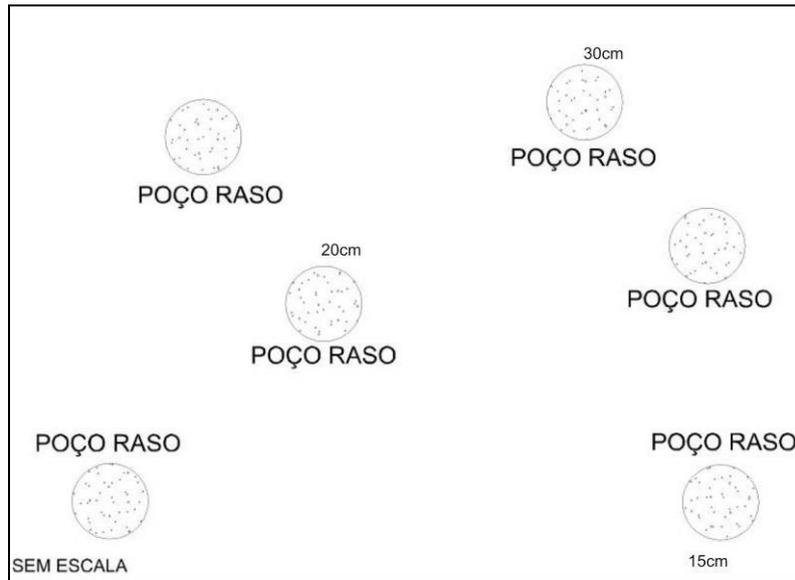


Figura 3.10 - Diversos poços de infiltração em estacionamento (Chagas 2008).

No município de Araçuaí, em Minas Gerais, foram construídas 96 barragens para captação de água de chuva e contenção de enxurradas. As barragens possuem áreas variáveis, algumas com 14 metros de diâmetro e 1,2 metro de profundidade, e em geral captam pequenos volumes de água. Os resultados alcançados em 2 anos com uso da recarga artificial são satisfatórios, principalmente com elevação do nível freático local em 6 metros (Embrapa 2011). As barragens contribuíram para redução dos processos erosivos, aumento da disponibilidade hídrica subterrânea e melhoria da qualidade da água do aquífero freático.

Em ambos os projetos experimentais a avaliação da qualidade da água foi fundamental e os resultados alcançados demonstraram que o uso de técnicas de recarga artificial é viável para a recuperação dos níveis potenciométricos dos aquíferos locais, desde que estabelecidos padrões de qualidade para as águas de recarga.

Segundo Hespagnol (2002) as práticas de recarga artificial de aquíferos, utilizando efluentes domésticos tratados, representarão um grande avanço na disposição de águas servidas, contribuindo com o aumento da disponibilidade hídrica, proteção de aquíferos costeiros, controle de subsidência de terrenos e sustentabilidade de aquíferos freáticos submetidos à superexploração. Os sistemas de tratamento para remoção de compostos orgânicos e inorgânicos, bem como para remoção de organismos patogênicos, são fundamentais para o sucesso da aplicação das técnicas de recarga artificial.

3.5 BENEFÍCIOS E PROBLEMAS COM USO DA RECARGA ARTIFICIAL

De acordo com as definições clássicas acerca das diversas técnicas de recarga artificial de aquíferos, e conhecimento de seu objetivo principal que compreende aumentar a disponibilidade de água dos aquíferos, é possível destacar outras aplicações e benefícios da recarga artificial de aquíferos:

- Diminuição do escoamento superficial das águas pluviais, contribuindo com o equilíbrio do ciclo hidrológico, com conseqüente diminuição de eventos críticos de enchentes, deslizamentos de terra, entre outros;
- Controle da intrusão marinha, com elevação dos níveis freáticos e conseqüente melhoria qualitativa e quantitativa dos aquíferos costeiros;
- Contenção do desenvolvimento de processos erosivos, com diminuição do fluxo superficial;
- Melhoria na qualidade de águas contaminadas, com diluição das plumas de contaminação através da injeção de água de melhor qualidade;
- Mitigação dos efeitos de subsidência do terreno;
- Diminuição da evaporação em regiões de climas áridos, com injeção e armazenamento de água no subsolo;
- Regularização das vazões dos cursos de água;
- Armazenamento de água em períodos específicos;
- Regulação da temperatura e pH das águas;
- Elevação dos níveis freáticos de aquíferos rasos, submetidos à sobreexploração;
- Maximização da função reservatório dos aquíferos.

Os projetos de recargas em superfície utilizam a zona vadosa dos aquíferos como filtros naturais e são muito eficazes na depuração física, química e biológica. O processo de depuração natural da água em zonas não saturadas dos aquíferos é conhecido na literatura como *Soil Aquifer Treatment - SAT* (Tratamento Solo Aquífero). Sharma *et al.* (2010) realizaram um experimento utilizando o *SAT* para tratamento de águas residuais na Holanda e concluíram que o sistema é uma ótima opção para o tratamento de águas residuais e reuso.

A recarga artificial é um excelente instrumento de gestão dos recursos hídricos, no entanto, alguns problemas podem ocorrer nos modelos de infiltração e prejudicar a eficácia dos mecanismos ou degradar a qualidade das águas subterrâneas.

Bouwer (2002) afirma que os principais problemas dos mecanismos de recarga artificial são o entupimento ou obstrução dos sistemas de recarga, com deposição de materiais finos na base e conseqüente diminuição da recarga efetiva, além dos aspectos qualitativos da água. Os problemas com entupimento dos poços de recarga podem comprometer a recarga efetiva ao longo de um

determinado período. A qualidade da água e os mecanismos de recarga aplicados definem as chances de entupimento dos sistemas de recarga artificial.

O entupimento dos sistemas de recarga artificial é causado por processos físicos, desenvolvido por sólidos orgânicos ou inorgânicos depositados; químicos, com reações químicas entre o material geológico e as águas de recarga; além dos processos biológicos, com o acúmulo de algas, bactérias ou qualquer outro micro-organismo presente nas águas de recarga (Bouwer 2002).

Existem inúmeros trabalhos que tratam dos problemas de entupimento de sistemas de recarga entre eles os de Pérez-Paricio & Carrera (1998), Pavelic *et al.* (1998), Zare *et al.* (2002), Buik & Willemsen (2002), Gunkel & Hoffmann (2005), Hollander *et al.* (2005), Pavelic *et al.* (2007), Barry *et al.* (2007), Morris (2007), Nadee *et al.* (2010), Sharma *et al.* (2010), entre outros.

A qualidade da água de recarga é outro importante critério para determinação do modelo de recarga artificial que será aplicado. As plantas piloto são fundamentais para o conhecimento e planejamento adequado do método de recarga artificial mais eficiente. A qualidade da água vai definir a técnica de recarga aplicada e o sistema de tratamento adequado antes da aplicação efetiva da recarga artificial.

Na maioria dos casos os mecanismos de recarga utilizados são em superfície, sem qualquer tratamento prévio das águas, utilizando-se apenas da depuração natural. Nos casos de recarga em profundidade, com injeção em poços de recarga, os sistemas de tratamento são recomendados de acordo com a qualidade da água que será utilizada.

CAPÍTULO 4

ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE MECANISMOS DE RECARGA ARTIFICIAL DE AQUIFEROS NA REGIÃO DE CALDAS NOVAS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O aumento populacional e a ampliação da demanda por água na região de Caldas Novas resultaram em um desequilíbrio no ciclo hidrológico, com aumento desordenado da exploração dos recursos hídricos subterrâneos. A necessidade de gestão sustentável é uma realidade e os mecanismos de recarga artificial são ferramentas poderosas para auxiliar o gerenciamento.

A correta gestão dos recursos hídricos subterrâneos é fundamental para a manutenção do potencial hidrotermal e da disponibilidade existentes e o presente estudo pretende abordar a aplicação de técnicas de recarga artificial utilizando as águas descartadas das piscinas. Os mecanismos de recarga propostos são caixas de recarga (na zona não saturada) e poços de injeção (na zona saturada).

Para que a proposta metodológica para a recarga artificial seja bem sucedida é necessário que o modelo hidrogeológico conceitual seja bem entendido, de forma que sistemas pilotos sejam instalados e quantificados de acordo com as características dos sistemas aquíferos locais. O conhecimento das características da água de recarga também é fundamental para a definição dos modelos que deverão ser aplicados no tratamento das águas utilizadas.

O sucesso da recarga artificial, e correto desenvolvimento do modelo hidrogeológico local, requer uma integração de informações do meio físico, incluindo geologia, hidrogeologia, geomorfologia, solos, clima, e análises qualitativas das águas que serão utilizadas na recarga.

Uma compilação de dados existentes sobre a região, cedidos pela AMAT, e as publicações técnicas disponíveis (Campos & Costa (1980), Drake Jr. (1980), Barreto Filho e Costa (1981), Tröger *et al.* (1999), Campos *et al.* (2000), Haesbaert & Costa (2000), Cadamuro *et al.* (2000), Peixoto Filho (2000), Gil (2001), Tröger *et al.* (2004), Del' Rey Silva *et al.* (2004), Cunha (2007), Tröger (2007), Del' Rey Silva *et al.* (2008) e Campos *et al.* (2009)), integram a pesquisa e foram fundamentais para compreensão dos modelos hidrogeológicos e proposição dos mecanismos de recarga artificial e planta piloto de tratamento de água.

Para alcançar os modelos propostos foram realizados vários estudos e inúmeras atividades de campo que objetivaram, principalmente, o completo conhecimento hidrogeológico, incluindo condições hidráulicas e reservas dos aquíferos, e a definição dos mecanismos de tratamento de efluentes termais.

Os estudos aplicados e integrados para proposição e implantação do mecanismo de recarga artificial e planta piloto de tratamento de água são descritos a seguir.

4.2 TRABALHOS PRÉVIOS

Dois trabalhos prévios específicos são apresentados a seguir e integram os estudos que subsidiaram a implantação dos mecanismos de recarga artificial na região de Caldas Novas. Cadamuro *et al.* (2000) realizaram ensaios de infiltração *in situ* e caracterizaram as condutividades hidráulicas dos solos da região de Caldas Novas, e Cunha (2007) realizou uma caracterização geoeletrica por método eletromagnético e de eletrorresistividade e identificou algumas anomalias geofísicas na região. Campos & Costa (1980) e Barreto Filho & Costa (1981) realizaram estudos geofísicos por magnetometria e gravimetria, respectivamente, e também contribuíram para o entendimento hidrogeológico local.

4.2.1 ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO IN SITU - SISTEMA AQUÍFERO INTERGRANULAR

Cadamuro *et al.* (2000) realizaram ensaios de infiltração *in situ* através dos métodos dos anéis concêntricos e *open end hole* e definiram a condutividade hidráulica dos Latossolos, Neossolos Litólicos e Cambissolos presentes na região da cidade de Caldas Novas e no platô da Serra de Caldas. Os autores realizaram 15 ensaios de infiltração distribuídos pela região e nos diferentes tipos de solos. Os Latossolos Vermelho Amarelos são amplamente dominantes e possuem elevada condutividade hidráulica.

Os valores de condutividade hidráulica em superfície, obtida pelo método dos anéis concêntricos, oscilaram entre 4×10^{-4} e 5×10^{-5} m/s. Os autores descrevem que os Latossolos Vermelho Amarelos possuem elevada condutividade hidráulica e no topo da Serra de Caldas são altamente permeáveis, com presença de estratos arenosos. As menores condutividades hidráulicas estão associadas aos Neossolos Litólicos e Cambissolos, presentes na borda da Serra de Caldas e em algumas áreas no perímetro urbano da cidade.

As condutividades hidráulicas em profundidades, entre 0,5 e 4 metros, variaram de 10^{-5} a 10^{-8} m/s, com valores elevados associados aos Latossolos Vermelho-Amarelos arenosos no topo da Serra de Caldas, taxas moderadas a elevadas nos Latossolos Vermelhos no domínio do sistema aquífero Araxá, na região central da cidade, e baixa condutividade hidráulica nos Cambissolos e Neossolos Litólicos.

Os dados apresentados pelos autores corroboram com a idéia de uma região propícia para a implantação de mecanismos de recarga artificial de aquíferos, com grandes áreas com elevado potencial de recarga, devido aos valores elevados de condutividade hidráulica dos solos, aliada à superfície plana a suave ondulada em grande parte da região.

A região que compreende o platô da Serra de Caldas está inserida no interior do Parque Estadual de Caldas Novas e se encontra preservada, mantendo os elevados potenciais de recarga, porém, a área que envolve o perímetro urbano da cidade de Caldas Novas possui poucas áreas

disponíveis para recarga, devido à ocupação urbana e ampliação da impermeabilização (pavimentação, edificações, calçadas, etc.).

4.2.2 GEOFÍSICA

Cunha (2007) realizou levantamento geofísico na região de Caldas Novas em que foram aplicadas duas diferentes metodologias. No platô da Serra de Caldas foi aplicado o método eletromagnético no domínio do tempo. Na área urbana foi aplicado o método elétrico de corrente contínua (eletrorresistividade) com uso de caminhamento elétrico e com espaçamento constante de 100 metros entre as estações de leitura, no arranjo de campo dipolo-dipolo. Foram realizadas 4 seções geofísicas no platô da Serra de Caldas e 8 seções distribuídas na área urbana, e desenvolvidas ao longo de perfis.

A aplicação das duas metodologias geofísicas teve como principal objetivo determinar a possível presença de zonas fraturadas/falhadas e a espessura das rochas quartzíticas através da associação indireta com a variação lateral e vertical da resistividade elétrica. Os resultados devem facilitar a locação dos pontos para recarga nos sistemas pilotos.

No método eletromagnético faz-se circular uma corrente elétrica alternando períodos de tempo ligado-desligado. Com isso, induz-se um campo magnético onde a interrupção do fluxo não é instantânea, mas ocorre durante um breve período de tempo (alguns microssegundos), durante o qual o campo magnético é variável com o tempo.

O método eletromagnético do domínio do tempo emprega um transmissor que impulsiona uma corrente alternada através de um *loop* quadrangular de cabos elétricos isolados, posicionados na superfície do terreno. O *loop* aplicado ao estudo tem 300 metros de lado e a aquisição foi feita no sistema *in loop*, isto é, o receptor foi posicionado no centro da bobina.

Os resultados das inversões foram reunidos em pseudo-seção 2D em que foi possível identificar, através da projeção na superfície do terreno, a variação vertical e lateral da resistividade elétrica. A Figura 4.1 mostra exemplo de uma seção obtida por método eletromagnético. No exemplo de resultado apresentado, a inversão dos dados de resistividade aparente em resistividade real resultou em um modelo geoeletrico de três camadas:

- a primeira associada ao Sistema Aquífero Intergranular, com espessuras entre 20 e 10 metros,
- a segunda com espessura variável entre 170 e 250 metros associada à porção psamítica do Sistema Aquífero Paranoá, e;
- a mais profunda é interpretada como a porção mais pelítica do Sistema Aquífero Paranoá (Figura 4.1). As variações bruscas nas espessuras das camadas geoeletricas são interpretadas como falhas

que movimentam blocos do conjunto litológico. Estas estruturas podem apresentar rejeitos variáveis de dezenas de metros até pouco mais de 100 metros.

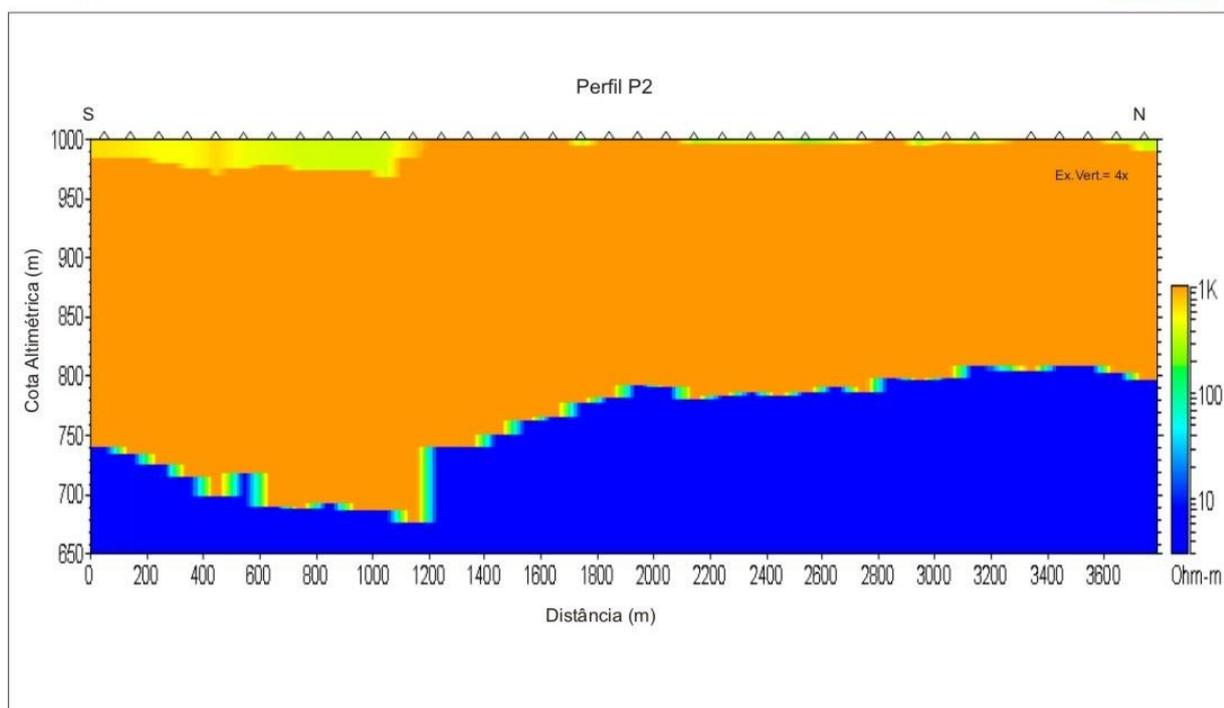
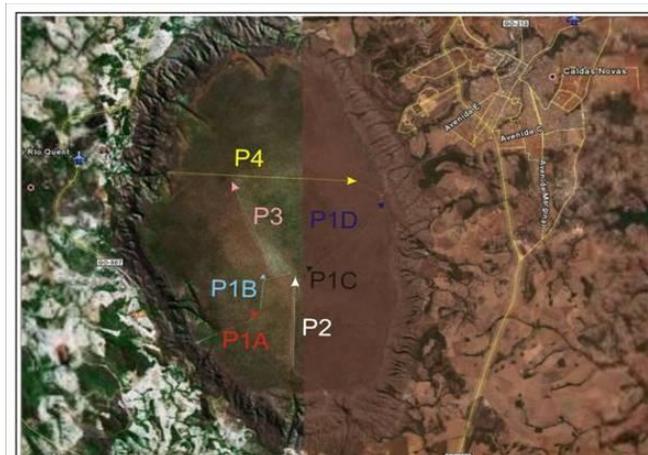


Figura 4.1 - Exemplo de seção de resistividade aparente na Serra de Caldas (Cunha 2007).

No perímetro urbano da cidade de Caldas Novas foram realizados 8 perfis de caminhamentos elétricos. Na região central da cidade as seções de resistividades aparentes mostraram anomalias elétricas interpretadas como descontinuidades indicativas de importantes zonas de fraturas/falhas no Sistema Aquífero Araxá, responsáveis pelo armazenamento e transporte ascendente das águas termais. As seções elétricas, com sistemas de fraturas/falhas interpretados, são apresentadas na Figura 4.2.

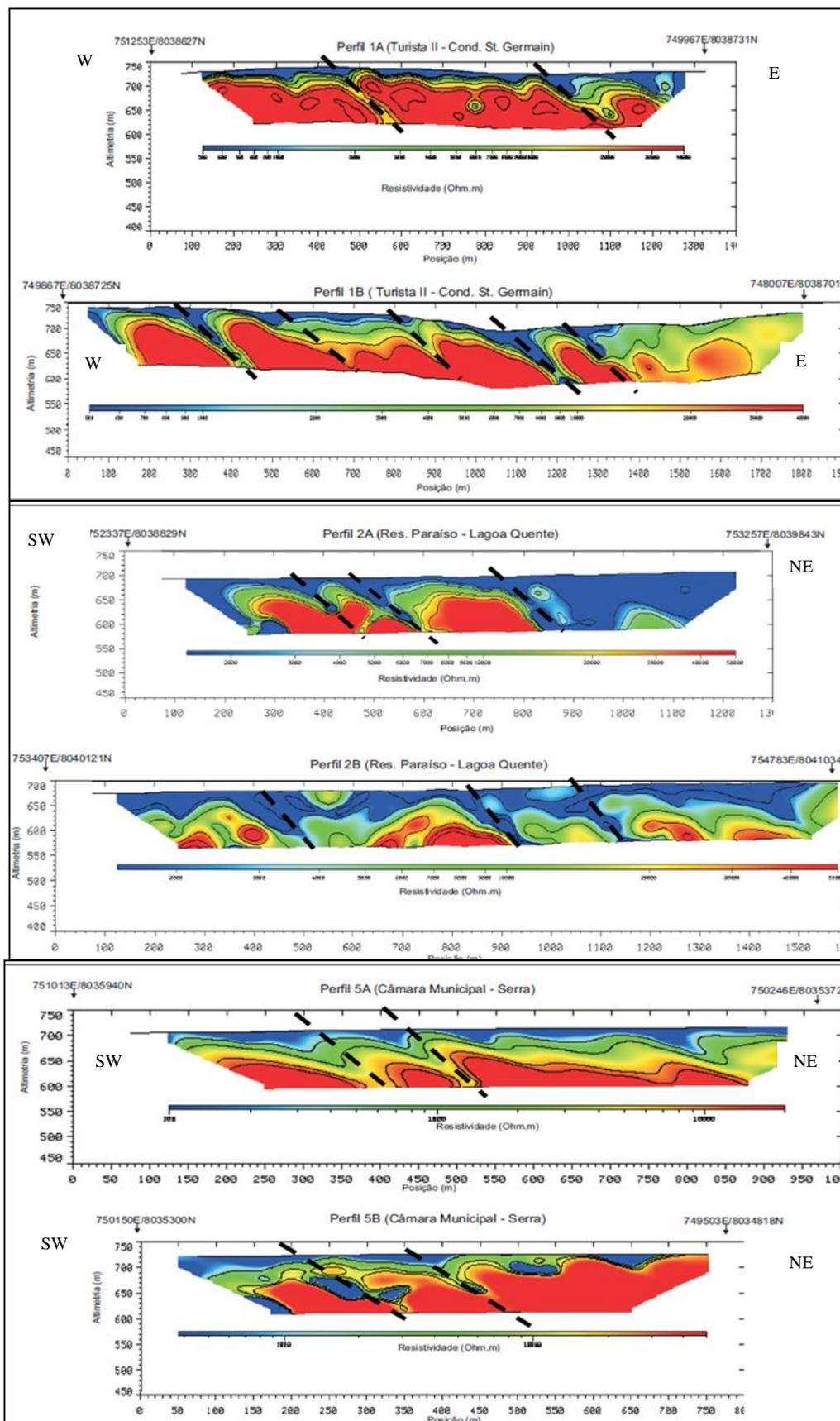


Figura 4.2 - Exemplos de seções de caminhamentos elétricos na região central de Caldas Novas com indicação de prováveis estruturas rúpteis (zonas de fraturas e falhas) (Cunha 2007).

Os resultados obtidos a partir do processamento dos dados de campo foram apresentados na forma de seções de resistividade aparente que depois da adequada inversão resultou em seções de resistividade. As seções foram interpretadas através da associação indireta com a variação lateral e vertical da resistividade elétrica e traduzem possíveis zonas anômalas que, na região de Caldas Novas, são interpretadas como sistemas de fraturas/falhas responsáveis pelo desenvolvimento de zonas de maior circulação que controlam o fluxo descendente a grandes profundidades.

O arranjo das atitudes destas discontinuidades representa a principal direção de anisotropias observadas nos estudos de geologia estrutural e são coerentes as reativações observadas no Evento E₂, Fase de deformação F₅.

No caso dos resultados das seções realizadas na Serra de Caldas observa-se uma nítida coincidência entre as anomalias geofísicas e os lineamentos estruturais obtidos de análise direta sobre imagens de satélite.

4.3 PERFILAGEM ÓTICA DOS POÇOS TERMAIS

Foram realizadas perfilagens óticas em quatro poços tubulares profundos previamente selecionados para integrar o sistema de recarga artificial piloto. As filmagens atingiram profundidades máximas de 312 metros e foram úteis para a observação de entradas d'água, avaliação dos sistemas de fraturas e verificação das condições construtivas atuais dos poços. A Figura 4.3 apresenta os equipamentos utilizados para a realização da perfilagem ótica nos poços tubulares, e o início da filmagem no poço denominado Tamburi, posteriormente selecionado para compor o sistema de recarga artificial piloto.

O principal resultado deste procedimento foi a confirmação de sistemas de fraturas com aberturas maiores que 20 centímetros e registro de intenso fluxo de água nestas estruturas. Com a perfilagem foi possível visualizar a situação construtiva atual dos poços, com problemas de desgaste no tubo de revestimento, rompimento de paredes e filtros e proliferação de ferro-bactérias.



Figura 4.3 - Equipamento de Perfilagem Ótica e início de filmagem no Poço Tamburi.

A perfilagem ótica realizada no Poço Tamburi alcançou a profundidade de 60,78 metros e foi interrompida devido a desmoronamentos das paredes do poço tubular e consequente aumento na turbidez da água.

A Figura 4.4 mostra o poço tubular a 35 metros, com pequena ruptura no tubo de revestimento, nível estático no momento da perfilagem, e acúmulo de particulados finos na parede do poço. Após a realização da perfilagem ótica este poço foi submetido a processo de limpeza e desenvolvimento.

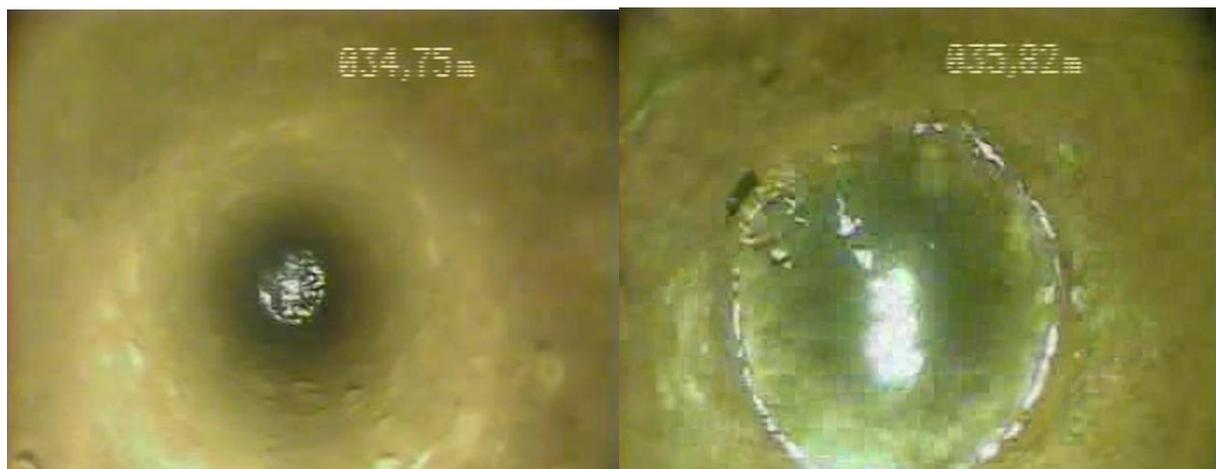


Figura 4.4 - Perfilagem Ótica no Poço de Injeção, nível estático em 36 metros.

A Figura 4.5 mostra entrada d'água através de fraturas abertas, com aproximadamente 10 cm, no Poço Tamburi, e caverna, a 313 metros de profundidade, no poço Primavera, no Sistema Aquífero Araxá. Esta grande estruturação é responsável pelo armazenamento, transporte e aquecimento das águas termais na região de Caldas Novas.

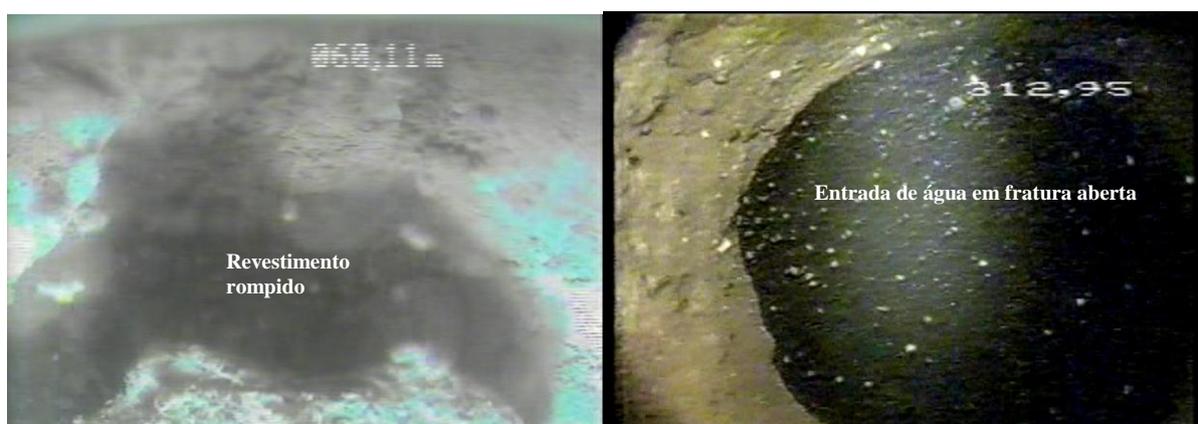


Figura 4.5 - Fraturas abertas no Sistema Aquífero Araxá, 10 cm de abertura a 60 metros de profundidade, no Poço de Injeção Piloto; e grande abertura, caverna, a 313 metros de profundidade.

4.4 ENSAIOS HIDRÁULICOS

Foram realizados oito ensaios de infiltração em seis poços tubulares profundos previamente selecionados para integrar o sistema de recarga artificial piloto. Os locais escolhidos para realização dos ensaios foram próximos a clubes que possuíam poços termais desativados e em clubes que contribuem com grandes volumes de descarte de águas de piscinas aquecidas.

Os ensaios compreenderam a injeção de água em poços termais com monitoramento dos níveis dinâmicos e temperatura da água, no poço injetado, e suas interferências nos poços vizinhos. O monitoramento foi realizado com medidores de nível, manuais e automáticos (*divers/datalogger*), e equipamento portátil *Hach*, para amostragens físico-químicas.

Os ensaios de injeção foram realizados, inicialmente, com uso de caminhões pipa, com 7.000 litros de água e, posteriormente, os poços que apresentaram boas condições de infiltração foram submetidos a novo ensaio com caminhões pipa, totalizando 14.000 litros de água injetados diretamente no poço tubular profundo.

A Figura 4.6 ilustra a realização dos ensaios hidráulicos com uso de água proveniente de caminhão pipa.



Figura 4.6 - Ensaio de infiltração no Poço SESI II, com água potável transportada por caminhão tanque.

Os ensaios hidráulicos foram realizados nos poços tubulares denominados Tamburi, Paineiras, Pousada I e II, e SESI I e II (Figura 4.7). Os poços Tamburi e Paineiras foram submetidos, também, a ensaios prolongados de 79 e 11 horas, respectivamente.

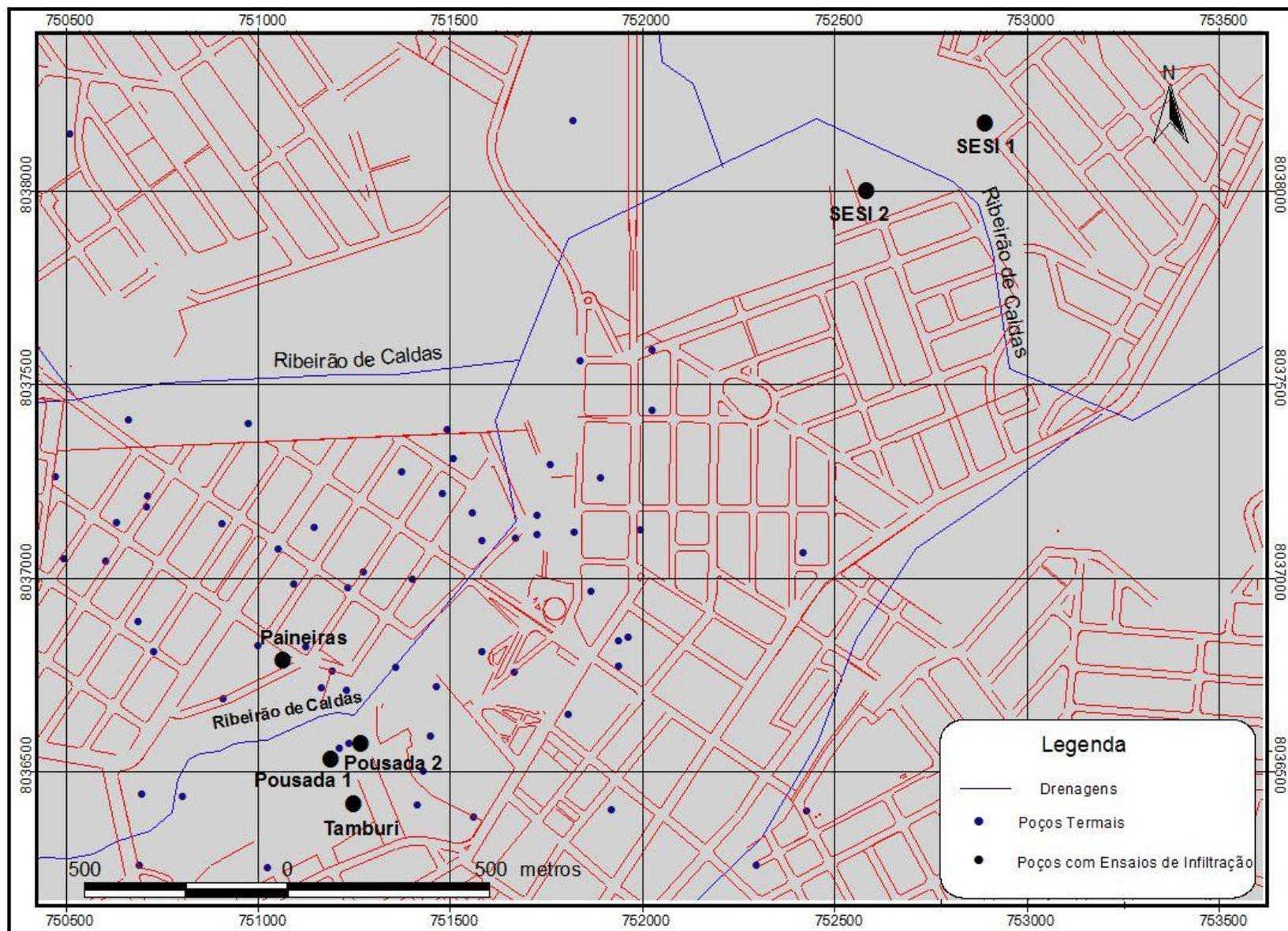


Figura 4.7: Mapa de localização dos ensaios hidráulicos.

Os poços SESI I, com 541 metros de profundidade, e SESI II, com 380 metros, encontram-se desativados, desde sua perfuração, devido à baixa vazão e reduzida temperatura da água. Nestes poços foram realizados ensaios com caminhão pipa de 7.000 litros, e os resultados mostraram condutividade hidráulica reduzida, com rápida elevação dos níveis de água (Figuras 4.8 e 4.9).



Figura 4.8 - Ensaio de Infiltração no Poço SESI I, com rápida saturação do poço.

O poço SESI I apresentava nível estático em 13,76 metros e temperatura da água a 27°C. Com início do teste houve rápida elevação da água e após 30 segundos o nível dinâmico se encontrava a 4,00 metros, com temperatura de 26°C. Durante 10 minutos o nível permaneceu estabilizado em 3,86 metros e 26°C, com posterior transbordamento do poço tubular. O ensaio prosseguiu com injeção de água controlada e diminuição da vazão de entrada durante aproximadamente 1 hora, quando os níveis apresentaram oscilação constante próxima de 50 cm, como mostra o gráfico da Figura 4.9.

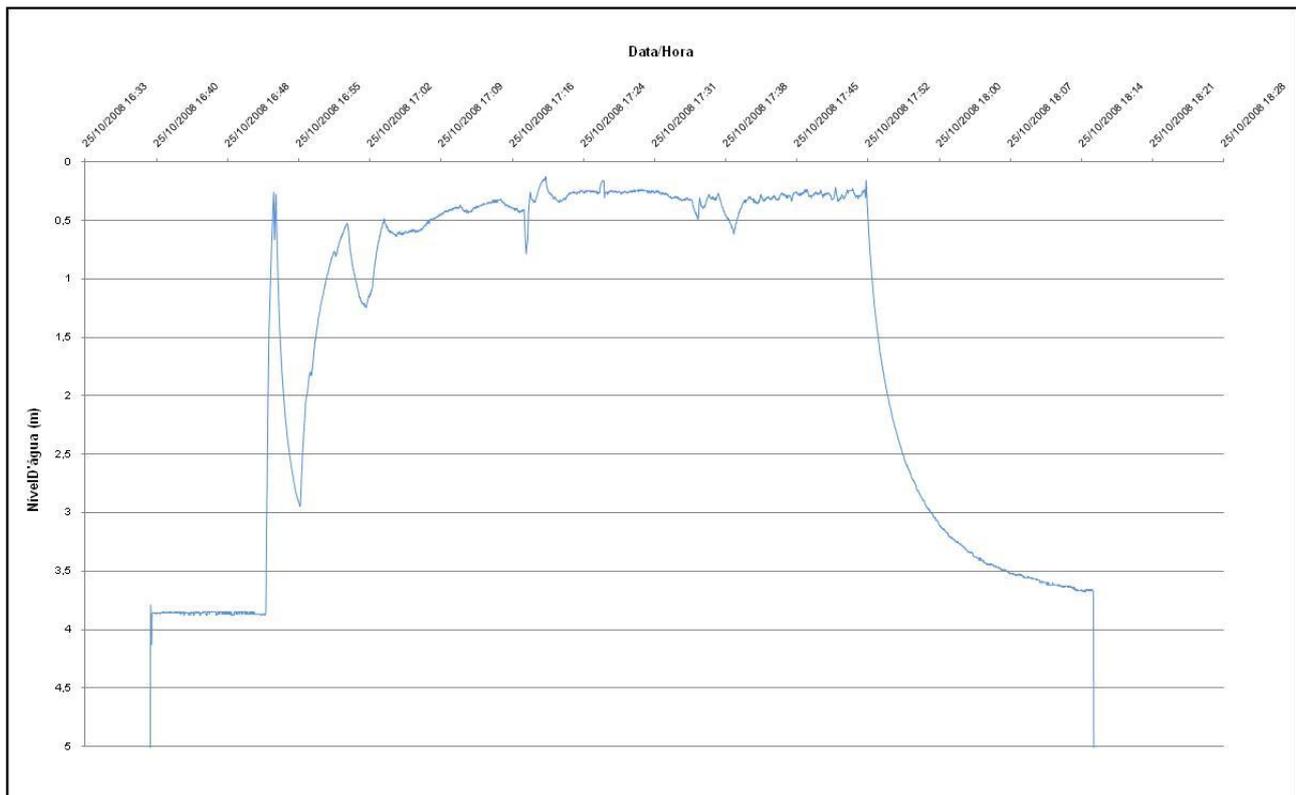


Figura 4.9 - Ensaio de Infiltração no poço tubular SESI I, com 7.000 litros de água, rápida saturação e recuperação.

Com o término da injeção o poço apresentou rápida recuperação e em 20 minutos estava estabilizado no nível 19,86 m, com 30°C de temperatura. O nível de água final inferior ao nível inicial é interpretado como interferências de poços próximos que iniciaram o bombeamento. Estas interferências de poços vizinhos são extremamente comuns na região, devido ao grande número de poços de águas quentes em regimes de operação difusos.

Posteriormente à recuperação do poço SESI I foi iniciado ensaio em poço a aproximadamente 100 m, denominado SESI II, que apresentava nível estático, no momento do ensaio, em 21 m e temperatura da água a 25°C. A injeção de água teve início às 19:00 hs e prosseguiu durante 5 minutos com rápida ascensão do nível dinâmico e saturação do poço. Ao longo de 40 minutos ocorreram injeções descontínuas, com vazões reduzidas, até o término do volume total de água do caminhão pipa. A recuperação do nível ocorreu em 20 minutos com estabilização em 23 metros e 27°C de temperatura.

O gráfico da Figura 4.10 ilustra as variações de nível d'água durante o ensaio e a recuperação do poço, com *diver/datalogger* mantido durante 06 horas após o ensaio, para monitoramento de nível.

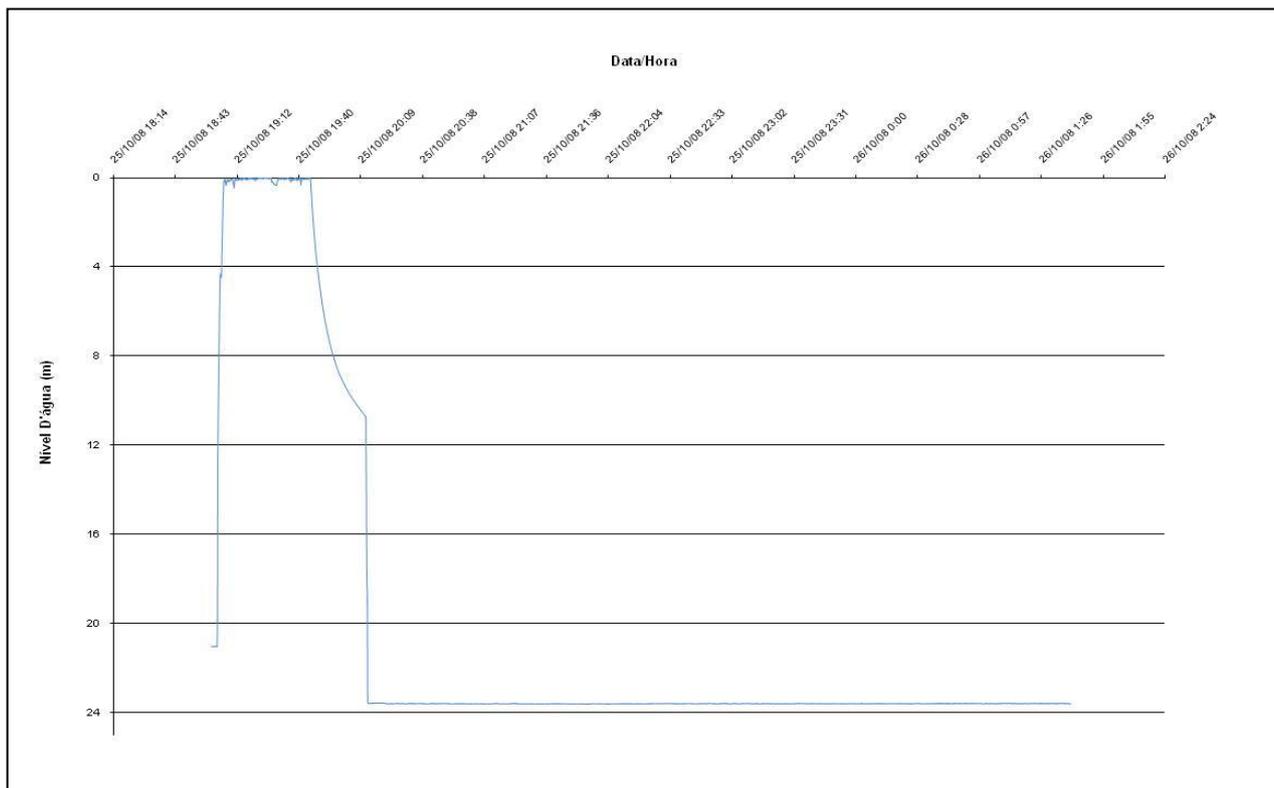


Figura 4.10 - Ensaio de Infiltração no poço tubular SESI II, com 7.000 litros de água, rápida saturação, boa recuperação e manutenção do nível recuperado após o ensaio.

O comportamento hidráulico dos poços SESI I e II, com rápidas elevações nos níveis de água inviabiliza a utilização destes poços tubulares para implantação de mecanismos de recarga artificial, com injeção direta. Modelos de injeção ativa, com uso de compressores, podem ser testados em etapa posterior.

Os poços tubulares Tamburi, Paineiras e Pousada I e II apresentaram elevada condutividade hidráulica, e excelente recuperação nos níveis d'água após os ensaios. Nestes poços foram realizados dois ensaios, com caminhões pipa, e ensaios com injeção contínua de 79 horas, no poço Tamburi, e 11 horas no poço Paineiras.

A água utilizada para injeção nos poços Tamburi e Paineiras foi bombeada de poços tubulares termais próximos, como mostram as Figuras 4.11 e 4.12. Nestes ensaios, além do monitoramento do nível d'água e temperatura, foram realizadas leituras de Ph, Eh e condutividade elétrica, utilizando equipamento portátil *Hach*.



Figura 4.11 - Ensaio de Infiltração no Poço Paineiras – 11 horas de injeção contínua. Detalhe para medidor manual de nível, utilizado em todos os ensaios.



Figura 4.12 - Ensaio de infiltração no Poço Tamburi durante 79 horas contínuas. Detalhe para sonda *Hach* de monitoramento e poço tubular utilizado para bombeamento de água ao fundo.

Os poços Pousada I e II possuem, respectivamente, 158 e 140 metros de profundidade e apresentaram excelentes condutividades hidráulicas e recuperação, após a injeção de 7.000 litros de água. O poço Pousada I apresentava nível estático a 38 metros, e teve elevação máxima de 15 metros, com estabilização do nível dinâmico a 23 metros, em apenas 10 minutos de ensaio. Com o término da injeção, a recuperação também ocorreu em 10 minutos e o nível d'água retornou aos 38 metros. Novo ensaio foi realizado e o poço se estabilizou em 28 metros, com rápida recuperação após o término da injeção, como apresentado na Figura 4.13. Os poços Pousada I e II estão distantes 100 metros.

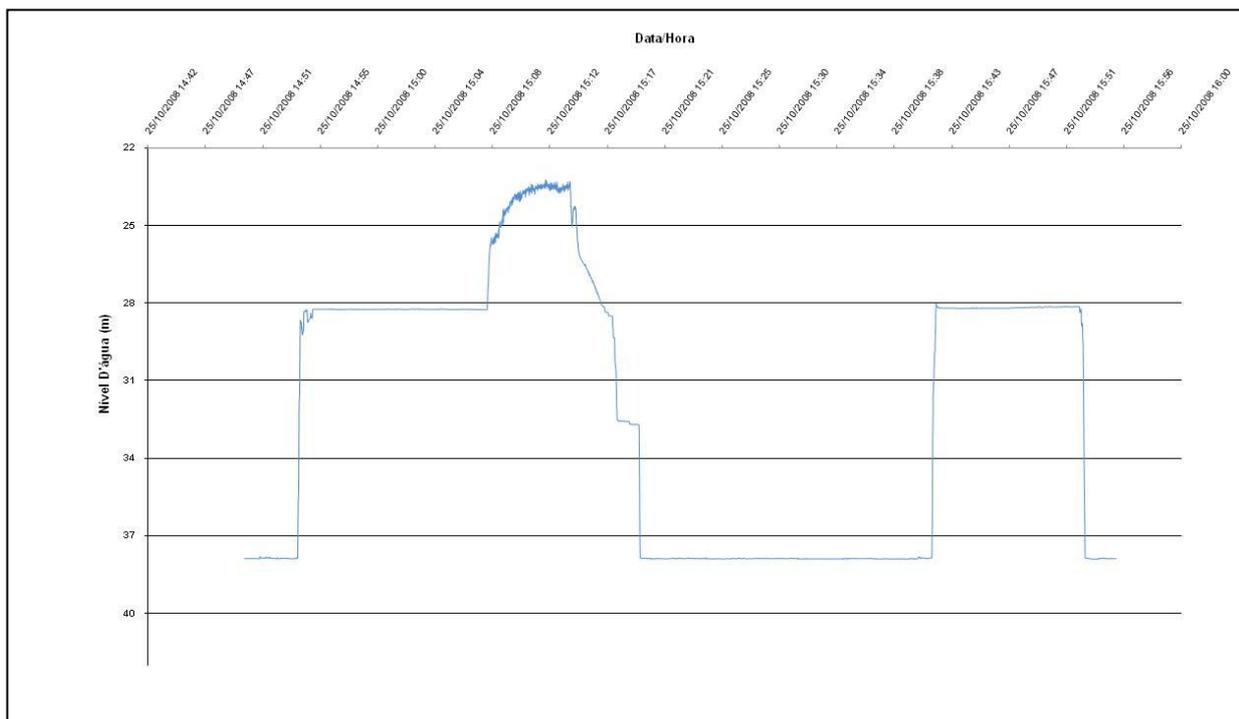


Figura 4.13 - Gráfico do Ensaio de Infiltração no Poço Pousada, com 14.000 litros de água, em 2 etapas.

Os poços Tamburi e Paineiras apresentaram excelentes resultados com injeção de água através de caminhões pipa e foram submetidos a ensaios prolongados para se confirmar a manutenção do potencial hidráulico. Os ensaios foram realizados com bombeamento de água através de poços produtivos próximos, que também foram monitorados automaticamente para controle de possíveis interferências.

O poço Paineiras foi submetido à injeção contínua durante 11 horas, totalizando 270.800 litros de água injetados, e apresentou excelente condutividade hidráulica e recuperação.

O ensaio teve início com a injeção de 30.000 litros de água durante 2 horas e monitoramento de interferência e medições contínuas de pH, Eh, condutividade hidráulica e temperatura. Após injeção inicial e controle dos parâmetros medidos, a vazão foi aumentada inicialmente para 25.000 litros/hora, durante 30 minutos, e para 28.800 litros/hora, durante oito horas. O gráfico apresentado na Figura 4.14 mostra a elevação dos níveis dinâmicos do poço, com aumento da vazão injetada. As falhas no gráfico são devidas à retirada do medidor automático no poço Paineiras às 17:00 h.

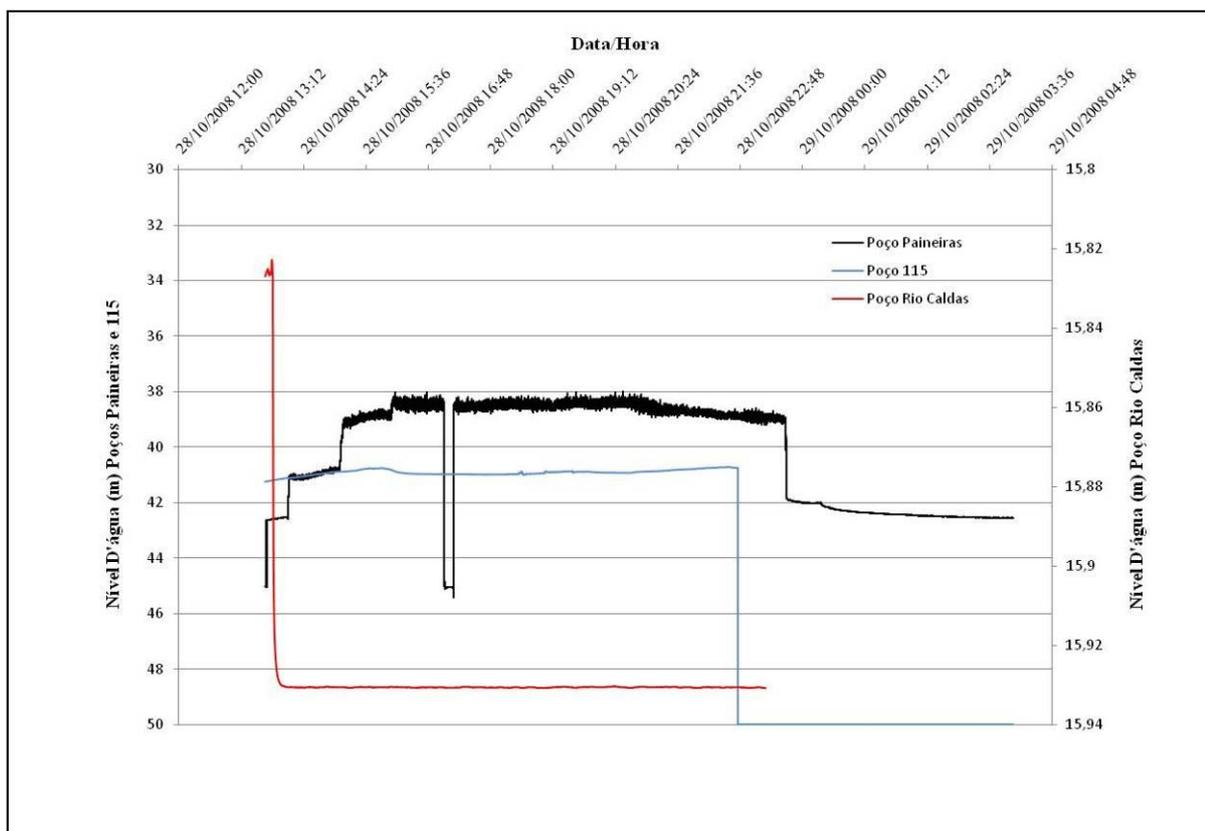


Figura 4.14 - Gráfico do ensaio de infiltração Poço Paineiras, com 270.800 litros de água injetados durante 11 horas. Detalhe para gráfico de interferências em poços vizinhos.

O nível estático do poço Paineiras se encontrava a 45,02 metros, e oscilou positivamente para 38 metros em menos de 3 horas, mantendo o nível estabilizado em 38 metros durante 5 horas. Por volta de 20h30min o nível dinâmico rebaixou 1 metro, possivelmente associado ao início de operação em algum poço próximo. O poço manteve uma oscilação negativa e com o término da injeção, por volta de 23h40min, obteve excelente recuperação, com estabilização em 42,89 m.

Foram instalados dois *divers/dataloggers* para medição de nível e temperatura nos poços denominados Poço 115 e Poço Rio Caldas, situados próximos ao Poço Paineiras e que apresentam condições hidrogeológicas semelhantes. Os poços monitorados apresentaram pequenas oscilações nos níveis de água.

O poço 115 apresentou variação do nível estático de 41,2 m para 40,7 m, com 50 cm de elevação. Esta ascendência dos níveis de água foi lenta e contínua, característica importante que se manteve durante todo o ensaio. O poço Rio Caldas oscilou negativamente 10 cm, variando de 15,82 m para 15,92 m. Esta oscilação deve ser interpretada como interferência de outros poços tubulares próximos que iniciaram bombeamento durante a realização do ensaio.

A mesma metodologia aplicada ao poço Paineiras foi desenvolvida no poço Tamburi. Os testes de infiltração realizados no Poço Tamburi foram fundamentais para definição da planta piloto de recarga artificial. Inicialmente o poço foi submetido às injeções com uso de caminhões

pipa, e em período posterior foi realizado um ensaio prolongado com 79 horas de injeção contínua de água. O bombeamento de água foi realizado em poço tubular próximo, com captação do Sistema Aquífero Paranoá.

Os ensaios com caminhões pipa transcorreram normalmente, com ótima infiltração e recuperação. O nível de água inicial encontrava-se a 39 metros e em menos de 10 minutos elevou para 27,7 metros, estabilizando-se. Ao término das injeções o nível caiu para 34,7 m, mantendo a estabilização até a nova injeção com caminhão pipa. O novo ensaio elevou o nível de água do poço para 25,3 metros, com estabilização ao término dos ensaios em 37,1 metros. A Figura 4.15 mostra as oscilações nos níveis de água no Poço Tamburi.

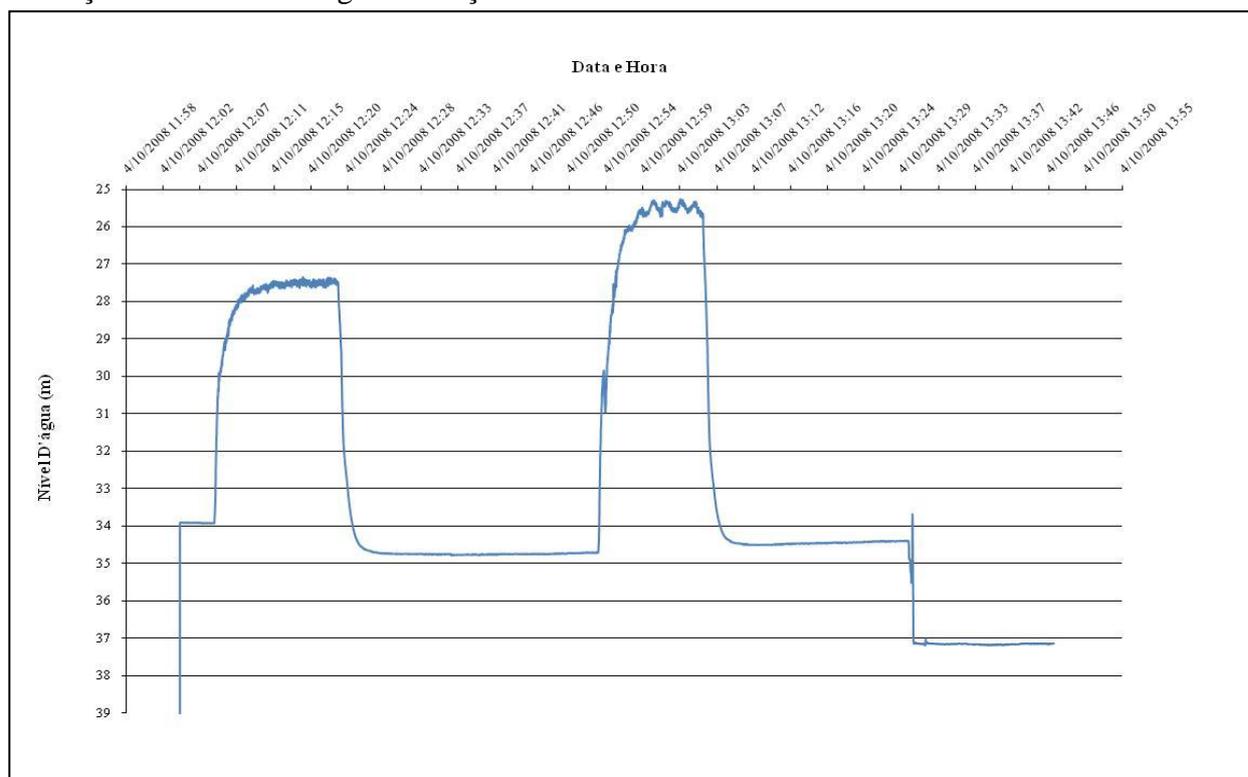


Figura 4.15 - Gráfico do Ensaio de Infiltração Poço Tamburi, com 14.000 litros de água, em 02 etapas.

Com os excelentes resultados nos ensaios preliminares, foi planejado um ensaio prolongado previsto para ocorrer durante 3 dias ininterruptos. O poço Tamburi foi submetido a novo processo de limpeza e desenvolvimento, e posteriormente realizou-se o ensaio durante 79 horas.

Inicialmente foram injetados 15.000 litros de água, durante 1 hora. Após a injeção inicial e monitoramento manual de nível, a vazão foi aumentada para 32.000 litros/hora e manteve-se regular durante os 3 dias de ensaio, totalizando um volume de 2.452.000 litros de água injetados.

Durante o ensaio os níveis de água apresentaram lenta variação passando dos 32,7 m iniciais, para 31,3 m e estabilização após 46 horas de ensaio (Figura 4.16). O poço produtor situado próximo ao poço de injeção foi monitorado e não apresentou oscilação nos níveis de água e temperatura.

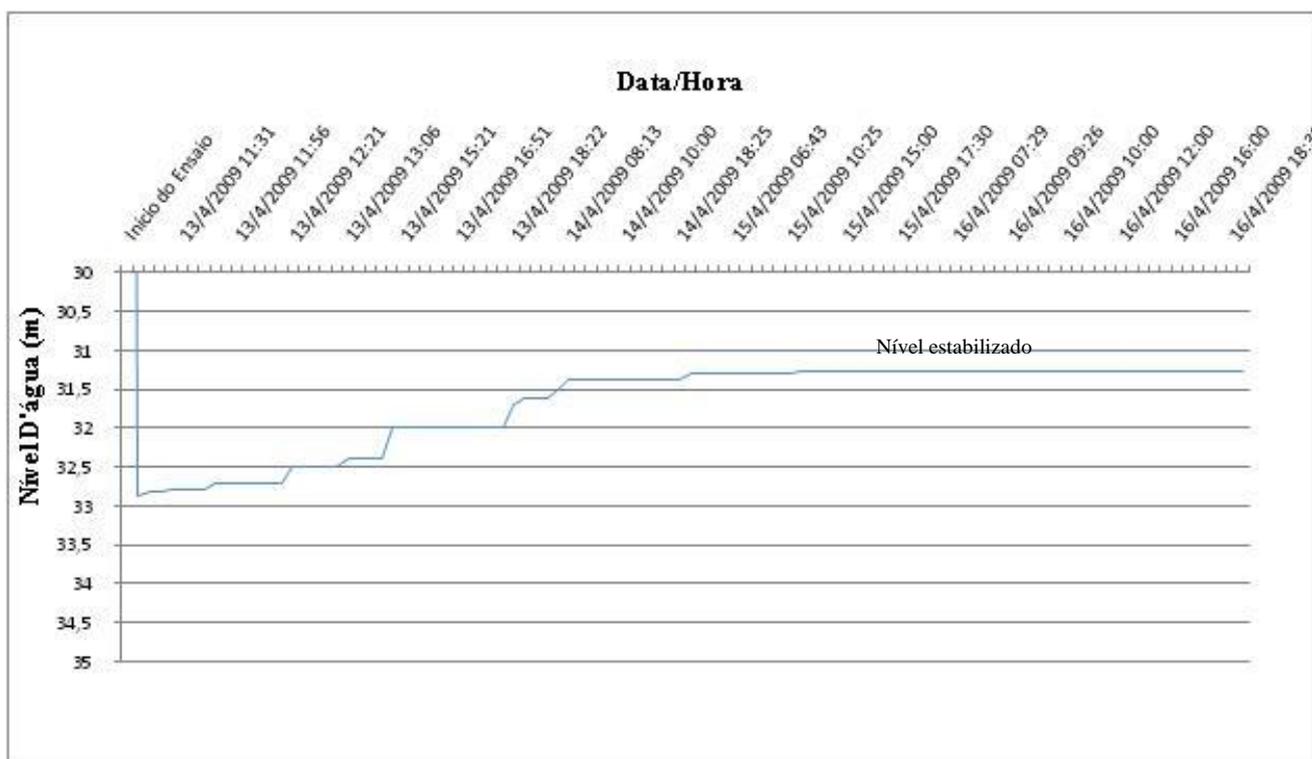


Figura 4.16 - Ensaio de Infiltração com 79 horas de injeção, no Poço Tamburi, totalizando 2.452 m³ de água injetada.

Os poços Tamburi, Paineiras e Pousada I e II estão localizados em região geológica potencialmente favorável à instalação dos projetos piloto de recarga artificial de aquíferos. A integração dos dados disponíveis possibilitou a delimitação de uma área, denominada de sub-bacia hidrogeológica Caldas Novas, com elevado potencial termal e propícia a integrar o sistema de poços de recarga artificial.

4.5 DELIMITAÇÃO DE BACIA HIDROGEOLÓGICA

A bacia hidrogeológica do aquífero termal de Caldas Novas compreende a região situada entre a borda oeste da Serra de Caldas e a Lagoa da Pirapetinga, a leste-nordeste da cidade de Caldas Novas. Esta região é caracterizada por apresentar surgências e poços tubulares termais. As características de termalismo no interior da bacia hidrogeológica permite uma subdivisão preliminar em 3 sub-bacias termais, denominadas de Sub-bacia Rio Quente, Sub-bacia Caldas Novas e Sub-bacia Pirapetinga (Figura 4.17).

O conceito de bacia hidrogeológica é aplicado segundo a proposta de Arraes & Campos (2007), que propõem a delimitação de bacias hidrogeológicas a partir da integração de dados que inclua estudos hidrológicos, potenciométricos e análise de lineamentos, além de estudos complementares de geofísica, isotópicos e com traçadores. A proposta de compartimentação da região de Caldas Novas em sub-bacias hidrogeológicas, mesmo que realizada de forma preliminar, é importante para a definição de estratégias de gestão para sustentabilidade do aquífero termal.

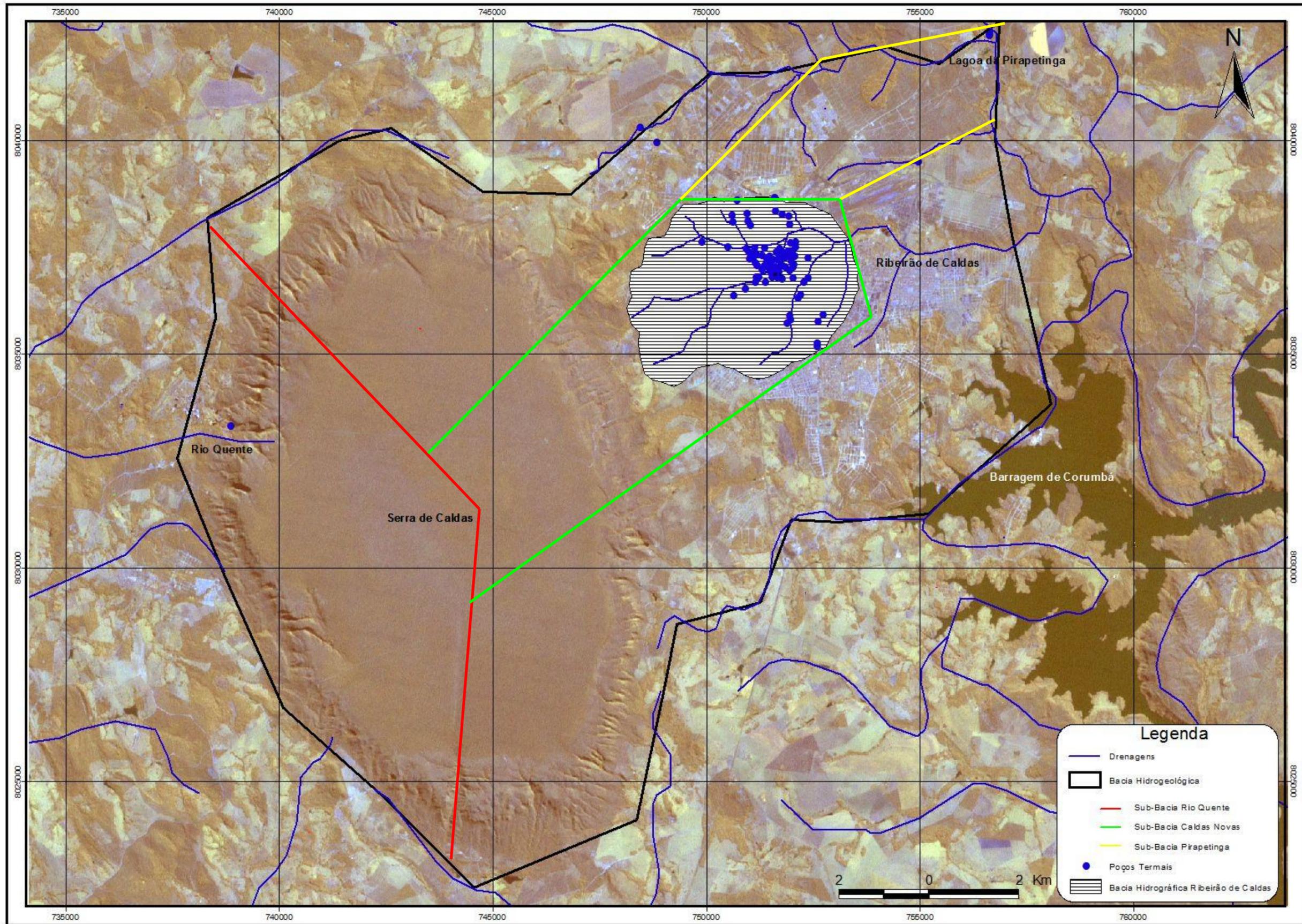


Figura 4.17: Proposta de Bacia Hidrogeológica Termal de Caldas Novas, com delimitação de Sub-Bacias Hidrogeológicas.

A região representa um caso raro de aquífero fraturado, confinado e com hidrotermalismo, e a ampliação dos estudos isotópicos e geofísicos deve contribuir para caracterização das condições de contorno destas sub-bacias hidrogeológicas, de forma mais precisa.

As estruturas (falhas e fraturas) de direção preferencial nordeste e leste-oeste, representadas por drenagens alinhadas e retilíneas (Figura 4.18), que canalizam o fluxo em certas direções, e a ocorrência de poços e surgências termais, são os principais argumentos que suportam a proposta de limite preliminar destas sub-bacias hidrogeológicas. A conformação da bacia também é controlada pela densidade de fraturamentos dos xistos do Grupo Araxá, que permite a ascensão das águas aquecidas do Sistema Aquífero Paranoá, principalmente na sub-bacia Caldas Novas.



Figura 4.18 – Fotografia Aérea com principais lineamentos estruturais, evidenciando direção preferencial NE/E-W. (Fotografia USAF 1964)

A ausência de águas termais ao norte e a sudeste do Domo de Caldas foi um dos fatores utilizado para a distinção destas sub-bacias sem vínculo com o hidrotermalismo regional. Nestes casos as fraturas não são suficientemente profundas para que as águas de infiltração descendente sejam aquecidas por grau geotérmico.

Do ponto de fluxo vertical, a compartimentação considera limites de fluxos descendentes e ascendentes. Neste caso é proposto que a sub-bacia Caldas Novas represente uma zona de fluxo termal ascendente, do Sistema Aquífero Paranoá, o qual se mistura com águas frias de fluxo descendente a partir dos aquíferos intergranulares e do Sistema Aquífero Araxá. Esta sub-bacia

representa a região de maior potencial termal, com poços que apresentam vazões elevadas ($> 50 \text{ m}^3/\text{h}$) e temperaturas superiores a 40°C .

A sub-bacia Caldas Novas corresponde à porção central da cidade de Caldas Novas em que há a máxima densidade de poços. A área apresenta limites controlados pelos principais lineamentos estruturais, principalmente no interior da bacia hidrográfica do ribeirão de Caldas (Figura 4.19), e caracteriza-se por apresentar poços termais com alta vazão e elevada condutividade hidráulica.

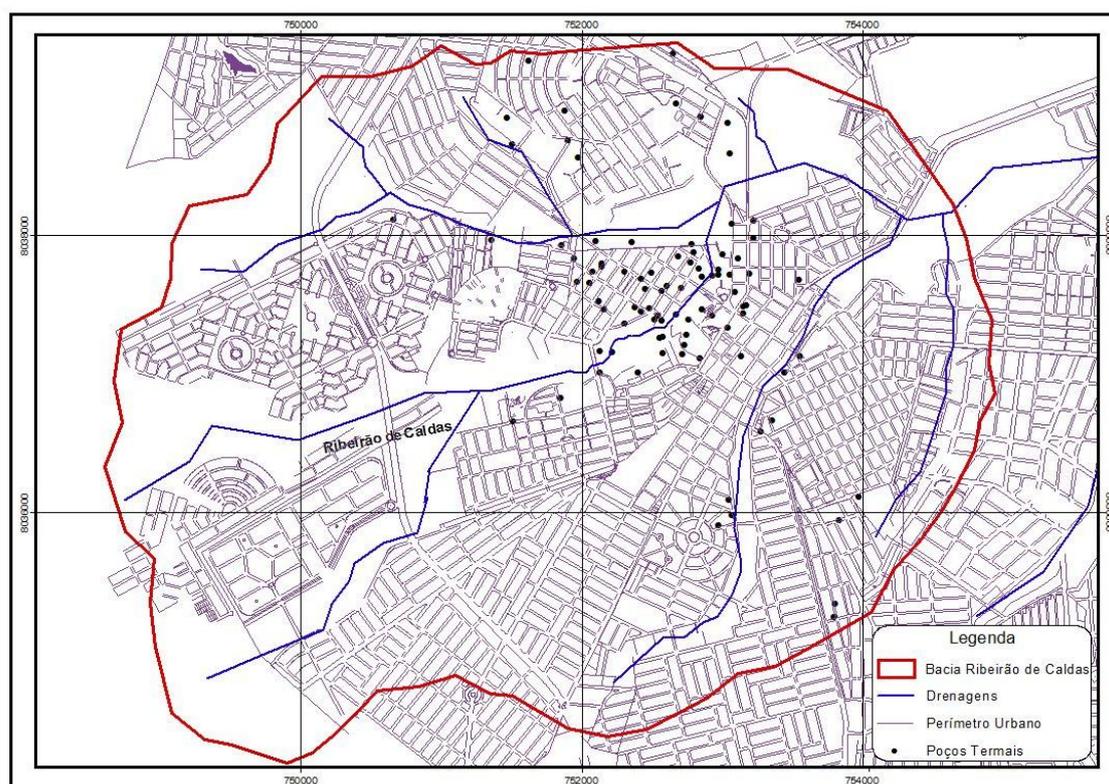


Figura 4.19 - Mapa do perímetro urbano da cidade de Caldas Novas, região central, com delimitação da bacia hidrográfica do Ribeirão de Caldas, no interior da sub-bacia hidrogeológica Caldas Novas.

Dados de dezenas de poços termais, cedidos pela empresa Geocaldas, foram importantes para a delimitação das sub-bacias hidrogeológicas. A integração dos dados hidráulicos de vazão, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento, com as diversas atividades de campo, além dos estudos geofísicos, hidroquímicos e isotópicos foram fundamentais para a caracterização das sub-bacias. Estas informações também possibilitaram a definição de uma área potencial/prioritária para a implantação da planta piloto de recarga artificial, no interior da sub-bacia Caldas Novas.

Os poços tubulares na sub-bacia Caldas Novas apresentam grande variabilidade de parâmetros hidráulicos. A condutividade hidráulica varia de 10^{-4} m/s a 10^{-7} m/s , com média de 10^{-5} m/s e a seguinte distribuição estatística: 10^{-4} m/s (18 poços), 10^{-5} m/s (33 poços), 10^{-6} m/s (9

poços), e 10^{-7} m/s (8 poços). A produtividade dos poços pode ser dividida em: poços com vazões maiores que $50 \text{ m}^3/\text{h}$ (17 poços) e poços com vazões menores que $50 \text{ m}^3/\text{h}$ (48 poços).

A Tabela 4.1 apresenta os resultados hidráulicos de 3 poços monitorados, que são representativos para toda sub-bacia hidrogeológica Caldas Novas.

	Q (m^3/h)	K (m/s)	S
Poço Tamburi	22	$5,4 \times 10^{-6}$	-----
Poço Paineiras	60	$1,5 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-3}$
Poço 115	65	$2,1 \times 10^{-4}$	$9,7 \times 10^{-3}$

Tabela 4.1 - Dados Hidráulicos de Poços Termiais.

As sub-bacias Rio Quente e Pirapetinga são caracterizadas por possuírem as últimas surgências naturais termiais da região de Caldas Novas, uma vez que aquelas anteriormente presentes na cidade de Caldas Novas secaram totalmente.

A separação da sub-bacia Pirapetinga é proposta em função do maior aquecimento das águas, as quais podem alcançar 58°C e pela idade mais antiga de suas águas. Este padrão indica maior profundidade de infiltração das águas e padrão de fluxo regional, que, de forma geral, foi o argumento para separação das sub-bacias Caldas Novas e Pirapetinga.

A individualização da sub-bacia Rio Quente foi baseada nos seguintes argumentos:

- dados de piezômetros situados no platô da Serra de Caldas que indicam divisões regionais do fluxo pelo padrão da superfície potenciométrica, a qual mostra duas zonas com nível de água profundo;
- comportamento da temperatura das águas das nascentes existentes na região da Pousada do Rio Quente, que se mantêm estáveis independentemente de suas vazões; e
- pela concentração das vazões em apenas uma região, o que indica que há canalização do fluxo de mistura de águas quentes e frias ao longo de zonas preferenciais.

4.6 HIDROQUÍMICA DAS ÁGUAS DE RECARGA

4.6.1 ÁGUAS NATURAIS DOS AQUÍFEROS

As águas termiais dos Sistemas Aquíferos Araxá e Paranoá possuem composições químicas diferentes, e preservam as características geoquímicas de cada conjunto litológico. As águas do Aquífero Araxá apresentam-se mais mineralizadas, com predomínio de águas bicarbonatadas cálcicas magnesianas e teores de Ca e Mg muito superiores às do aquífero Paranoá, que também são do tipo bicarbonatadas cálcicas ou cálcicas magnesianas, com matriz carbonática reduzida.

A composição química destas águas e os mecanismos de fluxo subterrâneo conhecidos mostram que existe uma mistura das águas dos dois sistemas aquíferos. A forma de captação das águas através de poços tubulares profundos também contribui para a mistura das águas termiais. A

integração dos trabalhos de Cadamuro *et al.* (2000), Campos *et al.* (2009), aliada a uma análise em 98 poços tubulares termais do banco de dados da AMAT possibilitou a seguinte caracterização hidroquímica dos sistemas aquíferos termais.

As águas do Sistema Aquífero Araxá possuem maior mineralização que as águas do Paranoá, com valores elevados de cálcio (média 20 mg/l e máximo 34 mg/l), magnésio (média 10 mg/l), e teores de Na e K, com média de 2 mg/l. Os valores de cloretos e sulfatos oscilam entre 2 e 7 mg/l, o pH varia entre 6,6 e 7,8, e o TDS possui média de 150 mg/l. Os valores de cálcio, magnésio e bicarbonato são, geralmente, muito superiores aos valores observados nas águas do Sistema Aquífero Paranoá. A reatividade dos variados xistos do Grupo Araxá pode explicar a maior mineralização das águas termais deste aquífero, quando comparadas às águas do Sistema Paranoá.

Os teores de nitrato, em vários poços do Sistema Aquífero Araxá, são superiores a 10 mg/l, com máximo de 25 mg/l e média de 5,4 mg/l. As teorias sobre a origem das altas concentrações de NO₃ são controversas, e investigações com isótopos estáveis de nitrogênio (razão isotópica ¹⁵N/¹⁴N), que podem caracterizar as principais fontes, estão sendo realizadas. As fontes originais do composto químico podem estar associadas a ambientes geológicos ricos em nitrogênio, ou possuir contribuição antropogênica.

As águas termais do Sistema Aquífero Paranoá apresentam baixa mineralização, com teores de cálcio variando entre 5 e 7 mg/l, magnésio entre 2 e 3 mg/l, bicarbonato entre 26 e 43 mg/l e baixos teores de sódio e potássio. As águas, mais ácidas que do Aquífero Araxá, possuem Ph variando entre 5,2 e 6,3, e TDS entre 17 e 43 mg/l. O aumento dos sais nestas águas pode acontecer localmente, nas brechas tectônicas e nas lentes de mármore do topo da bacia Paranoá, como evidenciado em alguns poços tubulares.

4.6.2 ÁGUAS DE PISCINAS TERMAIS

As águas termais dos dois sistemas aquíferos abastecem inúmeras piscinas na cidade de Caldas Novas. Estas águas preservam a assinatura hidroquímica dos reservatórios subterrâneos, com incremento de compostos químicos e bacteriológicos introduzidos por ação antrópica. Alguns compostos não naturais presentes nas piscinas termais são amônia (NH₄), nitrato (NO₃), coliformes totais, fecais e termotolerantes, e cloro.

Para caracterização deste incremento hidroquímico nas piscinas termais foram realizadas coletas de água em diversos clubes da cidade de Caldas Novas. Dados disponibilizados em AMAT (2008) foram interpretados e seus resultados integram a caracterização a seguir.

Inicialmente optou-se por coletar amostras em períodos de alta temporada, em feriados prolongados e férias escolares. As amostragens foram realizadas diretamente nas piscinas ou nas caixas de saída das águas de todas as piscinas de um mesmo clube (Figura 4.20). Em uma segunda etapa foram concentrados esforços apenas na Pousada do Ipê, em períodos de alta e baixa temporada.



Figura 4.20 - Piscina termal e caixa de descarte de águas termais no clube CTC.

A maior parte do descarte das águas de piscinas termais é lançada diretamente nos córregos e ribeirões da cidade de Caldas Novas, geralmente sem nenhum tratamento prévio. Os lançamentos das águas quentes ocorrem continuamente, com substituição das águas devido ao resfriamento das piscinas termais (Figura 4.21). Alguns clubes realizam tratamento simplificado das águas de descarte e as reutilizam em piscinas frias.

No ano de 2010 os empresários do setor de turismo da cidade de Caldas Novas assinaram um Termo de Ajuste de Conduta - TAC, que obriga todos os clubes da cidade a desenvolver ações para sustentabilidade dos recursos naturais da região, entre as quais a obrigatoriedade da realização de tratamento das águas de descarte.



Figura 4.21 - Saída de água na parte superior da piscina termal, com descarte constante devido ao resfriamento da piscina, e lançamento direto no Ribeirão de Caldas.

Apesar de atualmente não haver tratamento, os resultados hidroquímicos mostram a boa qualidade das águas das piscinas termais, preservando a assinatura hidroquímica dos aquíferos, com incremento de compostos antropogênicos em teores reduzidos. Os resultados alcançados mostram grande variação em diferentes clubes, dias e horários, com pequenas concentrações de NH_4 , NO_3 e coliformes termotolerantes.

Os teores de NH_4 oscilam entre 0,1 e 0,8 mg/l N. Os valores mais elevados são encontrados em clubes que possuem bares dentro das piscinas, geralmente no período vespertino e em dias com alta concentração de turistas. As mesmas situações de uso podem ser utilizadas para caracterizar os teores de NO_3 , entre 0,1 e 1,5 mg/l, e coliformes termotolerantes, entre 0 e 5000 NMP/100 ml. Os teores dos compostos antropogênicos em piscinas sem bares e em períodos de baixa temporada são próximos dos mínimos encontrados.

As temperaturas das águas de piscinas oscilam entre 24,7 e 39,6°C, com média de 32°C. O pH das águas apresentou variação entre 6,4 e 8,1, com média de 7,3. As Figuras 4.22 a 4.26 apresentam os gráficos com concentrações de nitrato, N amoniacal, coliformes totais, temperatura e pH, nas águas termais de descarte em diversos clubes da cidade de Caldas Novas.

Alguns clubes que utilizam cloro em suas piscinas apresentaram valores de cloro residual com média de 0,3 mg/l. Outros compostos analisados como sódio, magnésio, fosfatos, sulfatos, cloretos, potássio e nitrito apresentaram valores semelhantes aos do sistema aquífero explorado, obtidos na hidroquímica dos poços tubulares termais.

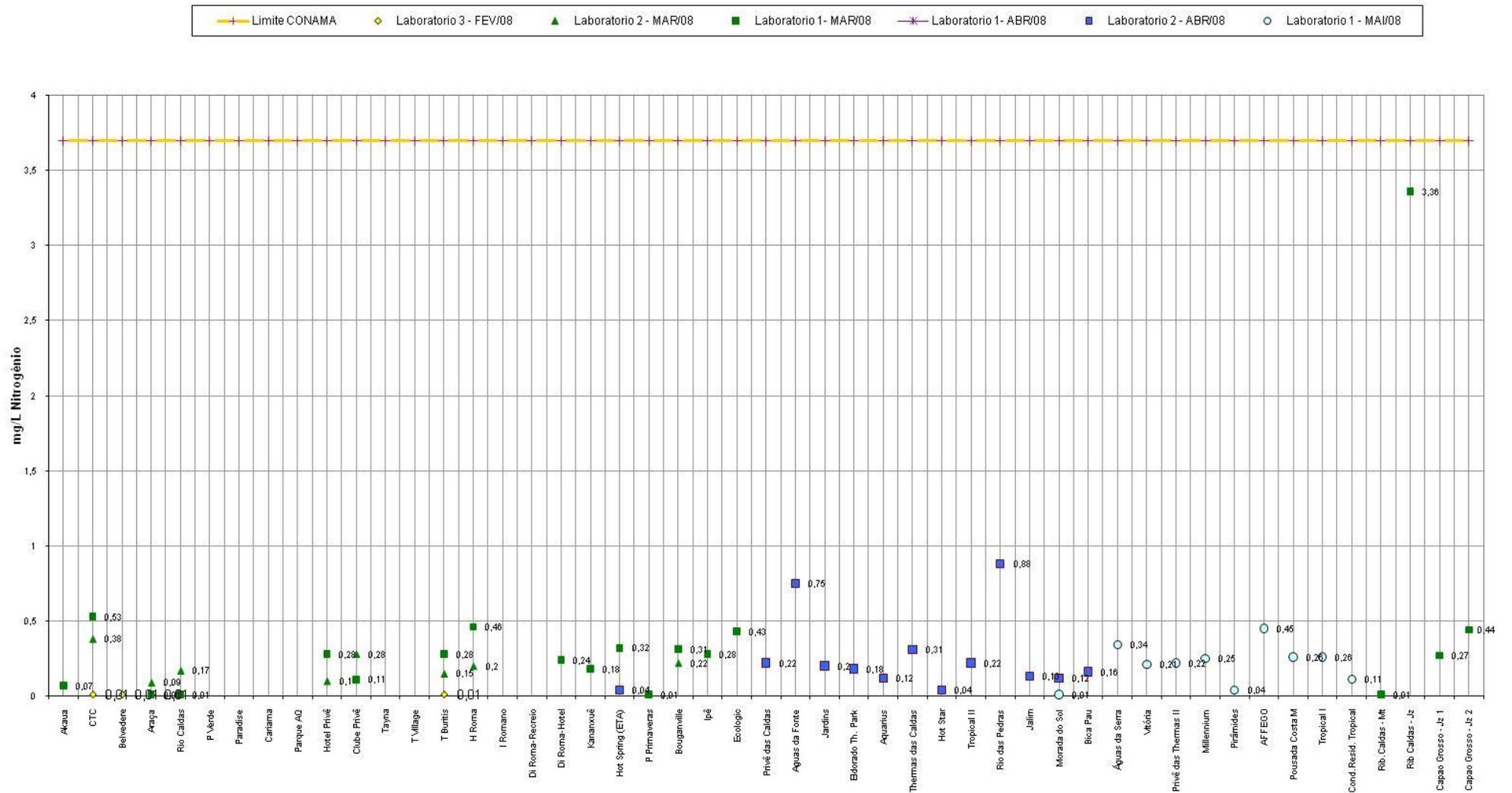


Figura 4.22 - Concentração de NH₄ (em mg/l Nitrogênio) nas águas de descarte das piscinas termais. Fonte: AMAT 2008

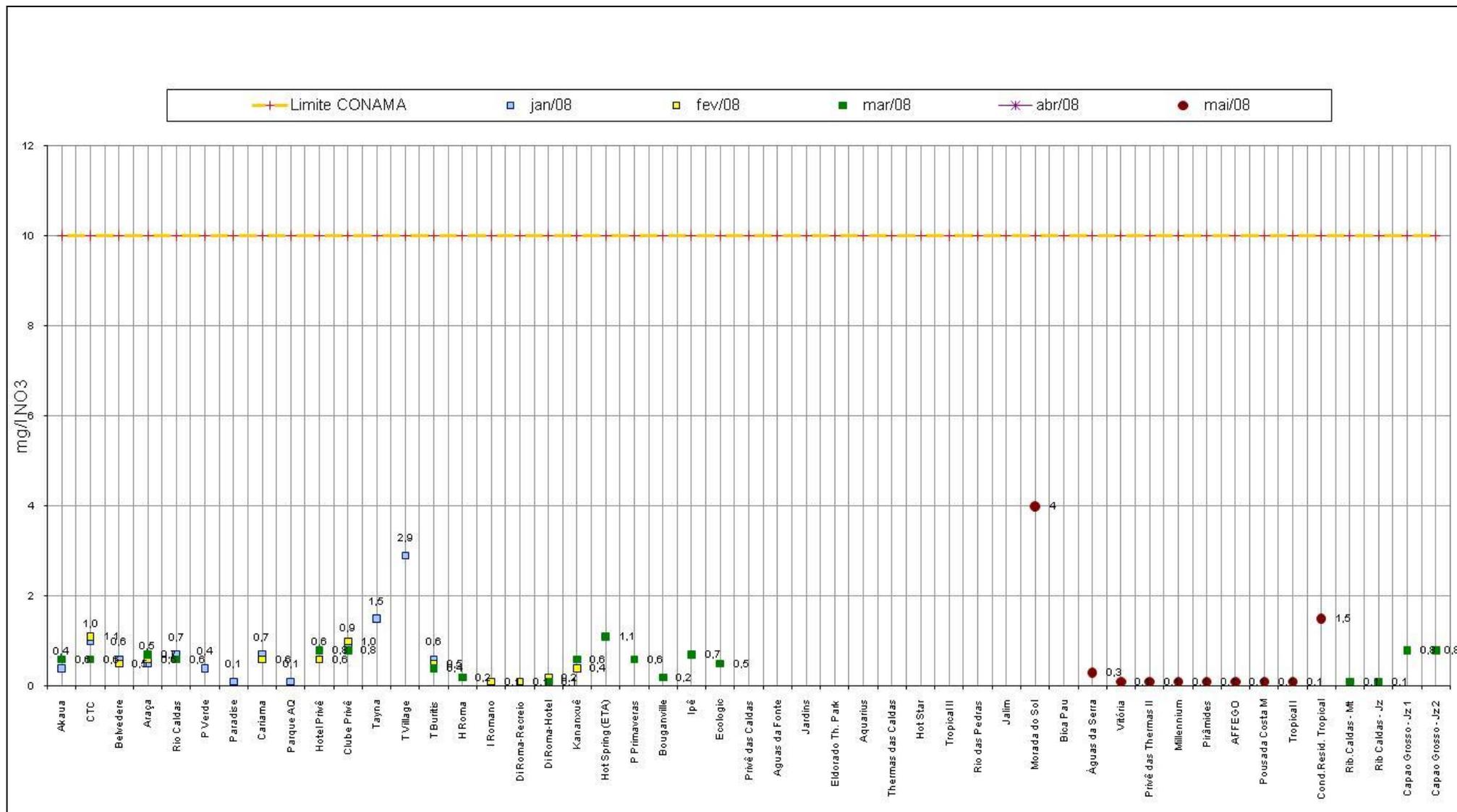


Figura 4.23 - Concentração de Nitrato (em mg/l NO₃) nas águas de descarte das piscinas termais. Fonte: AMAT 2008

AQ: Laboratório 1; AG: Laboratório 2; e COM: Laboratório 3

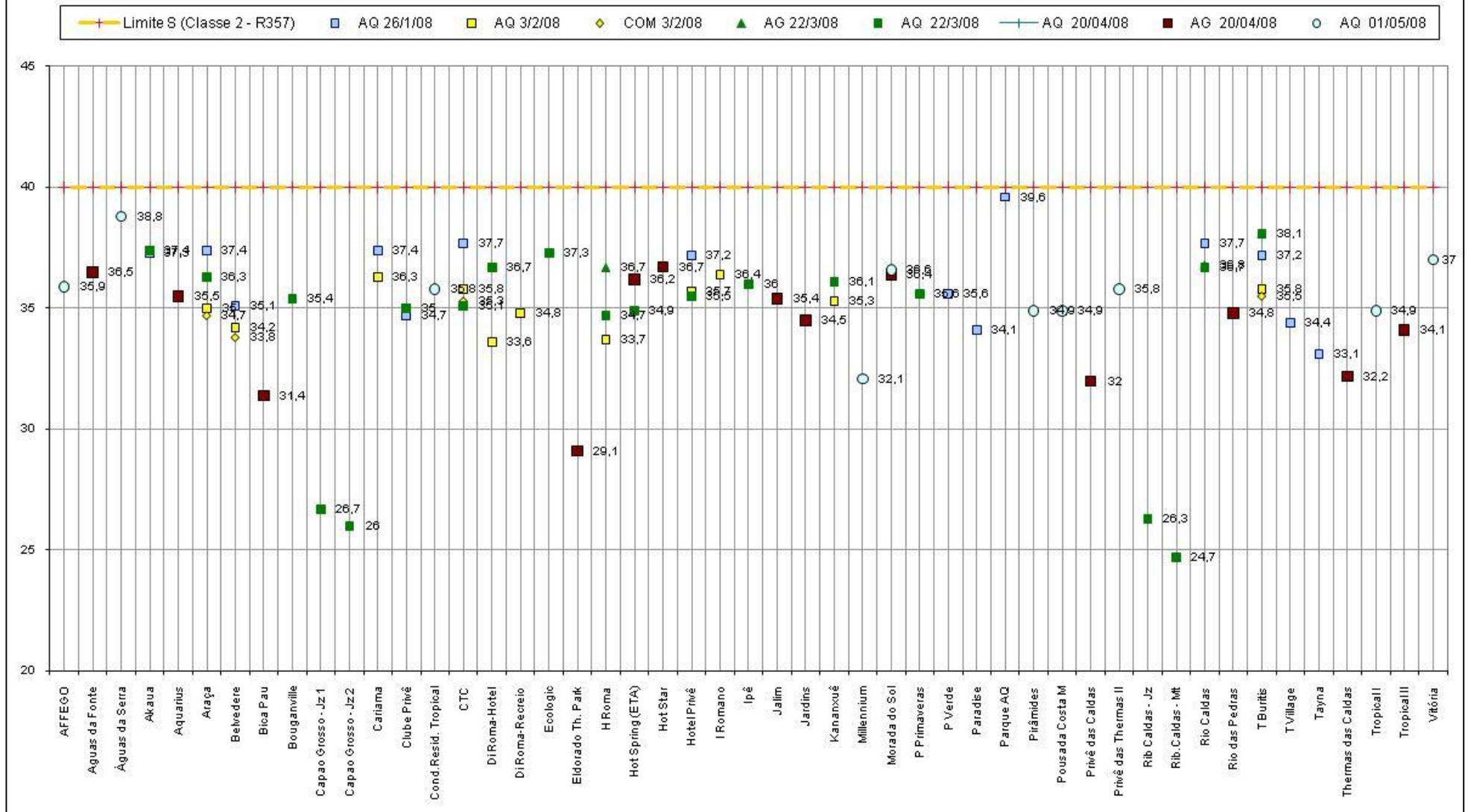


Figura 4.24 - Temperatura média °C nas águas de descarte das piscinas termais. Fonte: AMAT 2008

AQ: Laboratório 1; AG: Laboratório 2; e COM: Laboratório 3

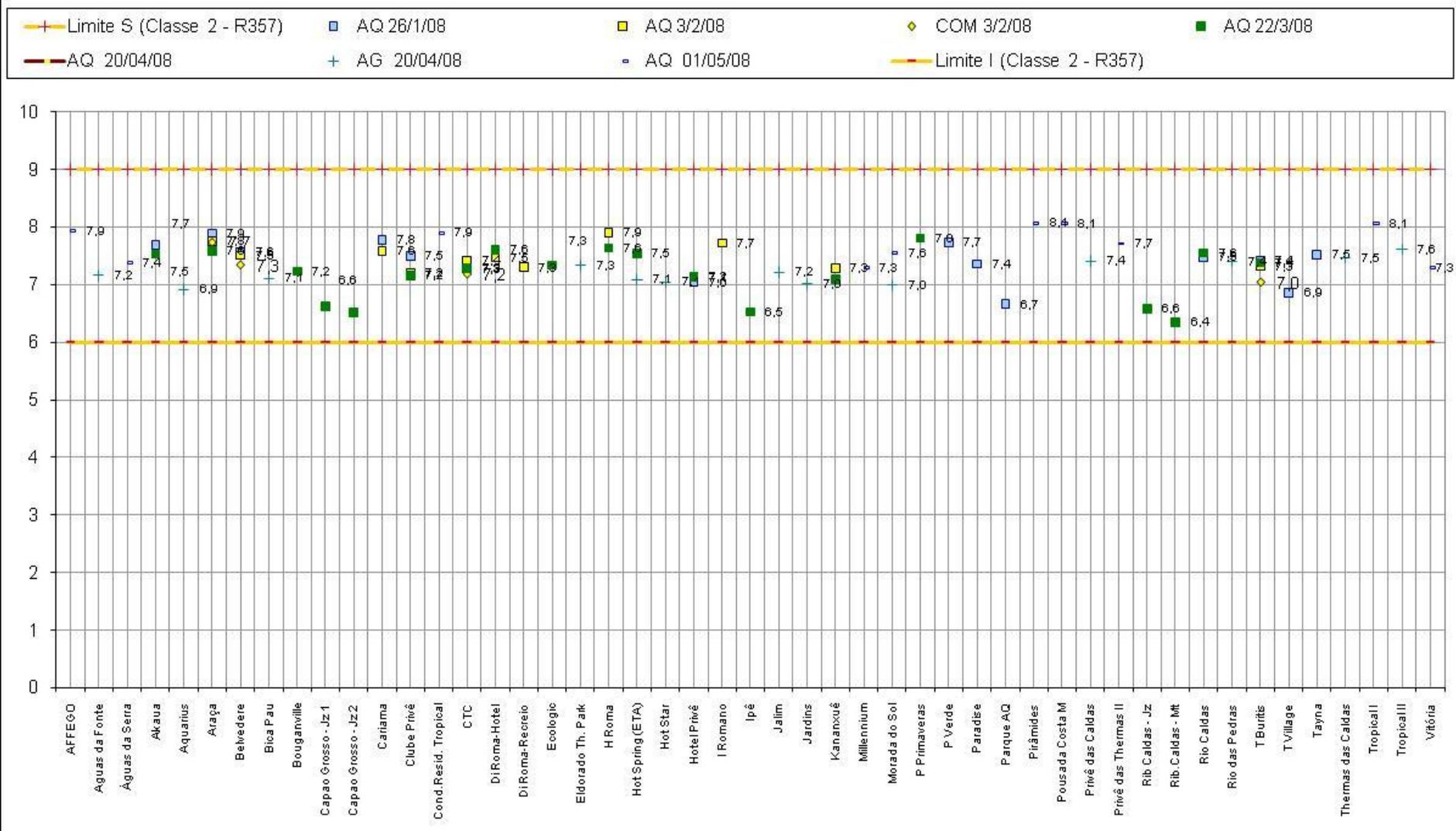


Figura 4.25 - Valores médios de Ph em diversas piscinas termais. Fonte: AMAT 2008

AQ: Laboratório 1; AG: Laboratório 2; e COM: Laboratório 3

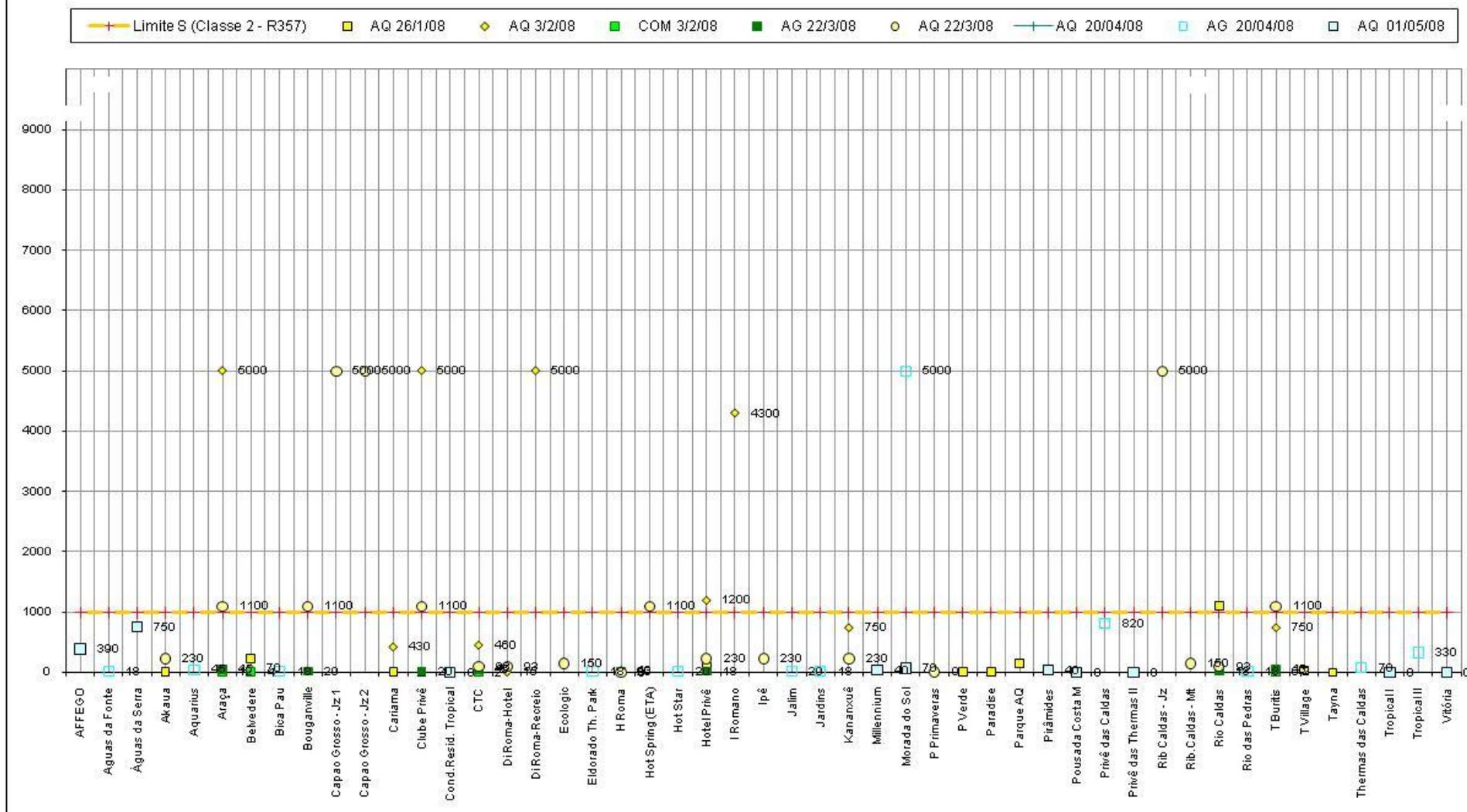


Figura 4.26 - Valores de coliformes totais, NMP/100 ml, nas águas de descarte das piscinas termais. Fonte: AMAT 2008

A segunda etapa do monitoramento ocorreu apenas em um clube da cidade de Caldas Novas. A proposta de monitoramento e proposição de modelo piloto a ser aplicado em um único clube foi resultado da integração dos dados geológicos, hidráulicos, estruturais e hidroquímicos.

A rotina de uso das águas termais e o lançamento dos efluentes das piscinas da Pousada do Ipê, no ribeirão de Caldas, foram monitorados durante 12 meses. Neste período foram realizadas diversas análises, físico-químicas e bacteriológicas, em períodos de alta e baixa temporada, nas águas de descarte das cinco piscinas termais da pousada. Todas as etapas que envolvem o uso das águas termais no clube, desde seu bombeamento a partir de poços tubulares profundos, passando pelo uso nas diversas piscinas e culminando com lançamento no ribeirão de Caldas, foram acompanhadas e caracterizadas, com o objetivo de propor o modelo de recarga artificial mais eficaz para o local.

As águas termais do clube possuem boa qualidade e as piscinas são esvaziadas e lavadas diariamente, em sistema de rodízio de horários. Em períodos de alta temporada o clube não recebe grande aporte de turistas, devido a sua capacidade restrita e exclusiva para poucos hóspedes. Os teores de NH_4 , NO_3 e coliformes termotolerantes apresentam médias menores que outros clubes da cidade. Em períodos de baixa temporada muitas amostras apresentaram ausência destes compostos.

O monitoramento da qualidade das águas de descarte das piscinas termais na Pousada do Ipê foi realizado com auxílio de um multímetro, para análises de pH, EH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, e uma sonda multi-elementar, para análises de amônia e nitrato. Diversas análises também foram realizadas no laboratório Aqualit, certificado pela norma NBR ISO 17.025, com sede na cidade de Goiânia.

A figura 4.27 mostra os equipamentos utilizados regularmente no monitoramento dos efluentes termais, e piscinas da Pousada do Ipê, em período de baixa temporada.



Figura 4.27 - Equipamentos utilizados para análise das águas, modelo *Hach*; e piscinas termais da Pousada do Ipê. Detalhe para “Bar Molhado”, no centro da piscina.

Os resultados do monitoramento mostram que as águas das piscinas termais da Pousada do Ipê possuem boa qualidade em todos os períodos do ano. Os valores de Ph das águas variam entre 6,4 e 7,8, os teores de NH_4 entre 0,1 e 0,36 mg/l N, Nitrato entre 0,1 e 0,6 mg/l NO_3 , e coliformes totais variam entre ausente e 2.500 NMP/100 ml. Em períodos de baixa temporada as piscinas termais apresentam teores próximos dos mínimos aferidos.

No dia sete de setembro de 2009, período de alta temporada, as piscinas da Pousada do Ipê foram monitoradas durante oito horas. Diversas análises de NH_4 , NO_3 , Ph, condutividade elétrica, temperatura e coliformes totais foram realizadas. Os resultados mostraram pH variando entre 6,5 e 7,2, NH_4 entre 0,17 e 0,36 mg/l N, temperatura média de 35°C, nitrato entre 0,4 e 0,6 mg/l NO_3 , e coliformes totais entre 200 e 800 NMP/100 ml. Os teores de NH_4 e NO_3 aumentaram ao longo do dia e apresentaram teores máximos entre 15:00 e 17:00 horas.

Foi possível avaliar, ainda, possíveis conversões de NH_4 em NO_3 durante o dia. Os resultados mostraram que, no período avaliado, não houve conversão de amônia em nitrato e os teores dos 2 compostos permaneceram constantes ao longo do dia. Os gráficos das Figuras 4.28 a 4.30 apresentam as concentrações de NO_3 , NH_4 e temperatura das águas das piscinas da Pousada do Ipê, monitoradas durante o dia sete de setembro de 2009.

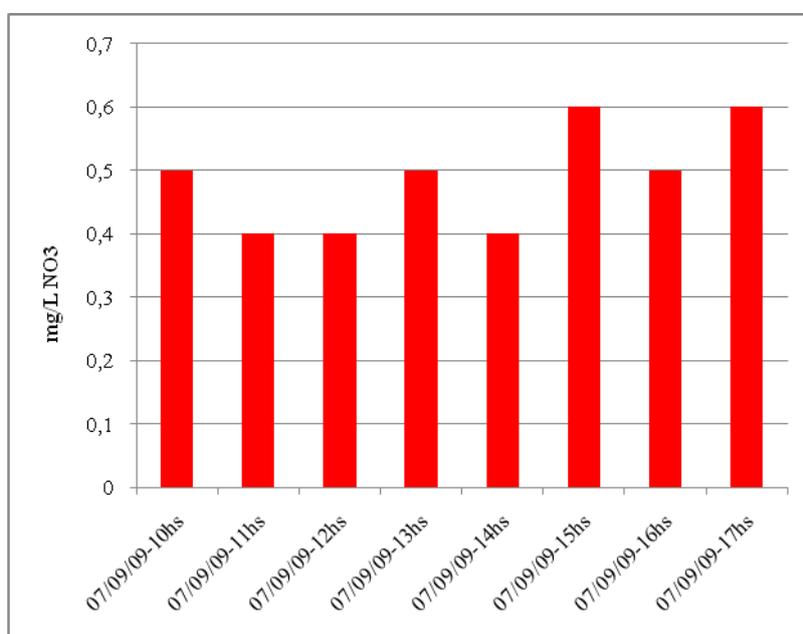


Figura 4.28 - Concentrações de Nitrato (mg/l de NO_3), nas piscinas termais da Pousada do Ipê.

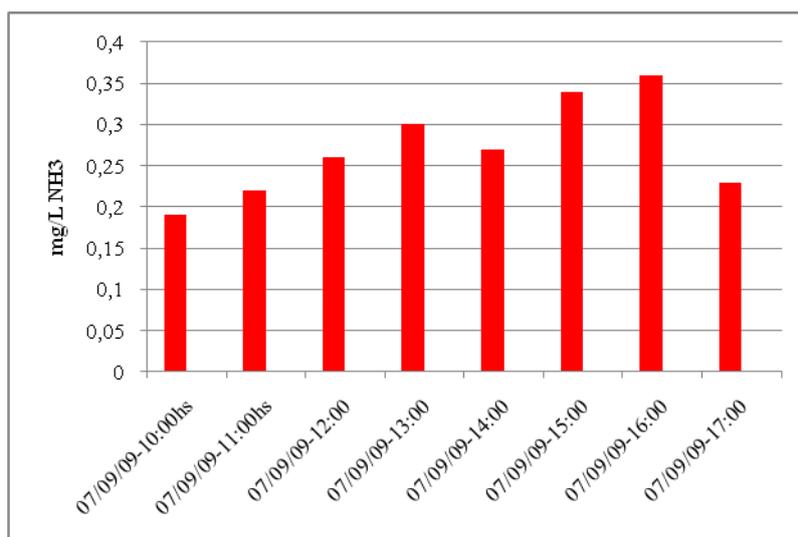


Figura 4.29 - Concentrações de NH₄ (mg/l de N), nas piscinas termais da Pousada do Ipê.

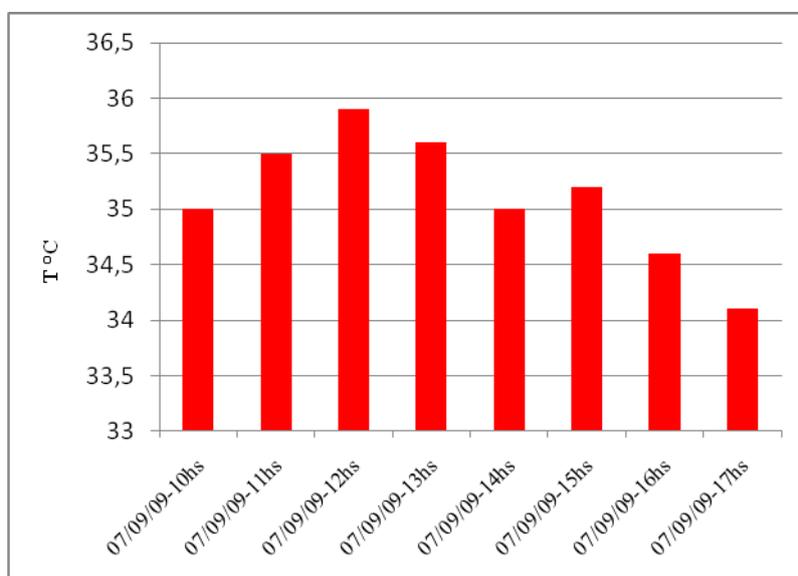


Figura 4.30 - Temperatura média nas piscinas termais da Pousada do Ipê.

Os resultados obtidos mostram que as águas de descarte das piscinas termais da cidade de Caldas Novas possuem boa qualidade, com oscilações nos teores de alguns compostos químicos em diversos períodos do ano.

4.6.3 ISÓTOPOS ESTÁVEIS

A associação de estudos geoquímicos e isotópicos é uma importante ferramenta para compreensão das variáveis que envolvem o ciclo hidrológico. Os isótopos são excelentes traçadores naturais e contribuem para o entendimento da dinâmica hídrica dos sistemas aquíferos. Os isótopos estáveis acompanham a água no ciclo hidrológico, desde a formação das chuvas, sua precipitação, escoamento e infiltração, até alcançar os aquíferos. Os diversos estágios do ciclo imprimem sua assinatura isotópica e ajudam na compreensão da dinâmica hídrica subterrânea.

As águas subterrâneas preservam as características isotópicas das águas de recarga, e a partir da análise da razão isotópica dos elementos químicos presentes na água é possível identificar mecanismos de fluxo, interações de águas superficiais e subterrâneas e associações de origens de alguns compostos químicos.

Os isótopos estáveis mais utilizados em estudos hidrogeológicos são oxigênio (^{18}O), hidrogênio (^2H -Deutério) e carbono (^{13}C). A variação das abundâncias dos isótopos estáveis decorre principalmente de processos físicos, porém, fatores químicos e biológicos também contribuem para mudanças na assinatura isotópica das águas.

O hidrogênio, o oxigênio e o carbono apresentam três formas isotópicas diferentes. O hidrogênio possui ^1H , ^2H (Deutério-D) e o ^3H (Trítio-Tr); o oxigênio ocorre na forma de ^{16}O , ^{17}O e ^{18}O ; e o carbono possui os isótopos de ^{12}C , ^{13}C e ^{14}C . A molécula de água pode ser encontrada com formas isotópicas diferentes, sendo a mais abundante a $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$. As variações nas moléculas de água dependem da origem da água e de processos que ocorrem durante o seu deslocamento e armazenamento superficial e subterrâneo.

Os resultados das assinaturas isotópicas das águas, para ^{18}O e D, são dados em termos de ‰, definido por $\text{‰} = (\text{Ra} - \text{Rp})/\text{Rp} \times 10^3$ onde, Ra é a razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $\text{D}/^1\text{H}$, respectivamente, da amostra e Rp seu valor para uma água padrão “VSMOW” (*Viena Standard Mean Ocean Water*), que corresponde ao valor médio das águas dos oceanos, adaptado da teoria de Craig (1961) e Craig & Gordon (1965). O valor de ‰ mede o enriquecimento ou empobrecimento no isótopo pesado na amostra em relação aos valores VSMOW, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2005,2 \times 10^{-6}$; e $\text{D}/\text{H} = 155,76 \times 10^{-6}$.

As variações nos isótopos de carbono são expressas em função da razão isotópica em relação ao padrão de referência internacional *PDB* (*Peedee Belemnite*), que corresponde a uma amostra padrão de calcário, da formação *Peedee Belemnite*, na Carolina do Sul. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ são obtidos de uma relação semelhante à expressa para o oxigênio, com padrão *PDB* equivalente a $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 1123,75 \times 10^{-5}$.

Para a caracterização isotópica das águas termais do Sistema Aquífero Araxá foram realizadas dez análises, através de espectrometria de massa, de ^{18}O , D e ^{13}C , no Laboratório de Isótopos Estáveis da Universidade de Brasília. Na ocasião, foram coletadas, também, amostras para caracterização isotópica da razão $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ das águas termais, que deverão ser realizadas novamente devido a modificações nos padrões experimentais do laboratório.

Os resultados analíticos foram $\delta^{18}\text{O}$ médio de $-6,42 \pm 0,18$, δD $-47,2 \pm 1,7$, e $\delta^{13}\text{C}$ $-12,73 \pm 2,5$. A Tabela 4.2 apresenta os resultados incluindo os valores de temperatura, profundidade, condutividade elétrica, pH, EH e nitrato.

	Profundidade (metros)	T°C	pH	EH (mv)	CE (µS/cm)	Nitrato (mg/l)	VSMO W/ ¹⁸ O	PDB/ ¹³ C	VSMOW /D
Poço Termal 3	250	36,2	7,2	17,4	49,4	7,52	-6,33	-14,97	-48,9
Poço Termal 23	172	34,2	7,6	37,7	74,5	14,45	-6,29	-15,15	-47,6
Poço Termal 24	350	39,2	7,5	32,4	47	7,31	-6,47	-12,13	-46,9
Poço Termal 26	240	37,1	7,3	22,4	59,7	17,16	-6,34	-13,64	-46,9
Poço Termal 37	327	36,8	7,2	13,6	43,5	3,70	-6,45	-11,83	-46,2
Poço Termal 48	195	38,7	7,4	26	43,3	9,80	-6,44	-11,86	-47,2
Poço Termal 80	419	38,1	7,0	0,1	40,7	5,72	-6,51	-10,21	-48,1
Poço Termal 208	326	36,8	7,2	-13,6	43,5	16,91	-6,46	-12,11	-47,6
Poço Termal 333	320	36,0	6,9	2,9	41,3	5,28	-6,37	-14,27	-46,1
Poço Termal 399	252	41,5	8,1	69,2	45,8	6,69	-6,60	-11,26	-46,6

Tabela 4.2 - Resultados físico-químicos e isotópicos de águas de poços termais.

As oscilações nos resultados de $d^{13}C$, entre -10 e -15 sugerem fontes difusas de ^{13}C , que podem estar associadas a carbono natural ou fontes de carbono de origem antrópica. Taylor (1987), usando critério de combinação entre os valores de ^{13}C e ^{18}O , associou diversas fontes de carbono a ambientes geológicos distintos. A associação das águas termais analisadas em diagrama $d^{18}O$ versus $d^{13}C$ é ilustrada na Figura 4.31.

As amostras não apresentaram variações quando foram relacionados os valores de condutividade elétrica e ^{18}O e D.

Comparando com valores das chuvas atuais que apresentam variações de $d^{18}O = -4\%$ e $dD = -14\%$ e as paleo águas, com idade maior que 10.000 anos, apresentam $d^{18}O$ em torno de -6% e $dD -38\%$, o Sistema Aquífero Araxá possui assinatura isotópica de águas mais antigas. Estes resultados corroboram com os dados isotópicos levantados por AMAT (2010), a partir de datações com Trítio e ^{14}C , que sugerem idades maiores que 2000 anos para as águas dos aquíferos termais de Caldas Novas.

Craig (1961) associando as relações entre Oxigênio e Deutério observou que as águas naturais guardam uma relação simples do tipo $dD = 8 d^{18}O + 10$ que são representadas pela reta meteórica mundial (*Global Meteoric Water Line-GMWL*). Esta reta marca variações nas taxas de evaporação, com diferente relação linear e coeficiente angular, de acordo com o grau de evaporação das águas.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam os diagramas $d^{18}O$ versus $d^{13}C$, e $d^{18}O$ versus dD .

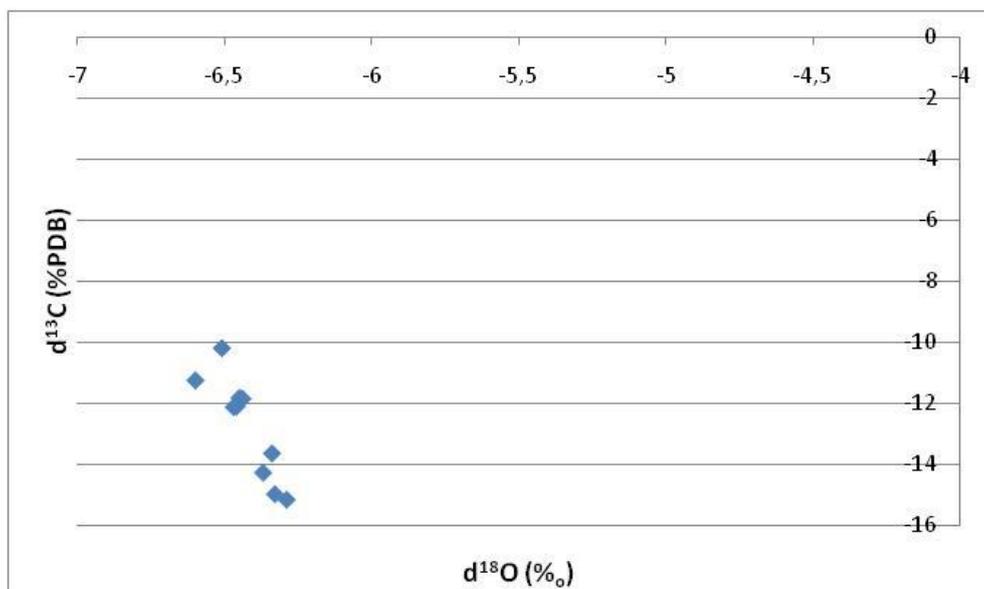


Figura 4.31 - Diagrama $d^{18}\text{O}$ versus $d^{13}\text{C}$ em poços termais do Sistema Aquífero Araxá.

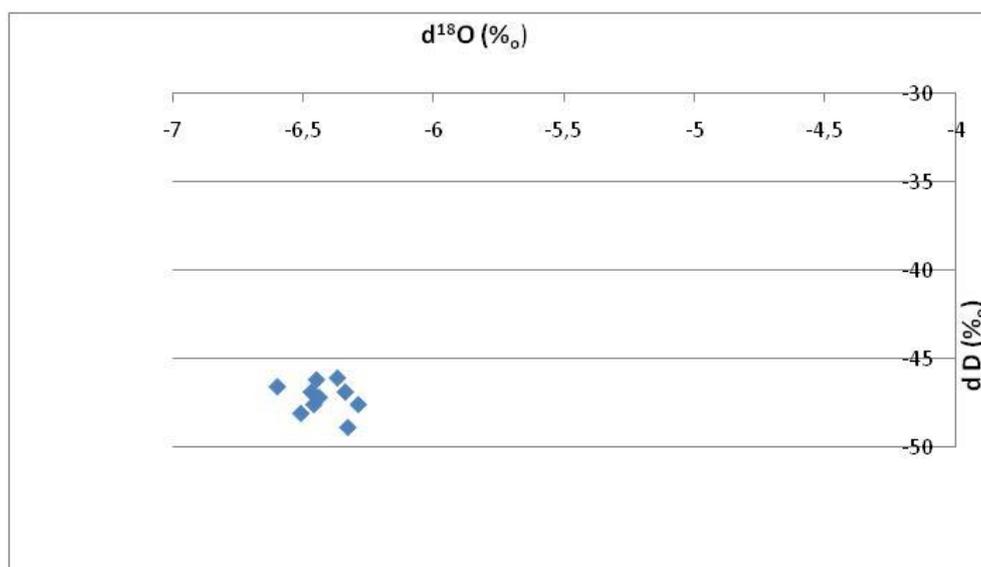


Figura 4.32 - Diagrama $d^{18}\text{O}$ versus $d\text{D}$ em poços termais do sistema aquífero Araxá

4.7. QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água é avaliada de acordo com a concentração de determinadas substâncias que definem os parâmetros ou indicadores de qualidade do recurso hídrico. As concentrações destes parâmetros são fundamentais para a determinação dos diversos usos das águas.

As águas para recarga artificial podem ter origem doméstica, industrial, de precipitação pluvial, de curso d'água superficial ou simplesmente ser oriunda de escoamentos superficiais. Em todos os casos a avaliação da qualidade da água que irá alimentar os aquíferos é fundamental. As principais técnicas de recarga artificial são realizadas em aquíferos freáticos livres, com zona não-

saturada espessa e utilizando-se de mecanismos de filtros naturais, tipo *Soil Aquifer Treatment SAT*.

Mills (2002) afirma que nutrientes, microrganismos e sólidos em suspensão causam uma contínua redução na infiltração das águas de sistemas de recarga artificial, com diminuição da eficácia do mecanismo de recarga. O prévio tratamento destas águas reduz as chances de degradação dos recursos hídricos e aumenta a eficiência dos sistemas de recarga.

Diversas publicações relativas à qualidade das águas para recarga artificial e seus sistemas de tratamento são conhecidas, com destaque para alguns trabalhos como os de Mills (2002), Asano *et al.* (2002), Rink-Pfeiffer *et al.* (2005), Sharma *et al.* (2007), Tredoux *et al.* (2007), Woodside & Wehner (2007), Missimer *et al.* (2010), Jin *et al.* (2010), Rahman *et al.* (2010), Azaroual *et al.* (2010), entre outros.

A maioria dos trabalhos associa tratamento de água residuária a injeções de água em poços tipo *ASR*, em diversas regiões do mundo. Boshier *et al.* (1998) descrevem sistemas de tratamento de efluentes com filtragem primária e lagoas de estabilização com posterior uso em sistemas de armazenamento de água subterrâneas tipo *Aquifer Storage and Recovery-ASR*, na Austrália.

O conhecimento das características gerais das águas que serão utilizadas nos sistemas de recarga artificial, a geoquímica dos aquíferos e as principais origens das contaminações oriundas dos mais diversos usos das águas, são fundamentais para a definição dos métodos de tratamento das águas e conseqüentemente para o sucesso dos sistemas de recarga artificial de aquíferos.

Os tratamentos para melhoria da qualidade da água vão desde simples filtragem, em bancos de areia, até tratamentos complexos para remoção de organismos patogênicos em efluentes sanitários. O sistema de tratamento aplicado irá depender das concentrações dos compostos que se deseja remover e do uso pretendido para a água.

4.7.1. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Segundo Gonçalves *et al.* (2003) desinfecção é definida como a etapa responsável pela redução das densidades de microrganismos de interesse e compostos indesejáveis até os limites estabelecidos pela legislação para os diferentes tipos de usos da água. Para cada tipo de uso aplicam-se critérios e padrões de qualidade, como os padrões de potabilidade e balneabilidade.

No Brasil os padrões de qualidade definidos para recarga artificial de aquíferos são determinados pela Resolução 396/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 2008), que prevê o enquadramento dos aquíferos, a implementação de áreas de proteção de aquíferos e perímetros de proteção de poços de abastecimento, bem como de áreas de restrição e controle do uso da água subterrânea. Na prática, a injeção de água em qualquer aquífero requer

que a qualidade da água utilizada seja melhor, ou no mínimo igual à qualidade da água do aquífero.

A desinfecção de águas contaminadas pode ser realizada por meio de processos artificiais ou naturais, através de agentes físicos, químicos e biológicos que atuam isoladamente ou de forma combinada.

Os agentes físicos mais utilizados são a transferência de calor (aquecimento ou incineração), as radiações ionizantes, a radiação ultravioleta e a filtração em membranas. A cloração e a ozonização são muito utilizadas para desinfecção de efluentes domésticos e industriais e compreendem os agentes químicos mais aplicados em todo o mundo. O uso de cloro é muito utilizado em países menos desenvolvidos e está em declínio nos países ricos. O uso de minerais do grupo das zeólitas, como agente químico, está em crescente aumento em diversos países do mundo. Nos processos biológicos, além dos agentes químicos e físicos, naturalmente presentes, a ação de organismos diversos resulta na inativação de patógenos (Gonçalves *et al.* 2003).

Os processos artificiais de desinfecção de água mais comumente utilizados são: cloração, ozonização e ultravioleta. A cloração é o método mais usual de tratamento de água, principalmente pela facilidade de aplicação e custos reduzidos, porém, algumas desvantagens no uso como a formação de compostos organoclorados, e toxicidade e corrosividade elevada do cloro residual, comprometem seu uso.

A ozonização é um método relativamente caro, porém muito eficiente, principalmente para eliminação bacteriológica. O ozônio é um oxidante extremamente reativo, e seu mecanismo de desinfecção inclui a destruição parcial ou total da parede celular, as reações com radicais livres e danos aos constituintes do material genético. As principais vantagens da ozonização são a rapidez da ação de desinfecção, a elevada eficiência na inativação de microrganismos e a baixa toxicidade encontrada nos efluentes ozonizados (Lapolli *et al.* 2003).

O método de radiação ultravioleta, em crescente uso no Brasil, apresenta resultados significativos no tratamento de efluentes sanitários. A utilização de sistemas com UV não gera subprodutos tóxicos e seu mecanismo primário de inativação de microrganismos consiste no dano direto aos ácidos nucléicos celulares. Sua eficiência depende principalmente das características do efluente, da concentração de colóides e partículas no esgoto, da intensidade da radiação aplicada, do tempo de exposição dos microrganismos à radiação e da configuração do reator.

Os filtros de ultravioleta podem utilizar tanto a radiação solar, como reatores que geram artificialmente a radiação ultravioleta com o objetivo de melhorar a qualidade das águas, principalmente com ação germicida. As aplicações dos filtros de ultravioleta são simples, de baixo

custo e com pouca exigência de operação e manutenção. Basicamente, a desinfecção é conseguida pela exposição dos microrganismos presentes nas águas à radiação emitida. Essa exposição à radiação ultravioleta é realizada em canais ou em dutos, denominados reatores fotoquímicos, fotorreatores ou simplesmente reatores UV (Gonçalves *et al.* 2003).

Outro mecanismo químico muito utilizado em tratamento de água é composto por filtros contendo carvão ativado. O carvão ativado possui grande capacidade de adsorção, sendo eficiente na retirada de cloro, bem como odores e sabores desagradáveis da água. O carvão ativado pode ser utilizado em sistemas de filtragem complexos ou simples, na forma granulada ou em blocos compactos.

A integração de diversos sistemas de tratamento para remoção de compostos indesejáveis é recomendável em efluentes com variedade composicional. O uso de agentes químicos, físicos e biológicos integrados é extremamente comum em grandes estações de tratamento de esgotos.

As águas descartadas de piscinas termais na cidade de Caldas Novas possuem valores médios de NH_4 entre 0,8 e 0,1 mg/l de Nitrogênio, e NO_3 entre 0,1 e 1,5 mg/l. Estes compostos, mesmo em concentrações reduzidas, são considerados os principais problemas relacionados à qualidade da água na região das águas termais.

Os sistemas de tratamento para retenção de amônia utilizando zeólitas estão em expansão e os mecanismos de absorção destes compostos, em águas descartadas das piscinas com baixa mineralização, foram avaliados e seus resultados são descritos a seguir.

Zeólitas

Os minerais do grupo das zeólitas são representados por aluminossilicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos e alcalinos terrosos que possuem estrutura cristalina tri-dimensional infinita. São caracterizados pela desidratação contínua e parcialmente reversível e pela sua capacidade de troca de bases, sem maiores mudanças estruturais (Deer *et al.* 1981). As zeólitas são incolores ou brancas, podendo apresentar cores mais escuras em virtude da presença de óxidos de ferro ou de outras impurezas.

As zeólitas foram descobertas em 1756 por Freiherr Axel Frederick Cronstedt, mineralogista sueco, que definiu o mineral que possuía reatividade em água e o nomeou a partir das palavras gregas zéo (ferver) e líthos (pedra), significando pedras que fervem (Shinzato 2007). Desde então, aproximadamente 50 espécies de zeólitas naturais foram reconhecidas, e mais de 100 espécies foram sintetizadas em laboratório.

As zeólitas naturais ocorrem em amígdalas e cavidades de rochas vulcânicas básicas e ambientes hidrotermais tardios. Em algumas rochas eruptivas ocorrem como produtos de alteração

de feldspatos ou nefelina (Deer *et al.* 1981). Desde o século XIX estes minerais são utilizados para purificação de água.

Higarashi *et al.* (2008) descrevem sistemas de tratamento de água utilizando zeólitas e destacam a grande capacidade de troca catiônica do mineral e a eficiência na remoção de amônia, em efluentes domésticos e sintéticos, percolados em aterros sanitários, efluentes de laticínios e dejetos suínos.

Abadzic & Ryan (2001) utilizaram zeólitas para remoção de Estrôncio em águas subterrâneas e avaliaram as variações no tamanho dos grãos das zeólitas e sua consequente absorção iônica. Bektas & Kara (2004) avaliaram variações de temperatura, velocidades de agitação, pH e concentração inicial de metais em soluções aquosas, e suas interferências na remoção de chumbo, utilizando zeólitas.

Sardá (2006) utilizou zeólitas para remoção de nutrientes em efluentes de dejetos suínos e afirma que as zeólitas possuem três propriedades principais: adsorção de gases, absorção/dessorção de água e troca iônica.

A relação entre a concentração inicial de amônia e a quantidade de zeólita utilizada no mecanismo de absorção é fator determinante para a remoção do contaminante. Para a definição dessas relações são utilizadas as isotermas de absorção de *Freundlich e Langmuir* (Sonnenholzner 2004).

A presença de outros cátions na solução limita as condições de absorção da amônia através das zeólitas. A presença de elementos como ferro, cobre, zinco e potássio interferem na remoção da amônia devido às forças de atração associados à carga iônica destes elementos, onde quanto maior for o volume do íon, mais fraco será seu campo elétrico na solução, com consequente menor grau de hidratação (Sardá *et al.* 2007).

Fungaro & Izidoro (2006) utilizaram zeólitas sintetizadas a partir de cinzas de carvão em termoelétricas para eliminação de íons metálicos e compostos corantes de soluções aquosas e definiram isotermas de absorção para ajuste dos dados seguindo os modelos de *Langmuir e Freundlich*.

Shinzato (2007) realizou uma compilação teórica sobre os mecanismos de remoção de metais pesados em solução através de zeólitas, e destacou que a eficiência de adsorção e capacidade de troca catiônica do mineral estão inteiramente relacionadas à estrutura cristalina das zeólitas e às características químicas dos íons encontrados em solução. Variáveis externas como temperatura, pH e concentração iônica inicial também interferem no processo de remoção de metais, assim como na sequência de seletividade iônica.

Devido à capacidade de troca iônica das zeólitas, esses minerais são amplamente utilizados no tratamento de efluentes industriais, domésticos, água de abastecimento, água subterrânea, drenagem ácida de minerações e solos contaminados (Shinzato 2007).

As zeólitas podem ser regeneradas após seu uso e reaplicadas com eficiência semelhante à zeólitas novas (Higarashi *et al.* 2008).

ENSAIOS PARA RETENÇÃO DE AMÔNIA UTILIZANDO ZEÓLITAS

Os mecanismos de sorção de NH_4 em águas descartadas de piscinas termais a partir de zeólitas naturais foram testados com a realização de ensaios *in situ* e em laboratório. Ensaios regulares também são realizados em filtro da Estação de Tratamento Simplificada - ETS, integrante da planta piloto de recarga artificial do Sistema Aquífero Araxá, em operação desde junho de 2010, na cidade de Caldas Novas.

As zeólitas utilizadas possuem composição mineralógica básica com cerca de 64% de SiO_2 e os seguintes cátions: Al^{3+} (9,72%), Ca^{2+} (2,54%), Fe^{3+} (1,56%), Na^+ (1,47%), K^+ (1,44%), Mg^{2+} (0,84%) e P_2O_5 (0,05%).

Os primeiros ensaios *in situ* foram realizados na cidade de Caldas Novas, nas proximidades do clube Império Romano, entre os dias 10 e 11 de abril de 2009, período de alta temporada e elevada concentração de turistas.

Foram testados dois tipos de filtros que simularam diferentes vazões e tempo de residência. Os filtros utilizaram zeólitas com diferentes granulometrias de 0,4 a 1,0 cm e $< 1,0$ mm (Figura 4.33). Foi construído um mecanismo de captação dos efluentes termais, com direcionamento para os filtros com zeólitas, construídos com tubo de polietileno, com 75 mm de diâmetro, 1.50 e 3.00 metros de comprimento cada (Figura 4.34), e preenchidos inicialmente com zeólitas na proporção de 90% de material grosso (0,4-1,0 cm) e 10% de material fino ($< 0,4$ mm). O tempo de residência final para o filtro de 3,00 metros de comprimento foi de 38 minutos.



Figura 4.33 - Zeólitas com granulometria 0,4-1,0 cm e $< 1,0$ mm.



Figura 4.34 - Modelos de filtros experimentais, com 1,5 e 3,0 metros, preenchidos com Zeólitas.

Os resultados de 16 amostras coletadas mostraram que os valores de entrada, que variam de 0,05 a 0,15 mg/l de amônia, não sofreram redução significativa após a passagem pelos filtros com zeólitas (Figura 4.35). Algumas amostras tiveram redução de 0,15 mg/l para 0,05 mg/l de amônia, outras apresentaram teores semelhantes de amônia na entrada e saída dos filtros. Estes resultados indicam que não há um processo sistemático de sorção, absorção ou troca entre a água de entrada e a superfície do mineral.

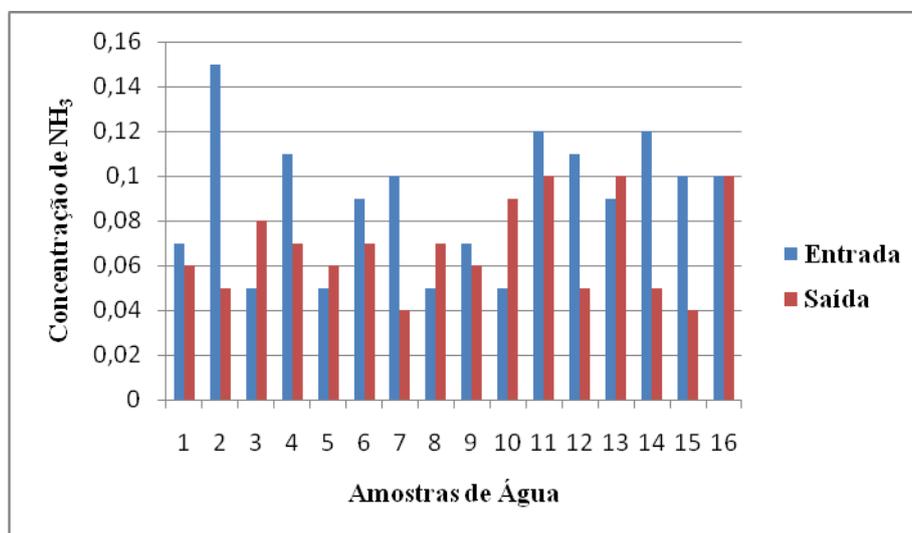


Figura 4.35 - Concentrações de NH_4 (mg/l de N), na entrada e saída dos filtros experimentais de Zeólitas.

Foram monitorados também pH, condutividade elétrica e temperatura da água, e os resultados não mostraram variações significativas na entrada e saída dos filtros. A condutividade elétrica apresentou variações entre 42,8 e 37,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, o pH variou entre 6,86 e 8,2, com média de 7,8, e a temperatura oscilou entre 36,9 e 30,1 $^{\circ}\text{C}$, com média de 35 $^{\circ}\text{C}$, ao longo do dia.

Atualmente uma Estação de Tratamento Simplificada - ETS realiza tratamento de águas termais descartadas das piscinas da Pousada do Ipê e utiliza, entre os meios filtrantes, 150 kg de zeólitas naturais, com granulometria entre 0,4-1,0 mm (Figura 4.36).



Figura 4.36 - Estação de Tratamento Simplificada - ETS, e zeólita utilizada dentre os meios filtrantes.

A ETS funciona integrada com filtros de areia, carvão ativado, zeólitas e UV. Os resultados mostram redução nos teores de NH_4 em até 80% nas águas termais após tratamento (Figura 4.37), porém, os resultados alcançados indicam que a amônia não apresenta um padrão consistente no comportamento de sorção/dessorção. Os resultados analíticos mostram, ainda, uma dessorção preferencial de sódio e absorção de cálcio e magnésio.

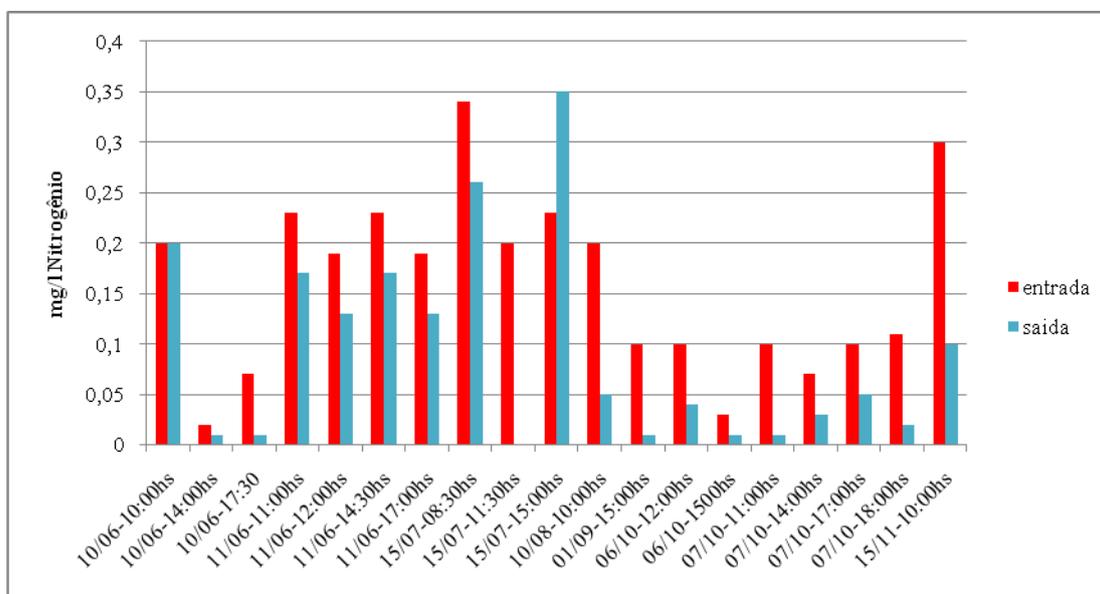


Figura 4.37 - Concentrações de NH_4 (mg/l de N), na entrada e saída da Estação de Tratamento Simplificada - ETS, monitoramento Jun-Nov/2010.

É importante salientar que os valores máximos de amônia já são muito reduzidos, não compondo um típico efluente e que em muitos casos são teores muito próximos aos limites de quantificação dos métodos analíticos. Como o limite de detecção (LD) do equipamento usado para

as análises é de 0,01 mg/l de amônia, e o limite de quantificação (LQ) considerado é de 0,1 (NQ = 10 x LD) não se pode descartar a possibilidade de estar ocorrendo problemas analíticos. Assim a falta de consistência nos resultados poderia ser atribuída à dificuldade de quantificação de teores muito reduzidos e não à falta de eficiência das zeólitas como meio filtrante.

Embora os filtros de zeólitas sejam comumente aplicados para a redução de teores elevados de amônia (ex. de 50 mg/l para 2 ou 3) os resultados alcançados não mostraram eficiência para a redução de valores desta substância em soluções ou efluentes com teores originalmente baixos. Tanto os experimentos de campo quanto os de laboratório mostram que não há um resultado consistente na redução das concentrações de amônia nos diversos ambientes e sob as diferentes condições de contorno aplicadas.

CAPÍTULO 5

RECARGA ARTIFICIAL DO SISTEMA AQUÍFERO ARAXÁ NA REGIÃO DE CALDAS NOVAS

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo discute-se a proposição, instalação e monitoramento de sistemas piloto de recarga artificial, utilizando caixas de recarga, no Sistema Aquífero Intergranular e poços de recarga no Sistema Aquífero Araxá, na cidade de Caldas Novas. A recarga artificial no sistema aquífero Araxá, através de poço de injeção, demandou uma série de estudos específicos e monitoramento permanente, e caracteriza-se como objeto de estudo principal da presente tese.

O sistema piloto de recarga artificial no Sistema Aquífero Araxá foi construído em área da Pousada do Ipê, na cidade de Caldas Novas, e compreende a utilização de águas de descarte das piscinas termais da pousada na recarga artificial do aquífero, através de poço de injeção. O poço de recarga utilizado é representado por um antigo poço tubular termal, de 226 metros de profundidade, que se encontra desativado.

O projeto experimental implantado no Sistema Aquífero Araxá envolveu as seguintes atividades: integração dos dados disponíveis e escolha da área piloto; captação e armazenamento das águas de descarte das piscinas termais da Pousada do Ipê; bombeamento e condução das águas, por meio de tubulações, para caixa de aeração na Estação de Tratamento Simplificada - ETS; aeração e bombeamento para sistema integrado de filtros; filtração utilizando areia de quartzo, zeólitas, carvão ativado e reator ultravioleta; e monitoramento quali/quantitativo das águas a serem utilizadas na recarga artificial.

Para o sistema aquífero intergranular foram construídas caixas de recarga com profundidades variadas, entre 4 e 12 metros preenchidos com material granular (cascalho aluvionar), e posterior filtração direta nos solos.

A recarga artificial no Sistema Aquífero Intergranular é realizada desde março de 2008 em 2 sistemas experimentais denominados de Estação de Infiltração Experimental AMAT 1 e AMAT 2. Os sistemas são compostos por 04 poços de recarga rasos, semelhantes aos modelos desenvolvidos por Cadamuro (2002), que recebem injeções de águas de descarte de piscinas termais de dois clubes da cidade de Caldas Novas.

Atualmente o monitoramento dos mecanismos de recarga artificial nas quatro caixas de recarga instaladas ocorre de forma descontínua e as injeções de água são apenas realizadas periodicamente.

5.2 SISTEMAS DE RECARGA PILOTO NO AQUIFERO INTERGRANULAR

A Estação de Infiltração Experimental AMAT 1 encontra-se instalada próximo ao Clube Bica-Pau, na cidade de Caldas Novas, e está em operação desde 21 de março de 2008, quando foram realizados os primeiros ensaios de infiltração contínuos. O sistema é composto por dois poços rasos, com profundidades de 8 metros (Poço 1) e 12 metros (Poço 2), e com 1,2 metros de diâmetro. Entre as duas caixas de recarga foi instalado um poço de monitoramento, com 39 metros de profundidade, o qual foi revestido com tubo de PVC de 100 mm.

As caixas de recarga, perfuradas em Latossolos Vermelhos, foram preenchidas com material granular, principalmente seixos de quartzo (Figura 5.1). Para o acabamento do sistema, a porção superior da caixa foi revestida com manilhas de concreto pré-fabricadas as quais foram tamponadas com laje de concreto. O poço 1 foi revestido com manilha até a profundidade de 4 metros, enquanto o poço 2 possui revestimento até 6 metros de profundidade.

O direcionamento das águas de descarte das piscinas aquecidas para as caixas de recarga é realizado através de tubulações de PVC, que captam as águas na saída das piscinas e direcionam para um pequeno reservatório de filtragem primária, que também funciona como caixa separadora de gordura. As águas filtradas migram pela parte inferior da caixa, e são direcionadas para os poços de recarga.



Figura 5.1 - Sistema Piloto de Recarga Artificial. Poços rasos preenchidos com material granular. Estação Experimental 1 - AMAT.

Entre os dias 21 e 22 de março foram realizados ensaios preliminares com injeção de água das piscinas termais do Clube Bica-Pau e monitoramento, dos níveis de água e temperatura, nos poços de recarga e no poço de monitoramento. O nível estático dos poços estava a 4,75 m, no início do ensaio. Os resultados mostraram que no poço 1 os níveis de água subiram de 4,75 m para 2,27 m, em 30 minutos, enquanto que no poço 2 não houve variação significativa.

Após 4 horas de ensaio o nível de água do poço raso estabilizou em 1,63 m, permanecendo neste nível durante 60 minutos, enquanto o nível d'água do poço 2 apresentou elevação de 14 cm e o poço de monitoramento oscilou 3 cm. A temperatura das águas aumentou 1,5°C durante o ensaio e retornou à condição inicial em 5 horas.

A injeção de água não foi constante durante a realização do ensaio devido à dinâmica do descarte das águas termais do Clube Bica-Pau. As águas são lançadas de acordo com o fluxo de banhistas e com variações na temperatura da água, com isso, a vazão de entrada oscilou muito durante o dia, o que justifica as oscilações nos níveis de água ao longo do ensaio, como ilustrado na Figura 5.2.

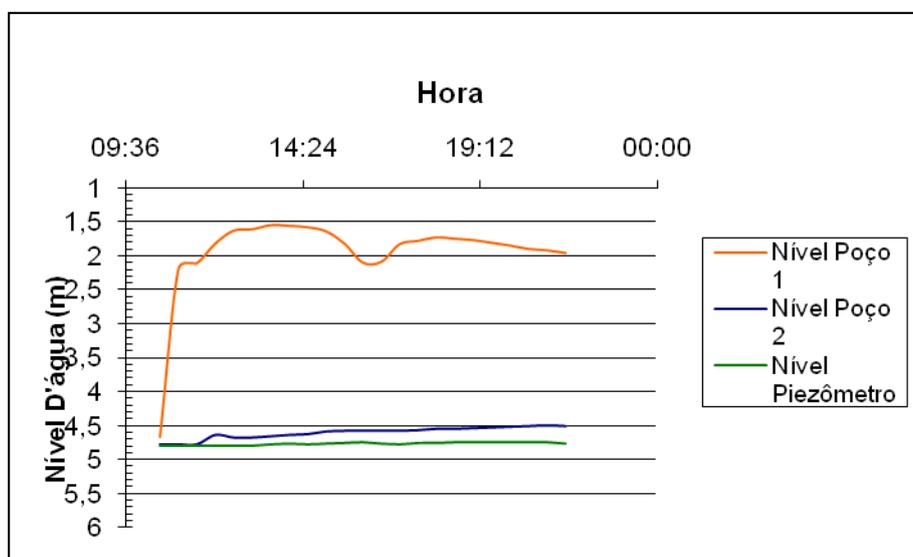


Figura 5.2 - Ensaio de Infiltração nos poços de recarga do Clube Bica-Pau, variações nos níveis de água dos poços 1 e 2, e piezômetro.

Com o término do ensaio os níveis do poço 1 e do poço de monitoramento (piezômetro) continuaram sendo monitorados durante 8 horas e apresentaram recuperação em 210 minutos. As temperaturas nos 2 poços de recarga, que apresentaram aumento durante a realização do ensaio, oscilaram entre 31,8 e 30,6 °C, durante o monitoramento sem injeção de água (Figura 5.3).

No dia 22 de março, após 8 horas de injeção e 8 horas de recuperação, os níveis de água dos poços e do piezômetro estavam, em média, 10 cm acima do nível aferido no dia anterior, com temperaturas estáveis. O nível estático do poço de recarga 1 às 09:00 horas do dia 22 de março era de 4,63 m.

A Estação de Infiltração Experimental AMAT 1 encontra-se atualmente em operação, com baixa vazão e problemas constantes de entupimento nas tubulações de entrada e saída de água, principalmente com fibras de tecido e cabelos, oriundas das piscinas termais. No sistema de tubulação que direciona águas termais de descarte para o pré-filtro de recarga existem finas telas de retenção, que devem ser continuamente limpas, para desobstrução do fluxo de água.

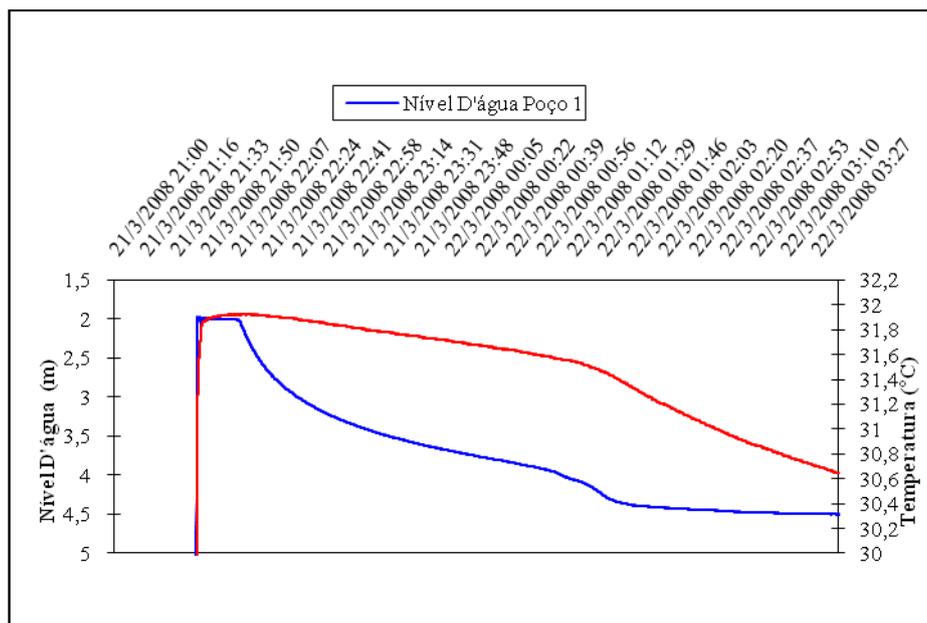


Figura 5.3 - Recuperação dos níveis d'água no poço de recarga 1 e piezômetro, após ensaio de injeção.

Entre os meses de julho e setembro de 2008, período de seca, a estação encontrava-se em manutenção e os níveis de água, sem injeção, foram monitorados. Durante o período houve rebaixamento de 5,2 metros para 6,0 metros, como ilustrado na Figura 5.4. Este nível se repetiu nos anos seguintes e deve ser considerado como média para monitoramentos futuros com ampliação da recarga artificial na região.

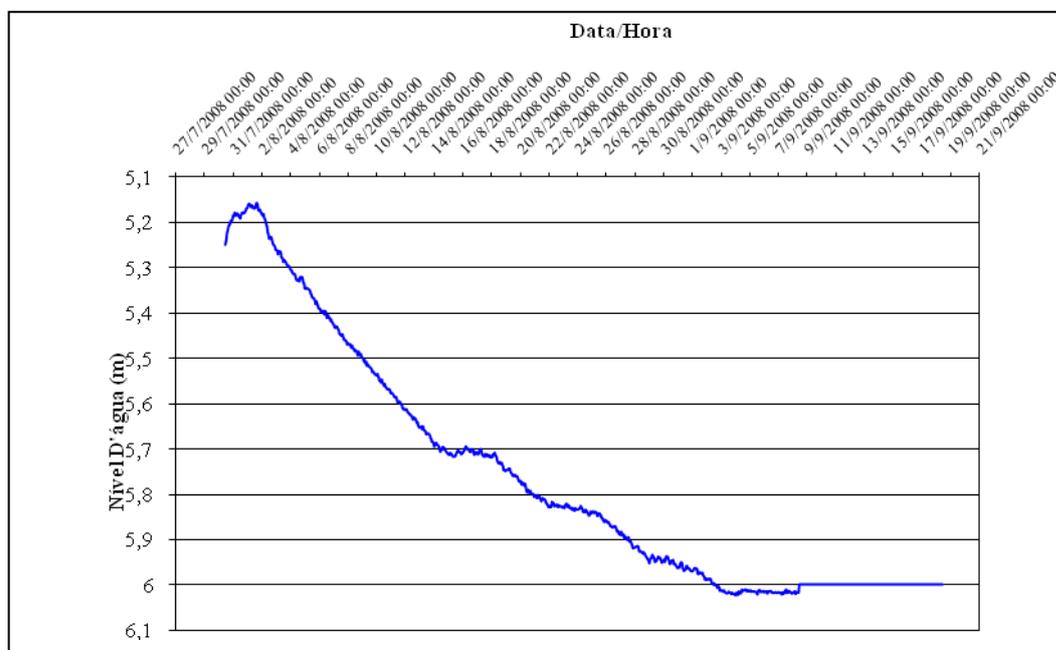


Figura 5.4 - Variação dos níveis d'água no piezômetro da Estação Experimental 1, em período sem injeção de água (Jul-Set/2008).

A Estação de Infiltração Experimental AMAT 2, instalada nas dependências do Clube Di Roma, é composta por duas caixas de recarga com 4 e 6 metros de profundidade, revestidos com

manilha e preenchidos com material granular semelhantes aos utilizados nos poços de recarga do Clube Bica-Pau.

O sistema experimental foi construído sobre solo saprolítico, com grande quantidade de fragmentos rochosos e desde sua implantação opera com problemas devido à baixa condutividade hidráulica do solo e entupimento dos sistemas de canalização. As injeções experimentais resultaram em rápida saturação dos níveis de água dos poços de recarga e atualmente a estação encontra-se inoperante.



Figura 5.5 - Estação de Infiltração Experimental AMAT 2. Poço de Recarga construído em Cambissolos.

A construção de novos sistemas de recarga, no sistema aquífero intergranular, deve contribuir significativamente para o incremento da recarga dos aquíferos termais sotopostos. A implantação das caixas de recarga deve ocorrer necessariamente em Latossolos, que na região apresentam alta condutividade hidráulica. Os sistemas precisam de manutenção regular para evitar os problemas ocorridos nas estações experimentais 1 e 2, com entupimento das tubulações de entrada e diminuição da eficácia dos mecanismos de recarga artificial.

Trincheiras preenchidas podem ser implantadas como alternativa para a recarga dos sistemas freáticos. Neste caso, os sistemas teriam as seguintes variações de dimensões: de 50 a 100 cm de profundidade; de 50 a 80 cm de largura e de 300 a 600 cm de comprimento.

A localização dos sistemas deve preferencialmente coincidir com a bacia hidrogeológica principal das águas termais, sobre zonas fraturadas/falhadas (como apresentado pelos resultados dos estudos geofísicos) e em áreas verdes públicas ou particulares.

Os sistemas podem ser recobertos com mantas geotêxteis (tipo Bidin) possibilitando a implantação de jardins e gramados.

5.3 SISTEMA DE RECARGA ATRAVÉS DE POÇO DE INJEÇÃO

A instalação do sistema piloto de recarga artificial no Sistema Aquífero Araxá envolveu diversas etapas que são descritas a seguir. As discussões sobre viabilidade qualitativa, quantitativa e térmica do sistema, bem como uma análise de efetividade/eficácia, são apresentadas no capítulo 6.

5.3.1 CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS ÁGUAS TERMAIS

O sistema de recarga piloto proposto tem início com a captação das águas de descarte das piscinas termais da Pousada do Ipê e armazenamento em um reservatório inicial com capacidade para aproximadamente 60.000 litros. Este reservatório situa-se sob uma das piscinas termais da pousada e também é utilizado para captação e reuso das águas em outras piscinas. Uma filtragem primária é realizada com gradeamento que retém particulados grossos presentes nas águas das piscinas, como plásticos, fibras de tecidos, entre outros.

Um aspecto importante observado durante o monitoramento realizado na pousada foi o sistema de rodízio na limpeza das piscinas. A pousada possui 5 piscinas que são esvaziadas e lavadas diariamente, em horários distintos. Esta dinâmica na limpeza tem interferência na qualidade das águas que serão captadas e tratadas, pois, duas piscinas são limpas no período noturno e as águas ficam armazenadas durante algumas horas, antes de serem direcionadas para a estação de tratamento simplificada. As piscinas que são esvaziadas durante o dia são rapidamente enviadas para a Estação de Tratamento Simplificada - ETS ou reutilizadas na própria pousada.

Estas pequenas diferenças no processo de descarte das águas termais podem interferir na hidroquímica das águas. As águas que permanecem no reservatório durante algumas horas podem apresentar aumento nos valores de coliformes e nitratos, e diminuição nos teores de NH_4 . Estas situações devem ser continuamente monitoradas, pois são importantes para definição de modelos de tratamento que devem ser aplicados nas plantas piloto de recarga artificial.

A Figura 5.6 ilustra as maiores piscinas de água quente da Pousada do Ipê e as tubulações que conduzem as águas termais de descarte ao reservatório. Este reservatório, além de fornecer água para o sistema piloto de recarga, ainda encaminha parte da água para uma estação de tratamento do próprio clube, que a reutiliza para diminuição da temperatura de águas de poços tubulares recentemente construídos que captam águas diretamente no Sistema Aquífero Paranoá, com temperaturas maiores que 40° C.



Figura 5.6 - Piscinas termais utilizadas para captação de águas, e tubulações que as conduzem ao reservatório da Pousada do Ipê.

5.3.2 BOMBEAMENTO E CONDUÇÃO DAS ÁGUAS TERMAIS PARA A ESTAÇÃO DE TRATAMENTO

As águas termais armazenadas no reservatório são bombeadas para a Estação de Tratamento Simplificada - ETS, situada a 300 metros do local de captação. Na parte lateral do reservatório foi instalado um sistema de bombeamento com equipamento de 5 Hp de potência e capacidade de sucção de até 30.000 litros/hora.

As águas termais são bombeadas do reservatório e conduzidas à ETS através de 300 metros de tubulação, de ferro e polietileno, de 60 e 75 mm de diâmetro, em terreno com elevação de aproximadamente 40 metros, entre cerrado preservado (Figura 5.7) e dependências da pousada. Antes da implantação do mecanismo de bombeamento no reservatório da pousada, os excedentes hídricos das piscinas termais eram direcionados diretamente para o ribeirão Caldas, como também ilustrado na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Lançamento de efluentes das piscinas termais diretamente no ribeirão Caldas; e tubulações que direcionam os efluentes para Estação de Tratamento Simplificada - ETS.

As águas descartadas das piscinas são conduzidas para reservatório de 1.000 litros, denominado de caixa de aeração, onde se inicia o processo de agitação da água, produzida pela ativação de bicos de injeção de ar. Com enchimento da caixa de aeração ocorre o transbordamento para um reservatório lateral, denominado de caixa de bombeamento, com dimensões iguais às da caixa de aeração, também com capacidade para 1.000 litros de água.

A fase inicial do tratamento das águas consiste em filtragem preliminar de particulados grossos e aeração inicial. O processo de aeração, com início no reservatório inicial, é continuado com a passagem das águas da caixa de aeração para a caixa de bombeamento, com ativação por agitação e queda d'água e posteriormente com bombeamento para o sistema de filtros integrados e aerador final, situado a 60 metros (Figura 5.8).



Figura 5.8 - Vista frontal da ETS. A esquerda entrada da caixa de aeração e caixa de bombeamento; e sistema de filtros integrados e aerador final (a direita).

5.3.3 AERAÇÃO

O sistema de aeração é composto de caixa de aeração, caixa de bombeamento e aerador final (agitador) e objetiva principalmente aumentar os teores de oxigênio dissolvido (OD) nas águas. A aeração, muito utilizada em sistemas de tratamento de esgoto, desempenha, ainda, função efetiva na remoção de organoclorados da água, além de diminuir teores de outros elementos voláteis indesejáveis.

Inicialmente foi projetado um mecanismo com injeção de oxigênio através de compressores instalados na entrada do sistema de aeração. Este mecanismo, que utilizaria um sistema de bombeamento em ar comprimido, foi substituído, devido aos custos de implantação, por um sistema com aeradores simplificados, compostos por 6 bicos de aeração, semelhantes aos utilizados em banheiras de hidromassagem, seguido de ativação por agitação das águas.

Os mecanismos propostos, por difusão de ar e agitação, consistem em injetar ar na caixa de aeração de forma a constituir pequenas bolhas de oxigênio. Entre a caixa de aeração e a caixa de bombeamento existem, ainda, pequenos seixos que funcionam como obstáculos para a passagem

da água. Esta pequena estrutura também contribui para aeração, pois gera um fluxo turbulento de água, aumentando o oxigênio dissolvido. A Figura 5.9 ilustra estes mecanismos.



Figura 5.9 - Sistemas de Aeração com bicos de injeção de ar, e queda d'água, entre a caixa de aeração e a caixa de bombeamento.

Os resultados apresentaram aumento no oxigênio dissolvido - OD, entre a entrada da caixa de aeração e saída da caixa de bombeamento, com médias de 1 mg/l de acréscimo de oxigênio, oscilando entre teores de entrada de 6,5 e 7,5 mg/l e teores de saída entre 7,5 e 8,5 mg/l. Existem mecanismos semelhantes, como aeradores complexos e misturadores de ar, que desempenham função semelhante em diversas plantas de tratamento de efluentes.

Acoplado à caixa de bombeamento existe uma bomba, de 3 Hp de potência, que direciona as águas para o aerador final (agitador) e filtros integrados contendo zeólitas, carvão ativado, areia de quartzo e reator Ultravioleta - UV. O mecanismo de filtragem integrada foi planejado de acordo com as características das águas de descarte da cidade de Caldas Novas, e o sistema foi adaptado a partir de 2 filtros desativados.

5.3.4 FILTRAGEM INTEGRADA

A segunda etapa, e mais importante mecanismo de filtragem da Estação de Tratamento Simplificada - ETS, compreende a integração de um aerador/agitador, um filtro preenchido por zeólitas, areia de quartzo e carvão ativado e um reator ultravioleta (Figura 5.10).

O filtro e o agitador foram modificados e submetidos à pintura, impermeabilização, alteração nas entradas e saídas d'água, e instalação de compartimentos para os meios filtrantes. O projeto final resultou em dois filtros, com 1,20m de altura e 0,90m de largura, com dois compartimentos de entrada e saída d'água na parte superior e inferior de cada filtro. Estes filtros estão conectados à caixa de bombeamento e integram o sistema de tratamento, dando continuidade ao processo de aeração e filtragem.

O processo tem início com direcionamento das águas a partir da caixa de bombeamento e condução através de 60 metros de tubos de polietileno de 60 mm. Inicialmente as águas termais são submetidas a um processo de agitação, em filtro projetado exclusivamente para dar continuidade ao processo de aeração. Após agitação as águas termais são direcionadas para filtro principal, localizado lateralmente, que se encontra preenchido com 400 kg de areia de quartzo, 150 kg de zeólitas e 100 kg de carvão ativado. O dimensionamento dos meios filtrantes foi elaborado de acordo com as características físico-químicas das águas de descarte das piscinas termais.

A passagem do aerador final para o filtro integrado ocorre com auxílio de mecanismos responsáveis pela dispersão de água no interior do filtro, denominados de crepinas, que são utilizados para evitar o fluxo turbulento de água na entrada do filtro. As águas fluem naturalmente através dos meios filtrantes e são direcionadas para um reator ultravioleta, (Figura 5.10).

O filtro ultravioleta, modelo Pool Clean ES-95, foi instalado para operar com vazão total de até 18.000 litros/hora, sendo fabricado em material termoplástico, com tubo de quartzo no interior do compartimento e associado a uma lâmpada com 95w de potência, responsável pela emissão de luz ultravioleta no espectro eletromagnético UV-C.

Os filtros integrados funcionam regulados para uma vazão de operação de 13.000 litros/hora e são equipados, na entrada e saída do sistema, com torneiras para coleta de amostras e um hidrômetro de alta vazão, na saída do filtro de ultravioleta. Estes mecanismos auxiliam no monitoramento quali/quantitativo das águas termais de recarga artificial. A Figura 5.11 mostra a saída das águas da ETS, com poço de recarga ao lado, e parte interna do filtro integrado, antes do preenchimento com materiais filtrantes e instalação das crepinas de dispersão das águas.



Figura 5.10 - Estação de Tratamento Simplificado - ETS, com filtro ultravioleta em detalhe.



Figura 5.11 - Saída de água da ETS, com poço de recarga ao lado; e parte interna do filtro integrado.

As Figuras 5.12 e 5.13 ilustram, em mapa e perfil, o sistema de recarga artificial piloto, com detalhamento do projeto construtivo.

5.3.5 MONITORAMENTO QUALI-QUANTITATIVO

A Estação de Tratamento Simplificada - ETS entrou em operação no dia 07 de junho de 2010 e atualmente funciona de forma descontínua, com injeções de águas termais realizadas apenas em períodos específicos. Os resultados analíticos mostram diminuição nos teores de amônia (NH_4), nitrato (NO_3), e coliformes totais, fecais e termotolerantes, e aumento nos teores de oxigênio dissolvido, nas águas termais de recarga.

Durante os meses de junho e dezembro foi realizado monitoramento quali-quantitativo contínuo das águas de descarte das piscinas termais. Foram avaliadas águas descartadas das piscinas em períodos de alta e baixa temporada e em diferentes horários durante o dia. Nos primeiros dias de funcionamento foram realizadas apenas análises quantitativas para aferição das vazões de operação, limpeza dos filtros e dos meios filtrantes. Após monitoramento quantitativo inicial o sistema foi regulado para operar com vazão de 13.000 litros/hora, que corresponde à vazão atual do projeto.

As primeiras análises de NO_3 , NH_4 e coliformes totais, fecais e termotolerantes ocorreram três dias após funcionamento inicial dos filtros. Entre os meses de junho e julho o sistema operou regularmente e foi realizado monitoramento sistemático para nitrato, amônia, coliformes, temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, pH e Eh.

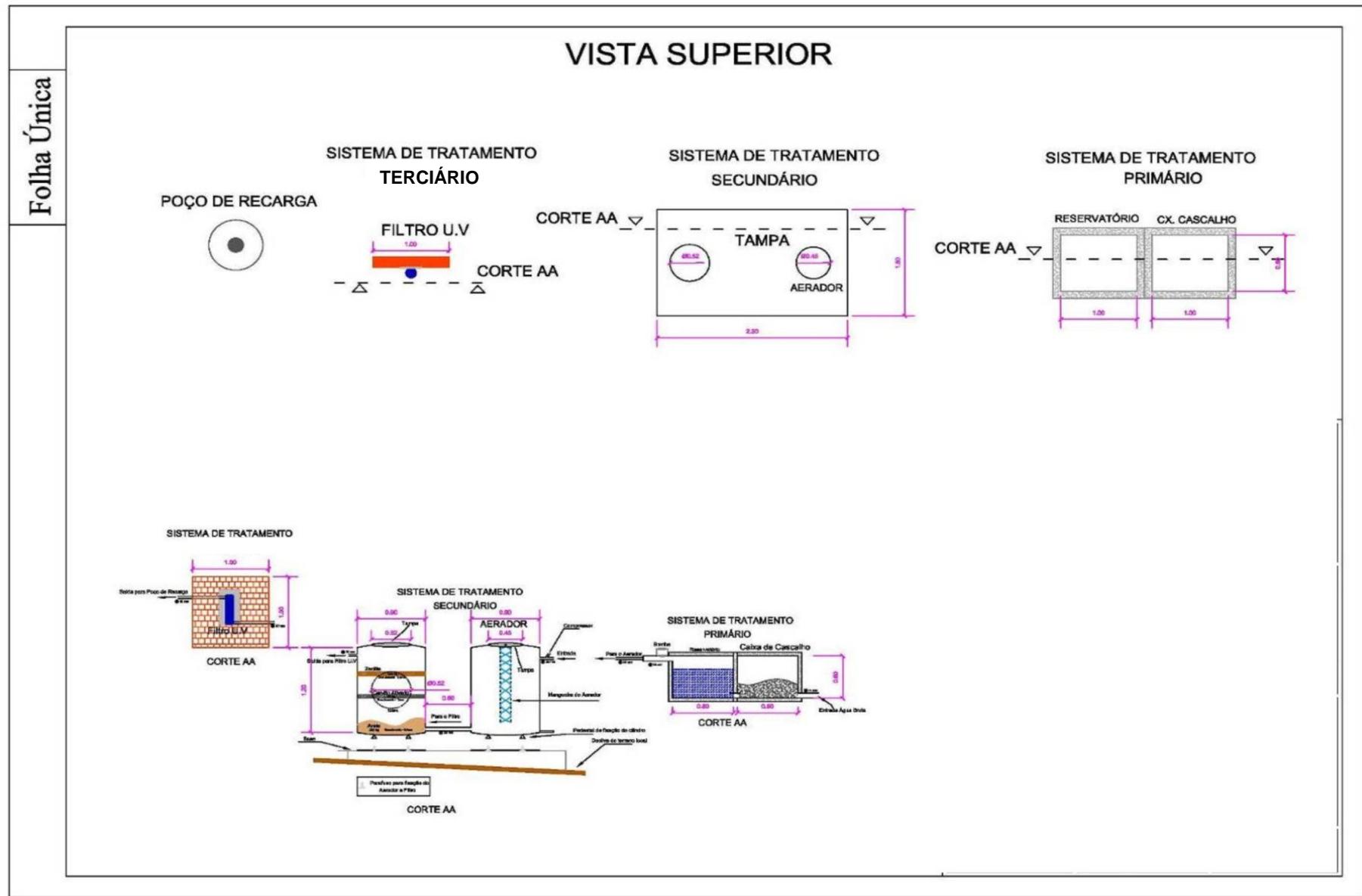


Figura 5.13 - Planta baixa, detalhe da Estação de Tratamento Simplificada - ETS.

Durante o período de baixa temporada, entre os meses de agosto e novembro, o sistema operou descontinuamente, apenas com controle semanal e nos feriados de 7 de setembro, 12 de outubro e 15 de novembro. Em determinados períodos as águas termais das piscinas não possuem nenhum incremento químico e ausência de agentes bacteriológicos. Estes teores mínimos são comuns durante o ano devido ao descarte contínuo e permanente com a necessidade de substituição das águas com baixa temperatura.

Os resultados do monitoramento mostram que as águas termais de recarga possuem baixo incremento de compostos antropogênicos, sendo que em períodos de baixa temporada as águas apresentam ausência destes compostos.

No período entre junho e novembro os resultados analíticos mostram as seguintes médias, na entrada do sistema de tratamento: 0,5 mg/l de nitrato, 0,2 mg/l nitrogênio amoniacal, 2000 NMP/100ml coliformes termotolerantes, temperatura média de 32°C, pH 7,2, oxigênio dissolvido 6,5 mg/l, e condutividade elétrica 32 µS/cm. Estes valores conferem às águas termais qualidades físico-químicas e bacteriológicas classificadas como boas segundo qualquer parâmetro de uso adotado, inclusive para consumo humano, de acordo com a Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde, que define os padrões de potabilidade da água.

A Estação de Tratamento Simplificada - ETS possui cinco pontos de coleta de água que podem refletir diferentes resultados analíticos. Existem três torneiras no sistema integrado situadas na entrada da ETS, entre o reservatório das piscinas e a caixa de aeração; uma entre as caixas de aeração/bombeamento e os filtros integrados; e uma na saída da lâmpada de ultravioleta. As coletas de água também podem ser realizadas diretamente nas caixas de aeração e bombeamento, e foram utilizadas, principalmente, para aferição dos teores de oxigênio dissolvido.

A Tabela 5.1 mostra um resumo dos principais parâmetros analisados durante o monitoramento quali-quantitativo das águas termais, entre os meses de junho e dezembro de 2010 (valores na entrada da ETS).

Monitoramento Jun-Dez/2010	Mínimas, Máximas e Médias
Temperatura	29.5°C; 33.4°C; 31.2°C
pH	6.5; 7.8; 7.2
Condutividade Elétrica	5.2µS/cm; 18µS/cm; 11.2µS/cm
Nitrato	0,1mg/l; 1,0mg/l; 0,5mg/l
Amônia	0,01mg/l; 0,35mg/l; 0,2mg/l
Oxigênio Dissolvido	6.5mg/l; 7.5mg/l; 7.2mg/l
Coliformes Totais, Fecais e Termotolerantes	Ausente; 6000 NMP/100ml; 2000 NMP/100ml

Tabela 5.1 - Resultados analíticos período jun-dez/2010 (valores na entrada da ETS).

Os resultados do monitoramento apresentam redução nos teores de nitrato, amônia e coliformes, sem eliminação total destes compostos químicos e bacteriológicos. Os coliformes termotolerantes, encontrados em grande quantidade em alguns dias, foram reduzidos em até 90% no sistema de tratamento, enquanto que os coliformes totais e fecais encontram-se ausentes na maioria das amostras. Os teores elevados de coliformes termotolerantes encontrados na saída do sistema de tratamento no dia 15 de junho são interpretados como erros instrumentais ou alta concentração biológica devido ao período sem utilização do sistema, com possível multiplicação bacteriológica. Os erros instrumentais podem estar associados a problemas no funcionamento do reator UV que, entre os dias 15 e 20 de junho, funcionava com oscilações no acendimento da lâmpada da caixa de controle do equipamento.

Os teores de saída de nitrato oscilaram entre 0,01 e 0,25 mg/l e os valores de amônia variaram entre 0,01 e 0,25 mg/l. A Tabela 5.2 mostra um resumo dos principais parâmetros analisados na saída da ETS, entre os meses de junho e dezembro.

Monitoramento Jun-Dez/2010	Mínimas, Máximas e Médias
Temperatura	29,8 - 33.3 °C
pH	6.8 - 7.9
Condutividade Elétrica	6,8 - 35 mc
Nitrato	0,01 - 0,8 mg/l NO ₃
Amônia	0,01 - 0,25 mg/l N
Oxigênio Dissolvido	6.6 - 8.5 mg/l
Coliformes Totais, Fecais e Termotolerantes	Ausente - 2800NMP/100ml

Tabela 5.2 - Resultados analíticos período Jun-Dez/2010, saída ETS.

As Figuras 5.14 a 5.16 mostram o resultado do monitoramento entre os meses de junho e novembro, com os teores de entrada e saída da ETS.

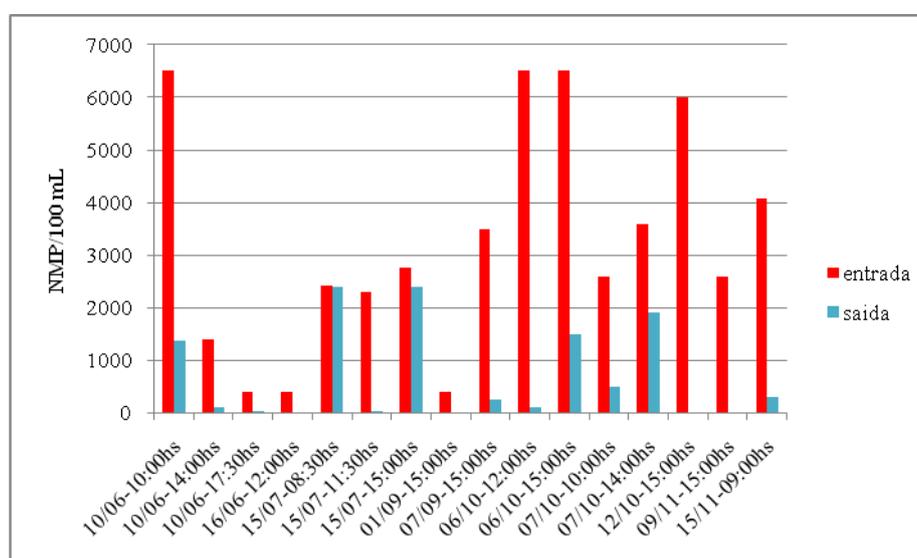


Figura 5.14 - Resultados analíticos para coliformes termotolerantes na ETS (jun-dez/2010).

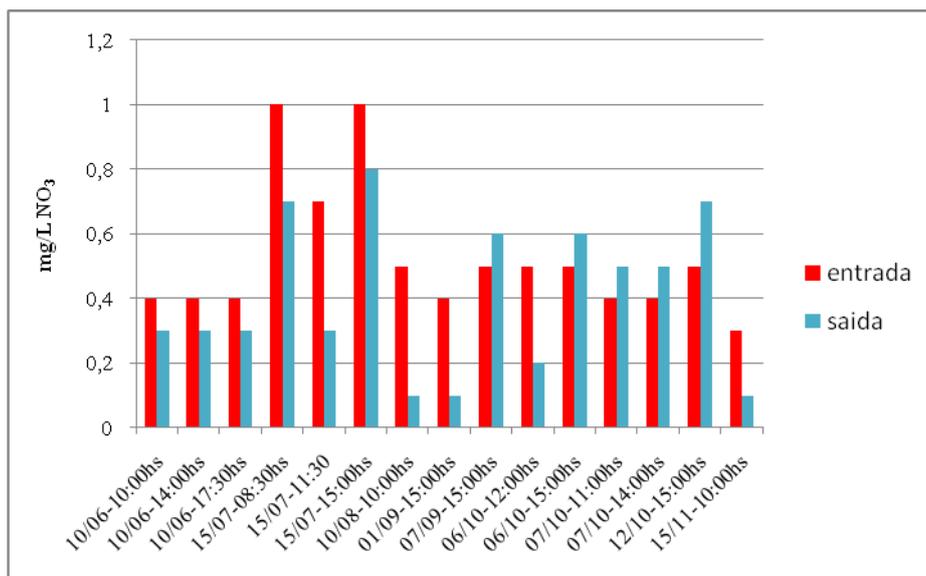


Figura 5.15 - Resultados analíticos para nitrato na ETS (jun-dez/2010).

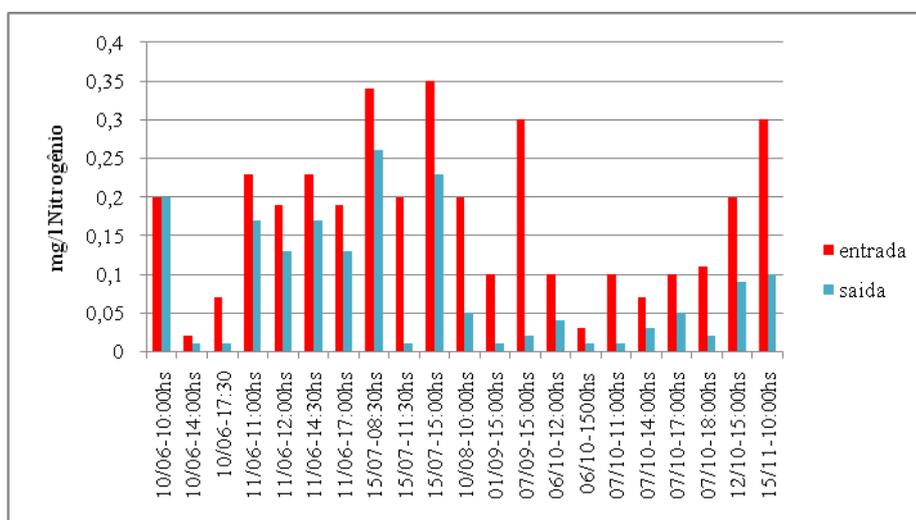


Figura 5.16 - Resultados analíticos para N amoniacal na ETS (jun-dez/2010).

Os teores de nitrato e amônia, apesar de reduzidos, apresentaram grande oscilação entre algumas amostragens realizadas. Como os valores de NO₃ e NH₄ oscilaram bastante no período monitorado optou-se por realizar uma amostragem utilizando filtro de ozônio nas águas termais de descarte da pousada do Ipê. Filtros semelhantes estavam sendo testados em 3 clubes na cidade de Caldas Novas e já demonstravam excelentes resultados na eliminação bacteriológica e controle da série nitrogenada.

Entre os dias 10 de outubro e 22 de novembro foram realizados 4 ensaios experimentais utilizando filtros de ozônio acoplados à saída da Estação de Tratamento Simplificada - ETS. O sistema de ozonização foi instalado entre o filtro integrado e o reator UV (Figura 5.17), sendo composto por um gerador de gás que realiza injeção contínua de ozônio no sistema de tratamento.

Como a eficácia do tratamento com ozônio depende do tempo de permanência mínimo para contato entre água e gás, foi projetado um mecanismo com o objetivo de simular diferentes

tempos de residência do gás no sistema de tratamento, através de tubulações de PVC de 5 e 19 metros de comprimento. A análise posterior destas diferenças de tempo de residência mostrou que não ocorreram modificações nos resultados das análises.



Figura 5.17 - Estação de Tratamento Simplificada, durante realização de ensaio com ozônio.

Os resultados analíticos mostram redução nos teores de NO_3 e NH_4 e eliminação bacteriológica completa em 7 das 9 amostras analisadas. Os teores de amônia foram reduzidos em 90 % das amostras analisadas e o nitrato foi reduzido em 100 % das amostras. Os teores de oxigênio dissolvido foram elevados nas primeiras análises utilizando ozônio e posteriormente, com regulagem na injeção de ozônio, foram reduzidos para 9,5 mg/l. A condutividade elétrica, pH, EH e temperatura não apresentaram variações significativas com uso do filtro de ozônio.

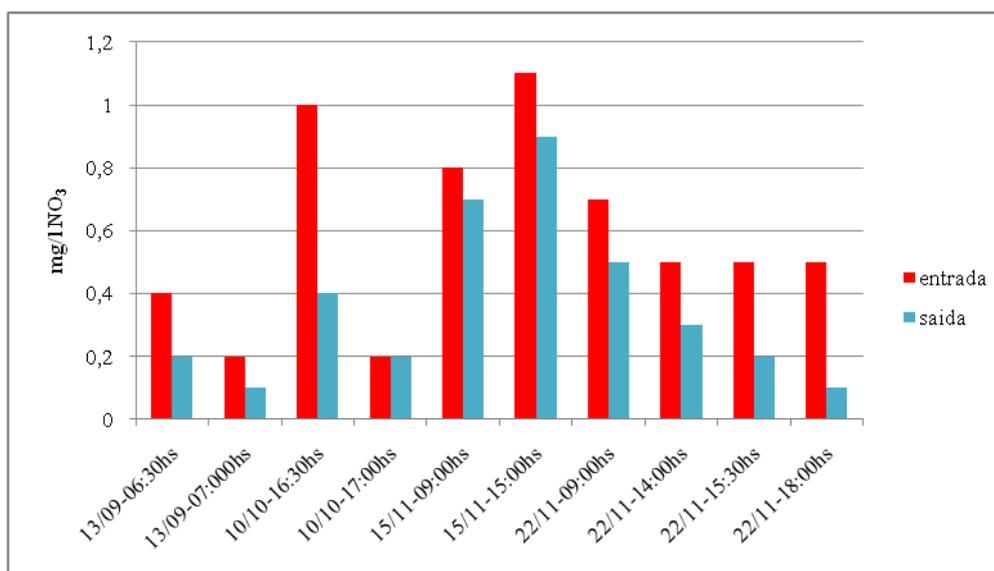


Figura 5.18 - Resultados analíticos, com uso de ozônio, para nitrato na ETS (set-nov/2010).

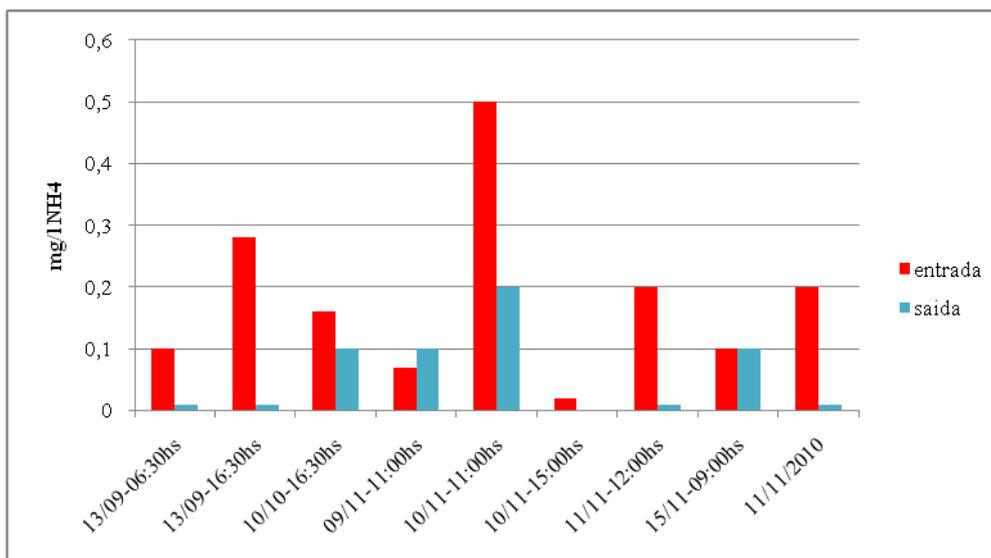


Figura 5.19 - Resultados analíticos, com uso de ozônio, para amônia na ETS (set-nov/2010).

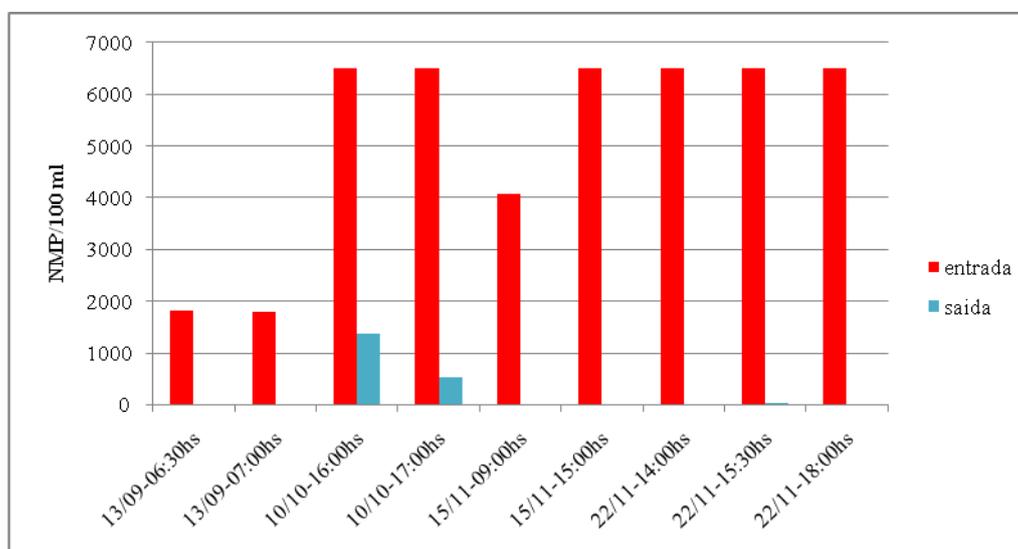


Figura 5.20 - Resultados analíticos, com uso de ozônio, para coliformes termotolerantes na ETS (set-nov/2010).

Os resultados alcançados permitem avaliar que os mecanismos de tratamento das águas de descarte das piscinas termais são muito eficientes para remoção de compostos bacteriológicos e redução de compostos nitrogenados.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A integração dos estudos prévios, desde os primeiros trabalhos científicos no âmbito dos projetos Goiânia e sudeste de Goiás, desenvolvidos pelo DNPM e CPRM nas décadas de 70 e 80 (Barbosa 1970, Campos & Costa 1980), os trabalhos desenvolvidos pelo IG/UnB, com início na década de 90 (Campos *et al.* 2000 e 2009, Cadamuro *et al.* 2000, D'el-Rey Silva *et al.* 2004 e 2008), os estudos de pesquisadores da Universidade de Berlim (Tröger *et al.* 1999, 2004 e 2007), e os trabalhos desenvolvidos pela AMAT, contribuíram para o conhecimento hidrogeológico local e foram importantes para subsidiar a definição de um projeto piloto de recarga artificial para o aquífero termal.

O monitoramento é a palavra chave nas discussões sobre a gestão do aquífero termal de Caldas Novas. Este monitoramento deve ser sistemático desde a exploração do recurso hídrico termal, através de poços tubulares, com o uso deste recurso em empreendimentos de lazer e, posteriormente, na recarga artificial dos aquíferos. A gestão integrada dos recursos hídricos termais é fundamental e, no caso específico de Caldas Novas, os mecanismos de gestão são únicos e refletem uma característica extremamente localizada e anômala, restrita à região. A gestão local de aquífero deve servir de modelo para definição de políticas públicas voltadas à gestão dos recursos hídricos.

Os estudos para viabilização da recarga artificial do aquífero termal concluíram que os mecanismos são eficazes e necessários para a manutenção do potencial termal existente. Esta ferramenta de gestão deve ser implantada gradativamente, com monitoramento contínuo de plantas piloto e nos diversos poços termais da região de Caldas Novas.

O monitoramento da qualidade das águas das piscinas da Pousada do Ipê, realizado ao longo de 1 (um) ano, e o monitoramento quali/quantitativo da ETS, realizado durante 6 (seis) meses, possibilitaram a proposição de um modelo de recarga artificial para o Sistema Aquífero Araxá. O modelo proposto utiliza recarga a partir das águas de descarte das piscinas termais, com tratamento prévio, inicialmente em períodos de baixa temporada, podendo ser ampliado para outros períodos após aprimoramento do modelo e monitoramento.

As oscilações dos níveis de água, com grande rebaixamento observado no Sistema Aquífero Araxá nos últimos 4 (quatro) anos, e principalmente no ano de 2010, reforçam a necessidade de instalação de mecanismos de recarga artificial nos aquíferos termais da região de Caldas Novas.

Os benefícios da recarga artificial são inúmeros, porém, algumas questões como a viabilidade térmica, qualitativa e quantitativa necessitam acompanhamento contínuo, para otimização do sistema. No presente capítulo, é apresentada uma análise da viabilidade/eficácia do sistema de recarga artificial, com discussões e simulações de diversos cenários de recarga, descritos a seguir.

6.2.VIABILIDADE TÉRMICA

As análises sobre viabilidade térmica foram pautadas em duas teorias principais: Balanço Térmico (cenários) e Quantificação de Reserva Permanente *versus* Volume Injetado. Foram quantificados a máxima recarga direta a partir dos resultados do balanço térmico e as perspectivas são favoráveis à implantação da recarga artificial.

6.2.1. ESTIMATIVAS DAS RESERVAS HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS

Para a estimativa das reservas hídricas foi utilizada uma adaptação de metodologias clássicas com uso de parâmetros dimensionais dos aquíferos e a partir de aproximações do balanço hídrico local.

Foram estimadas as reservas hídricas dos aquíferos fraturados incluindo as renováveis (ou reservas reguladoras) e as permanentes (ou reservas de saturação ou reservas seculares). Os resultados serão comparados com volumes potenciais de recarga em diferentes cenários, de forma a subsidiar a análise do balanço térmico.

As poligonais consideradas nos cálculos são: parte do platô da Serra de Caldas Novas para a reserva renovável do Sistema Aquífero Paranoá; cidade de Caldas Novas para a reserva renovável do Sistema Aquífero Araxá; área central da cidade de Caldas Novas (parte da sub-bacia hidrogeológica Caldas Novas) para a reserva permanente dos sistemas Paranoá e Araxá. A porção central da cidade corresponde ao local de maior demanda hídrica e onde há a principal faixa de ocorrência de águas termais.

As reservas renováveis são obtidas a partir de dados do ciclo hidrológico. Foi considerado que, do total pluviométrico da região, 50% infiltram através dos solos para o Sistema Paranoá e 35% para o Sistema Araxá (Cadamuro *et al.* 2000). Depois de descontadas as perdas por fluxo interno e evapotranspiração, são considerados 30% e 10% do total pluvial para a recarga efetiva das zonas fraturadas. O valor de 30% da precipitação é considerado de alto grau de confiabilidade para a recarga do Sistema Paranoá, pois no platô da Serra de Caldas não há nenhum tipo de uso e a área é recoberta por latossolos espessos, com elevada condutividade hidráulica sobre relevo plano (a área de ocorrência do Grupo Paranoá é integralmente associada ao Parque Estadual da Serra de

Caldas Novas). O valor de 10% para a recarga do Sistema Araxá também é coerente, uma vez que se trata de uma área urbanizada, o que amplia de forma significativa a interceptação artificial.

Estes valores foram considerados a partir da análise de vários trabalhos prévios realizados em diferentes áreas com condições hidrogeológicas similares (Zoby 1999, Carmelo 2002, Souza 2001 e Migliorini 1999).

Esta estimativa pode ser obtida pela equação:

$$\mathbf{Rr} = \mathbf{A} \times \mathbf{TP} \times \% \mathbf{P}_{\text{inf}} \quad \text{onde:}$$

Rr = reservas renováveis

A = área de recarga ou área de exposição do aquífero em sua porção livre

TP = total pluviométrico (média anual da região, considerado de 1500 mm = 1,5 m)

%P_{inf} = porcentagem da precipitação infiltrada (30% para o Sistema Paranoá e 10% para o Sistema Araxá).

É importante ressaltar que os valores relativamente elevados obtidos para as reservas renováveis do Sistema Araxá deverão diminuir gradativamente com o aumento da urbanização e impermeabilização na área da cidade.

Para a estimativa das reservas permanentes foi utilizada a equação a seguir:

$$\mathbf{Rp} = \mathbf{A} \times \mathbf{b} \times \mathbf{I}_{\text{fi}} \quad \text{onde:}$$

Rp = reserva permanente

A = área de contribuição para os cones de depressão

b = espessura saturada do aquífero

I_{fi} = índice de fraturamento interconectado

Esta proposta é derivada da fórmula utilizada para os aquíferos intergranulares (Costa 2000). A denominação de índice de fraturamento interconectado foi proposta por Campos & Freitas-Silva (1998) de forma a se ter um parâmetro análogo à porosidade efetiva, para aplicação em sistemas aquíferos fraturados. Os valores de I_{fi} para diferentes tipos de rochas podem ser obtidos a partir de resultados de diferentes estudos petrogenéticos, incluindo seções delgadas de amostras de rochas, medição de aberturas de rochas em maciços expostos, estudos com blocos de prova, dentre outros,

A espessura da zona saturada foi estabelecida a partir de dados de poços tubulares profundos, distribuídos por toda a área urbana de Caldas Novas, principalmente na área central da cidade. O ribeirão de Caldas que secciona a cidade na direção geral leste-oeste representa uma falha com rejeito médio de cerca de 150 metros, de forma que ao sul o limite entre as rochas dos grupos Paranoá e Araxá varia entre 200 e 400 metros deste lineamento e entre 400 e 600 metros ao

norte desta estrutura. A ampla variação da profundidade do contato entre as rochas dos grupos Araxá e Paranoá é devida ao relevo e à presença de blocos tectonicamente rebaixados e elevados.

Considerando que os primeiros 50 metros integram os aquíferos intergranulares, o que inclui os solos e os saprolitos, a espessura média do Sistema Aquífero Araxá é de 450 metros.

O histórico de construção de poços na região mostra que existem fraturas abertas até mais de 900 metros. Considerando que os xistos do Grupo Araxá e as coberturas de regolito (solo + saprolitos) alcançam em média 500 metros, a espessura saturada do Sistema Aquífero Paranoá, na região central da cidade de Caldas Novas, é de 400 metros.

O valor do índice de fraturamento interconectado para os xistos do Grupo Araxá foi considerado como variável entre 0,5 e 1,0%, uma vez que se trata de rochas bastante plásticas que se fraturam com alta densidade e pequena abertura. Para os quartzitos do Grupo Paranoá a interconexão das fraturas é considerada com uma variação entre 2,0 e 4,0%, pois o comportamento reológico mais rúptil favorece a maior abertura das fraturas e sua persistência em profundidade. Em ambos os casos, se considera que existe uma diminuição progressiva da abertura das fraturas com o aumento da profundidade (em função do aumento da pressão litostática).

Os índices elevados de interconexão de fraturas considerados para os quartzitos do Grupo Paranoá são considerados coerentes, pois na região central da cidade há grande interferência entre poços, de forma que se pode observar o efeito do bombeamento de poços distantes entre si mais de 1 km. As vazões elevadas dos poços também é um fator que corrobora a interpretação dos valores de interconectividade de fraturas.

Com relação à área associada a cada compartimento dos aquíferos considerados são propostas as seguintes poligonais:

- 20 km² equivalentes a um terço do platô da Serra de Caldas o que corresponde à porção da área plana e elevada responsável pela recarga da área de maior exploração na região central da cidade e;
- 15 km² correspondentes à porção central da cidade de Caldas Novas em que há a máxima densidade de poços. Esta área deverá ser utilizada para o cálculo da recarga do Sistema Aquífero Araxá e das reservas permanentes dos Sistemas Aquíferos Paranoá e Araxá. Esta área é subdimensionada para obter uma reserva mais conservadora, pode ser aumentada em até 20%.

Os demais 40 km² do platô da Serra de Caldas são responsáveis pela recarga das águas que alimentam as nascentes do rio Quente e pelas nascentes mais distantes como a Lagoa de Pirapetinga.

As espessuras saturadas dos Sistemas Aquíferos Araxá e Paranoá foram determinadas a partir dos dados dos poços tubulares profundos construídos na região central da cidade de Caldas

Novas. Estes mesmos dados mostram que o ribeirão de Caldas representa uma falha normal, cujo bloco rebaixado está situado na porção norte. O rejeito desta estrutura é variável, entretanto um valor de cerca de 170 metros pode ser utilizado como referência. Uma camada de brecha tectônica que marca o limite entre os grupos Paranoá e Araxá delimita o plano de descolamento do empurrão regional e funciona como camada guia para a determinação do limite entre os grupos Araxá e Paranoá.

A Tabela 6.1 apresenta a síntese dos dados considerados para os cálculos de reservas hídricas na região de Caldas Novas.

Parâmetro	Sistema Aquífero Araxá	Sistema Aquífero Paranoá
Área de Exposição - Ae	15 km ² = 1,5 x 10 ⁷ m ²	20 km ² = 2 x 10 ⁷ m ²
Área de Confinamento - Ac	15 km ² = 1,5 x 10 ⁷ m ²	15 km ² = 1,5 x 10 ⁷ m ²
Espessura Saturada	450 m	400 m
Índice de Fraturas Interconectadas	de 50 a 200 m: 1,0%	de 500 a 700 m: 4,0%
	de 200 a 500 m: 0,5%	de 700 a 900 m: 2,0%

Tabela 6.1 - Síntese dos parâmetros aplicados ao cálculo das reservas hídricas na região de Caldas Novas.

A partir das equações e parâmetros anteriormente considerados as reservas hídricas para os sistemas aquíferos Araxá e Paranoá resultam nos seguintes valores:

Reserva renovável Sistema Aquífero Araxá Rra = 1,5 x 10⁷ m² x 1,5m/ano x 0,10 = 2,25 x 10⁶ m³/ano.

Reserva renovável Sistema Aquífero Paranoá Rrp = 2 x 10⁷ m² x 1,5m/ano x 0,30 = 9,0 x 10⁶ m³/ano.

Reserva permanente Sistema Aquífero Araxá Rpa = 1,5 x 10⁷ m² x 150m x 0,01 + 1,5 x 10⁷ m² x 300m x 0,005 = 4,5 x 10⁷ m³.

Reserva permanente Sistema Aquífero Paranoá Rpp = 1,5 x 10⁷ m² x 200m x 0,04 + 1,5 x 10⁷ m² x 200m x 0,02 = 1,8 x 10⁸ m³.

6.2.2. VARIABILIDADE DA TEMPERATURA

Os sistemas aquíferos da região de Caldas Novas são diferenciados em função dos tipos de reservatórios (unidades geológicas e pedológicas) e também em função de suas temperaturas. As temperaturas das águas dos diferentes reservatórios são determinadas a partir das porções crustais que a água alcança.

Para efeito do balanço térmico pretendido no presente estudo, valores de temperaturas médias ou intervalos de variação para os diferentes aquíferos são atribuídos.

Para as águas freáticas é considerado um valor de 23° C que representa a média da temperatura atmosférica próximo à superfície. Esta é a temperatura considerada como de referência para a água de recarga dos sistemas aquíferos Paranoá e Araxá.

Para a determinação da temperatura dos aquíferos profundos será utilizado um grau geotérmico de 30 metros, e o princípio de que as temperaturas das águas do Sistema Araxá são decorrentes de misturas de águas mais frias de fluxo descendente com águas aquecidas com fluxo ascendente.

Embora o grau geotérmico determine que ocorra aumento de 1° C para cada 30 metros que se aprofunde na crosta, este efeito é apenas alcançado para fluxos lentos ou vinculados a sistemas hidrogeológicos regionais. Para os casos de fluxo local ou de rápida circulação as temperaturas das águas permanecem como a média da superfície até profundidades da ordem de 250 metros. Como exemplo, pode ser citado a região do Distrito Federal em que existem poços de 250 metros de profundidade com temperatura da ordem de 23° C. Isto se deve à grande conexão hidráulica entre as fraturas rasas e mais profundas. Para que ocorra o aumento da temperatura é necessário maior tempo de contato água-rocha de forma que ocorra a transferência do calor.

Dessa forma são propostos os seguintes valores: Sistema Araxá até 200 m com média de 25° C; Sistema Araxá de 200 a 500 m com média de 37° C (já considerando as misturas com águas de fluxo ascendente); Sistema Paranoá de 500 a 700 m com média de 40° C e Sistema Paranoá entre 700 a 900 m com média de 50° C.

As águas utilizadas nos sistemas pilotos de recarga apresentam variações entre 29,7 e 32,1° C. Esta temperatura é alcançada depois que as águas de circulação nas piscinas com média de 37° C são descartadas para a rede de drenagem pluvial.

A Figura 6.1 mostra uma ilustração esquemática com as possíveis variações de temperatura e trocas de calor potencial entre os diferentes reservatórios.

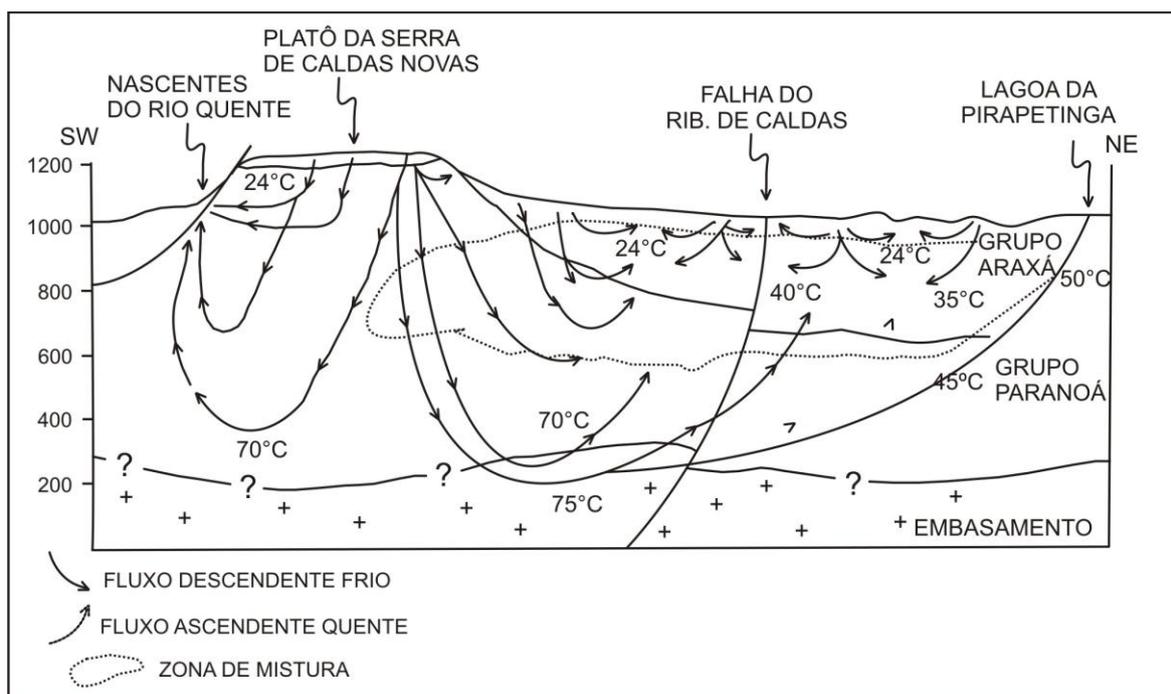


Figura 6.1 - Ilustração esquemática de variações de temperatura e trocas de calor potencial entre os diferentes reservatórios/aquíferos.

6.2.3. DISCUSSÃO DE CENÁRIOS DE RECARGA ARTIFICIAL

A avaliação de volumes de misturas entre águas de recarga naturais e águas de recarga artificial será feita apenas para os sistemas de recarga nos aquíferos Araxá e Paranoá, uma vez que na proposta de recarga artificial do sistema aquífero intergranular a água deverá percorrer todo o sistema solo/xistos confinantes/aquífero termal, o que compõe um percurso similar ao que a água sofre durante o processo natural.

As discussões apresentadas a seguir terão como base dois diferentes cenários com volumes crescentes de aporte de águas de recarga artificial direta. Este aumento pode, na prática, ser verificado com ampliação do número de pontos de poços de injeção ou ampliação do tempo de operação do sistema de recarga.

No Cenário 1 é considerada a existência de 10 sistemas de recarga com injeção de 10 l/s durante 10 horas diárias por 100 dias anuais. Neste caso, o volume total injetado deveria alcançar 36.000 m³/ano. No Cenário 2 os mesmos dez sistemas de recarga são relacionados à injeção de 10 l/s durante 20 horas por 180 dias anuais. Assim o volume acumulado seria de 129.600 m³/ano.

Nos dois casos, os volumes anuais de recarga comparados com a água de reserva permanente do Sistema Aquífero Paranoá Termal que é estimado em 1,8 x 10⁸ m³ são respectivamente de 0,02% e de 0,072%. Mesmo a recarga acumulada durante duas décadas resultaria em 0,4% e 1,44% da reserva permanente.

Para o Sistema Aquífero Araxá Termal, com reserva permanente de $4,5 \times 10^7$, os volumes de recarga correspondem a 0,08% e 0,29% ao ano e 1,6% e 5,76% ao longo de 20 anos.

Para efeito de análise de mistura serão considerados apenas os volumes para o aquífero Paranoá, uma vez que este é de fato o reservatório responsável pelo aquecimento das águas do aquífero Araxá a partir de misturas de águas.

Uma análise direta de mistura de águas de reserva permanente com as águas de recarga nos dois cenários, no acumulado de 20 anos, mostra a seguinte relação de volumes: a) no Cenário 1 deverá ocorrer uma mistura de $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$ a uma temperatura média de 40° C com $7,2 \times 10^5 \text{ m}^3$ a uma temperatura média de 31° C e b) no Cenário 2 deverá ocorrer uma mistura de $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$ a uma temperatura média de 40° C com $2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ a uma temperatura média de 31° C .

Considerando a média do volume ponderada pela temperatura fica nítido que em uma análise global, isto é, avaliando toda a água de recarga e todo o sistema aquífero Paranoá Termal, não deveria ocorrer qualquer redução significativa da temperatura em função da recarga artificial direta. Entretanto, a análise não pode ser global e sim considerar a relação da entrada da água de recarga nas proximidades dos pontos de injeção em um volume de aquífero em que há dissipação hidráulica da recarga.

Neste caso será utilizado o termo raio efetivo de dissipação da recarga, em um conceito similar ao raio efetivo de dissipação utilizado por Bouwer & Rice (1976) para o tratamento de dados de ensaios do tipo *Slug Test*.

Em função da ampla conexão hidráulica e da abertura das fraturas nos quartzitos, é possível afirmar que a distância que poderá ocorrer mistura de águas deverá superar uma centena de metros ao longo dos principais planos de anisotropias. Com relação à matriz rochosa não fraturada ou pouco fraturada a distância deverá ser reduzida, sendo arbitrada em 10 metros.

Assim, fica evidente que a figura geométrica na qual haverá mistura de águas não será um cilindro, mas um volume com dimensões irregulares, alongadas em direção aos planos das principais fraturas/falhas. A análise sobre imagens orbitais e fotografias aéreas, aliada a medições de campo e resultados de estudos geofísicos mostra que estas direções são preferencialmente W-E e N45E a N60E, como apresentado na Figura 6.2.

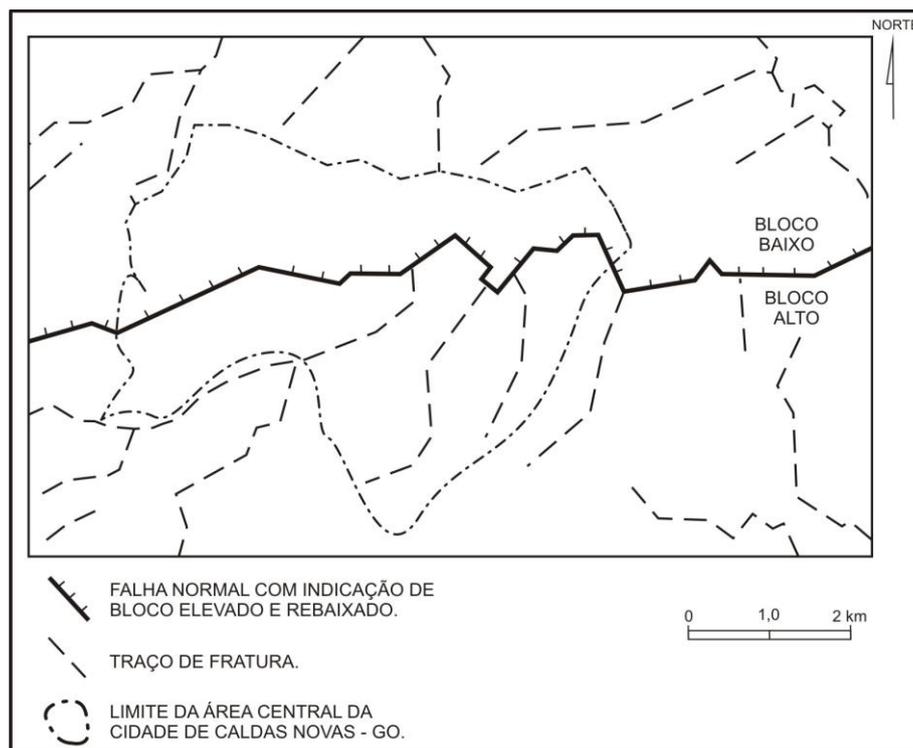


Figura 6.2 - Mapa de lineamentos da região central da Cidade de Caldas Novas, parte da Sub-Bacia Hidrogeológica Caldas Novas.

Dessa forma considerando o aquífero segmentado e não como um sistema único, pode-se afirmar que deverá ocorrer localmente, no raio de influência dos poços, a diminuição da temperatura, entretanto a recarga não deverá alterar de forma significativa as trocas de calor e temperaturas das águas dos aquíferos fraturados como um todo.

Como não é possível modelar o raio de influência de cada poço de injeção, pois não é possível determinar todos os planos de anisotropias, sua abertura, continuidade lateral e interconexão, a forma de se avaliar o efeito da provável diminuição da temperatura da água será a partir do monitoramento contínuo. Assim, todos os poços submetidos à recarga e os poços adjacentes (inicialmente situados em um raio de até 250 metros) deverão ser equipados com sistema de medição automática de nível e temperatura.

A Figura 6.3 ilustra a proposta de monitoramento para o poço piloto de recarga, com raio de interferência em 100, 150 e 250 metros. Todos os poços apresentados fazem captação do sistema Araxá e possuem profundidades semelhantes às do poço de recarga, situado na Pousada do Ipê. Esta metodologia proposta deverá ser utilizada quando do início das injeções no poço piloto e o monitoramento automático do nível e da temperatura deve ocorrer necessariamente nos 4 poços termais do clube CTC e nos poços dos clubes Primavera, Residencial Rio Caldas e Pousada do Ipê (próximo ao Lago do Ipê). Para o monitoramento mais eficaz sugere-se a instalação de estações telemétricas, com medições remotas de nível e temperatura.

O fato de a recarga artificial funcionar como um processo intermitente deverá minimizar o efeito da perda de calor. Estima-se que as águas naturais e de recarga deverão sofrer uma rápida mistura a partir da tendência de subida da água naturalmente quente e descida da água de recarga, sempre mais fria e, portanto mais densa. Os efeitos locais de resfriamento mínimo da água são pequenos se comparados aos problemas de superexploração e diminuição das taxas de recarga natural, que podem culminar com a exaustão deste importante recurso natural.

Uma avaliação feita com base na disponibilidade de águas descartadas das piscinas mostra que os dois cenários considerados são superestimados para a possibilidade real de futura recarga. No cenário realista deve-se considerar a injeção de 10 l/s durante 5 horas por dia em 130 dias por ano, o que corresponde ao total médio de dias úteis de segunda- feira a quinta-feira, excluindo os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e julho. Assim, para se alcançar os volumes apresentados nos dois cenários hipotéticos, a recarga deveria ser realizada em um número muito grande de poços.

Com o avanço do monitoramento e obtenção de mais resultados, novos poços tubulares poderão ser perfurados e utilizados tanto para o bombeamento e produção de água, quanto para a injeção e recarga. Neste caso estes poços teriam a função de recuperação do armazenamento de aquíferos, tipo *Aquifer Storage Recovery (ASR wells)*.

6.2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estimativas das reservas hídricas do aquífero termal de Caldas Novas, considerando apenas a principal bacia hidrogeológica explorada indicam volumes da ordem de 45 milhões de metros cúbicos para o Sistema Aquífero Araxá e de 180 milhões de metros cúbicos para o Sistema Aquífero Paranoá.

Os parâmetros aplicados para as estimativas hídricas renováveis e permanentes nos aquíferos da região de Caldas Novas são considerados coerentes com as condições hidrogeológicas locais. O índice de fraturamento interconectado variável de 2 a 4% é considerado factível, tendo sido determinado por analogia com sistemas similares e em função das vazões médias dos poços profundos da região.

A análise global mostra que diferentes cenários com volumes progressivos de recarga artificial não alteram a temperatura das águas dos aquíferos uma vez que a recarga representa um volume insignificante com relação à reserva de saturação. Por outro lado, a recarga poderá alterar a temperatura nas vizinhanças dos poços de injeção, uma vez que a mistura das águas não se dá de forma instantânea ou homogênea.



Figura 6.3 - Poço de Injeção e proposta de monitoramento da recarga artificial no Poço de Recarga Tamburi, na Pousada do Ipê. Bases Cartográficas: SIG-Goiás e Imagem *Google Earth*, ano de obtenção 2010.

A bacia hidrogeológica principal que controla o termalismo na região de Caldas Novas corresponde à porção central da cidade, onde há forte interferência entre os cones de depressão dos diferentes poços. Nesta região são observadas as maiores aberturas das fraturas (principalmente nos quartzitos) e ocorrem as maiores temperaturas das águas.

Conclui-se que a recarga artificial das águas termais da região de Caldas Novas é viável com relação à variabilidade da temperatura, de forma que não ocorrerá o resfriamento dos recursos hídricos naturalmente contidos no aquífero. Esta conclusão é corroborada pela análise quantitativa entre volume de recarga e volume de reserva permanente; pelo fato de que a recarga deverá ser realizada de forma intermitente; pelo uso de águas com temperatura da ordem de 31° C, e pela análise dos mecanismos de misturas destas águas.

6.3 VIABILIDADE QUANTITATIVA

A diminuição das reservas renováveis está associada à diminuição das taxas de recarga natural no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas. A expansão urbana, principalmente nos últimos 10 anos, comprometeu as áreas de recarga dos aquíferos termais. Em um cenário hipotético, conservador, com redução das áreas verdes/permeáveis da cidade em apenas 1 km², associando índices pluviométricos anuais médios de 1.500 mm e considerando uma taxa de infiltração média de 10%, nos últimos 10 anos deixaram de infiltrar aproximadamente 1,5 x 10⁶ m³ de água. Neste mesmo período as demandas por água subterrânea aumentaram consideravelmente.

Os mecanismos de recarga artificial são importantes para compensação da impermeabilização gerada pela urbanização e crescimento desordenado da cidade. As caixas de recarga, por poços rasos ou trincheiras, e os poços de injeção, podem ser instalados em diversos locais da cidade, no interior da sub-bacia Caldas Novas, em clubes de lazer, como nos projetos pilotos em operação, captando águas de descarte de piscinas termais, ou em locais diversos como praças, escolas, entre outros prédios públicos, com captação de excedentes de chuvas.

As caixas de recarga artificial são tecnicamente viáveis em locais com Latossolos, associados a baixas declividades do terreno, em áreas onde os níveis d'água sejam mais profundos e, de preferência, em áreas com algum tipo de vegetação preservada. A Figura 6.4 indica 12 locais potenciais para instalação de caixas de recarga em áreas verdes da cidade de Caldas Novas. Para maior eficiência do sistema as caixas de recarga artificial devem ser construídas de acordo com os modelos propostos no sistema piloto do clube Bica Pau.

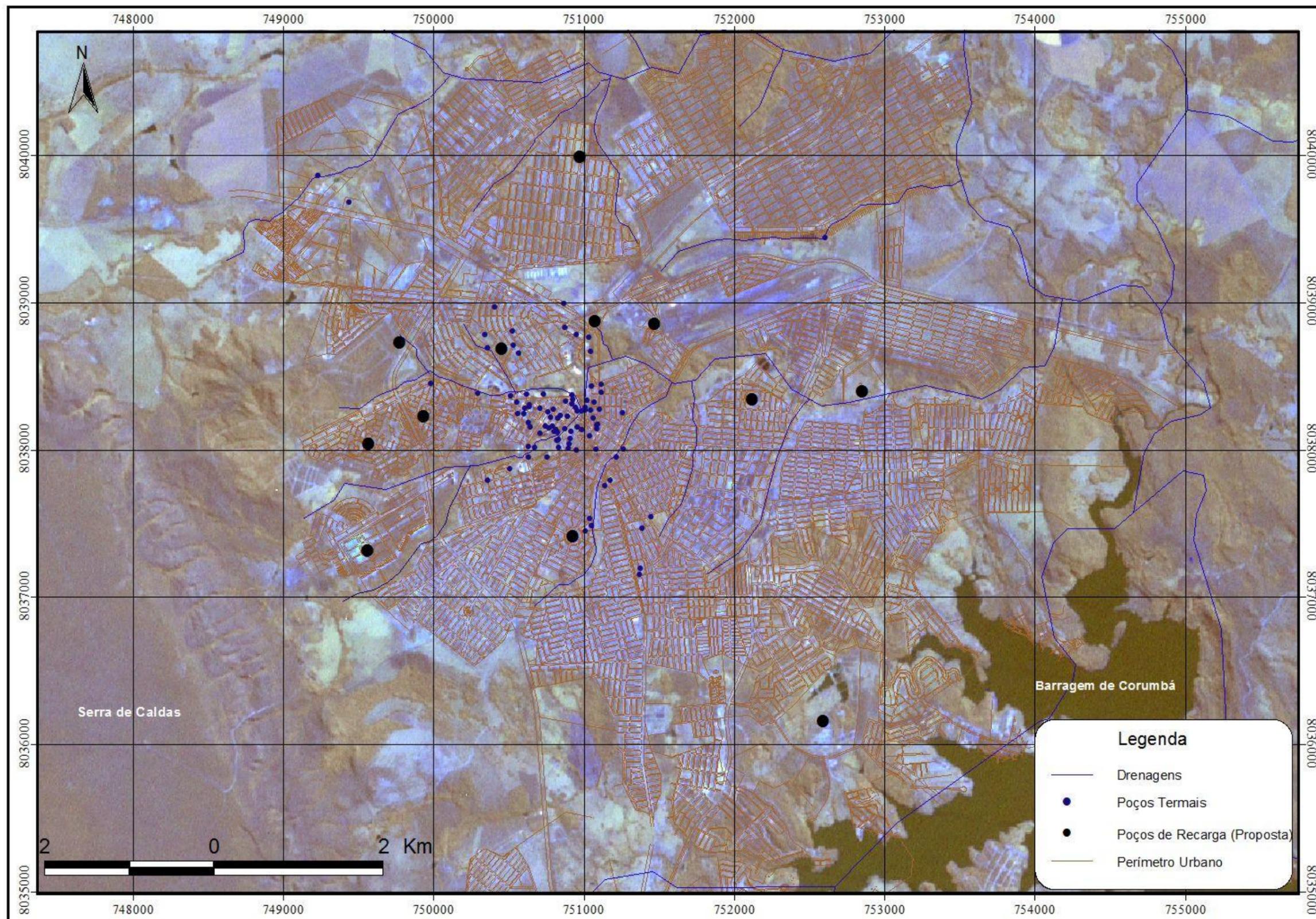


Figura 6.4 - Proposta de instalação de poços de recarga no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas.
Base cartográfica: Imagem LANDSAT 7 ETM+, Bandas 1,2,3, 2006.

Atualmente o poço de recarga instalado no clube Bica-Pau opera com capacidade de recarga de 18.250 m³/ano. A simples ampliação dos mecanismos de recarga, com 10 poços semelhantes aos do clube, compensaria as perdas com impermeabilização e após 10 anos geraria um incremento na recarga total de 1,8 x 10⁶ m³ de água. A injeção associada a excedentes pluviais traria, ainda, benefício com a diminuição dos escoamentos superficiais, minimizando os possíveis eventos de cheia e enchentes na cidade de Caldas Novas. A eficácia dos mecanismos de recarga e o incremento nas reservas de água são aumentados com uso regular e contínuo das águas de descarte das piscinas termais de diversos clubes da cidade.

A vazão outorgada pelo DNPM é de 1.800 m³/hora, durante 14 horas/dia, para 141 poços termais, que corresponde a 12,7 m³/hora/poço, porém, apenas 1.240 m³/h são utilizados (Andrade & Almeida 2011). Além dos poços termais Haesbaert & Costa (2000) também descreveram a existência de mais de 200 poços de água fria na região. Atualmente este número deve ser superior a 300 poços frios.

Caso a totalidade de poços outorgados entre em operação com vazão máxima durante 14 horas/dia, em 1 ano serão explotados 9,1 x 10⁶ m³ de água, que corresponde uma vazão maior que as reservas renováveis, estimadas em 2,25 x 10⁶ m³/ano. Se considerarmos uma exploração média em 200 poços frios, com vazão de 2 m³/hora, durante 8 horas/dia, teremos um acréscimo no volume bombeado de 1,1 x 10⁶ m³ de água/ano, ou seja, as taxas de bombeamento são extremamente elevadas e comprometem consideravelmente as reservas permanentes dos aquíferos termais.

A ampliação dos mecanismos de recarga direta, através de poços de injeção, com 10 sistemas pilotos e vazão média de 15.000 litros/hora, durante 5 horas/dia e 130 dias/ano, resultará em incremento de 9,7 x 10⁴ m³/ano, que corresponde a 4,3 % da reserva renovável anual do Sistema Aquífero Araxá termal. Em 10 anos o incremento na recarga dos aquíferos termais ultrapassaria 975.000 m³ de água.

Os poços tubulares da região possuem excelentes condutividades hidráulicas, com média de 10⁻⁵ m/s. As altas condutividades dos aquíferos termais podem ser corroboradas através de uma simples simulação do volume injetado no ensaio de infiltração prolongado no Poço Tamburi. Assumindo $V = \pi r^2 \times h$ tem-se que o volume total infiltrado é de $V = 3,14 (100\text{m})^2 \times 1,4 \text{ m}$, onde 100 m corresponde ao raio proposto (sem interferência em poço vizinho) e 1,4 m é a variação da coluna d'água ao longo do ensaio. Com estes parâmetros o volume total para a área assumida é de 2452 m³, que corresponde a aproximadamente 60% do total injetado. Por esta simples simulação é possível afirmar que a água injetada migra para outras direções, distribuída ao longo dos sistemas de falhas/fraturas dos sistemas aquíferos, e não fica restrita à região injetada.

Para início da recarga artificial no Sistema Aquífero Araxá é fundamental realizar um monitoramento contínuo no poço piloto de recarga, situado na Pousada do Ipê. Após análise da efetividade do sistema sugere-se a implantação de um novo sistema piloto, de preferência no poço Paineiras, que já foi submetido a ensaio de infiltração prolongado e apresentou excelentes condições hidráulicas. O monitoramento eficaz durante alguns anos deverá direcionar as propostas de ampliação do sistema.

A Figura 6.5 ilustra o mapa da região central de Caldas Novas com os principais poços termais em operação e 6 poços sugeridos para etapas posteriores de recarga artificial. Os poços Tamburi e Paineiras, que estão destacados na cor vermelha, são prioritários para efetivação da recarga. É também sugerida a instalação de outros 4 poços, destacados em azul, nas proximidades do Residencial Paineiras, Pousada das Pirâmides, Residencial Ponta Verde e SESC. Estes poços tubulares no interior da sub-bacia Caldas Novas possuem, em suas vizinhanças, poços termais produtivos que serão importantes para o monitoramento.

As diversas simulações de reservas e volumes injetados/armazenados são importantes para corroborar com a idéia de viabilidade quantitativa dos mecanismos de recarga artificial para região de Caldas Novas. Estas simples simulações mostram cenários não muito favoráveis para manutenção do potencial hídrico existente, caso medidas específicas de gestão não sejam implantadas.

Uma tentativa de se realizar um balanço quantitativo para se determinar o tempo necessário para que a recarga artificial recupere os níveis d'água da década de 1980 não alcançou sucesso. O bombeamento dos poços de águas frias do Sistema Aquífero Araxá é uma das variáveis de que não se tem controle. A área total da perda de recarga por impermeabilização também não é simples de ser determinada de forma precisa. Como estes dois parâmetros são muito importantes do ponto de vista do balanço entrada-saída de águas do aquífero a quantificação não é conclusiva.

De qualquer modo a prática da recarga deverá ter papel importante na estabilização e recuperação parcial dos níveis, caso seja desenvolvida de forma adequada, em locais propícios à absorção da água em número mínimo de estações (entre 10 e 15 sistemas de recarga em poços de injeção). A recarga poderá ativar maior mistura de águas entre diferentes zonas fraturadas, pois com a elevação pontual ou regional da superfície potenciométrica poderá haver inversões de fluxo e modificação das direções e arranjo das curvas equipotenciais dos aquíferos fraturados.

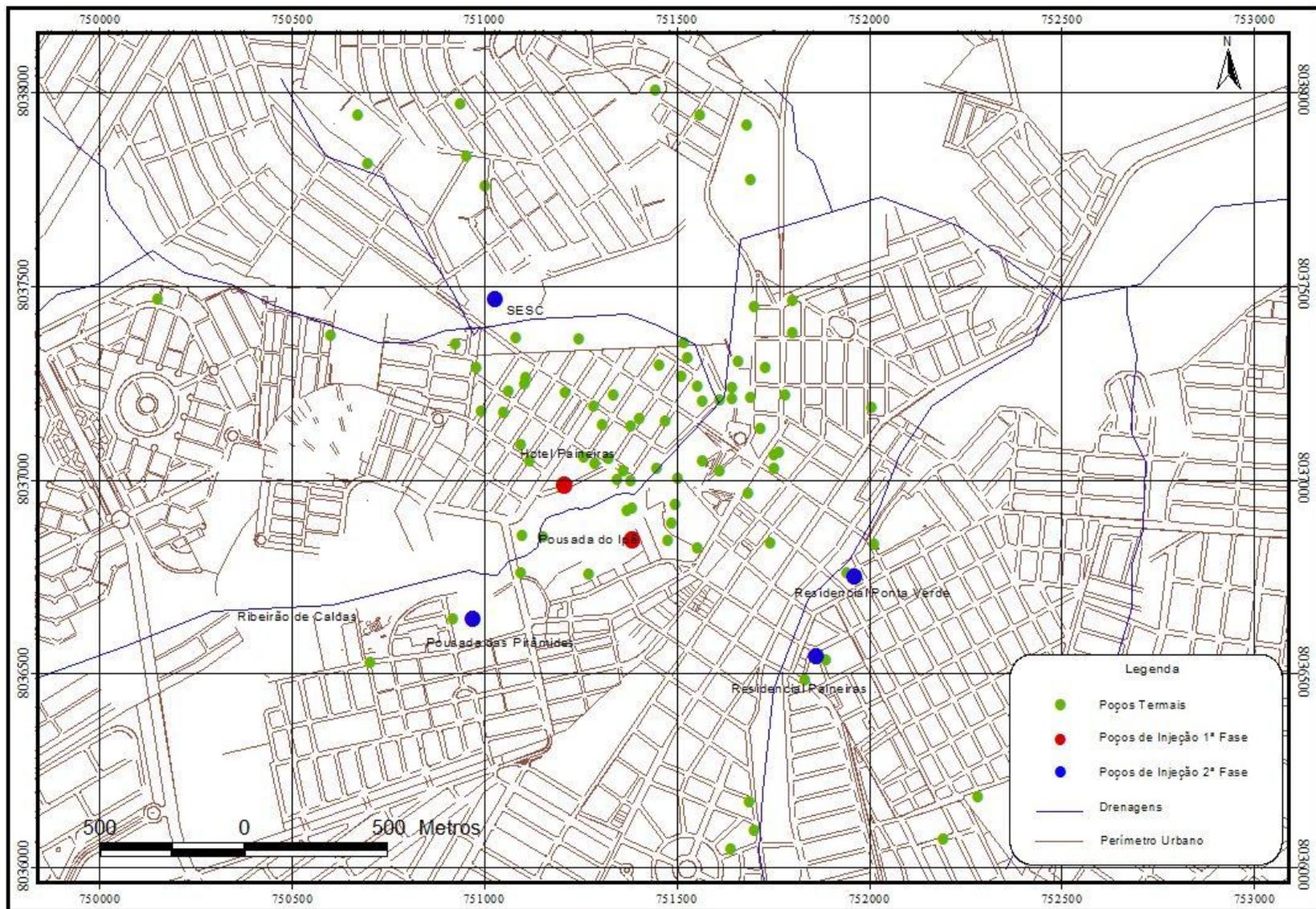


Figura 6.5 - Proposta de instalação de poços de injeção no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas.

Algumas tentativas de confecção de mapas potenciométricos não foram bem sucedidas devido à grande compartimentação dos sistemas aquíferos e ao bombeamento alternado em centenas de poços tubulares termais e frios. Foram utilizados alguns métodos de interpolação de dados para obtenção do mapa potenciométrico da região, entre eles: *IDW*, *Topo to Raster*, Krigagem, *Spline* e *Natural Neighbor*, porém, em nenhuma simulação os resultados foram conclusivos.

O mapa apresentado na figura 6.6 ilustra a potencimetria na sub-bacia Caldas Novas, obtido pelo método de interpolação de dados *Topo to Raster*, a partir de dados de 60 poços termais, filtrados de um banco de dados com mais de 200 poços, do Sistema Aquífero Araxá.

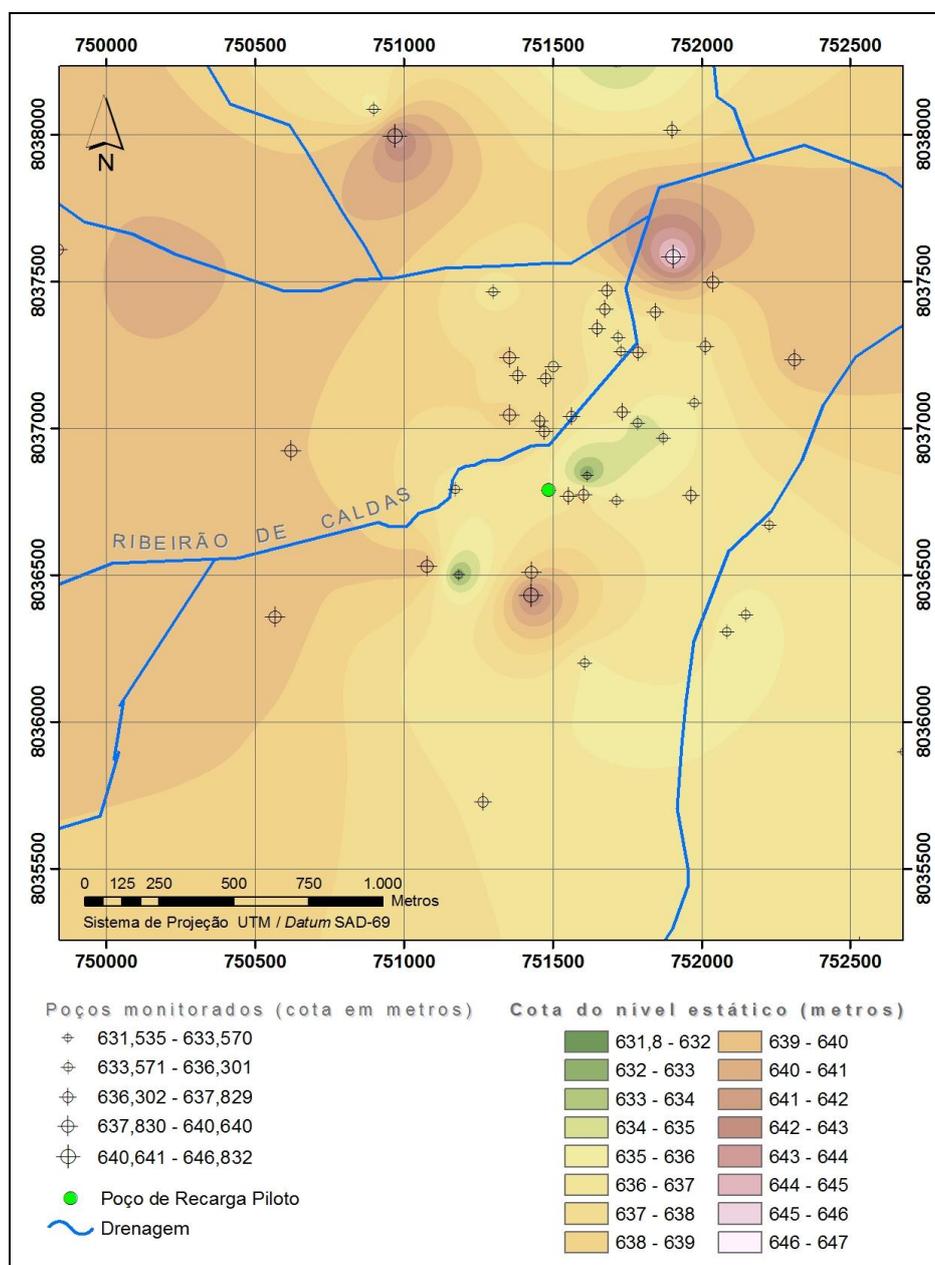


Figura 6.6 – Mapa potenciométrico no interior da sub-bacia Caldas Novas.

Mesmo com a filtragem dos dados os mapas mostram efeitos pepita, que representam respostas localizadas e momentâneas. A geração de mapas potenciométricos em aquíferos fraturados é extremamente complexa e muitas vezes não se consegue uma avaliação regional de fluxo. No caso específico de Caldas Novas, as condições hidráulicas e de uso aumentam estas dificuldades.

Para obtenção de um mapa potenciométrico mais representativo para as sub-bacias é necessário que todos os poços termais e frios da região interrompam o bombeamento, o que é extremamente complexo. Em conjunto com o mapa potenciométrico também foi gerado um mapa de isotermas, apresentado na figura 6.7.

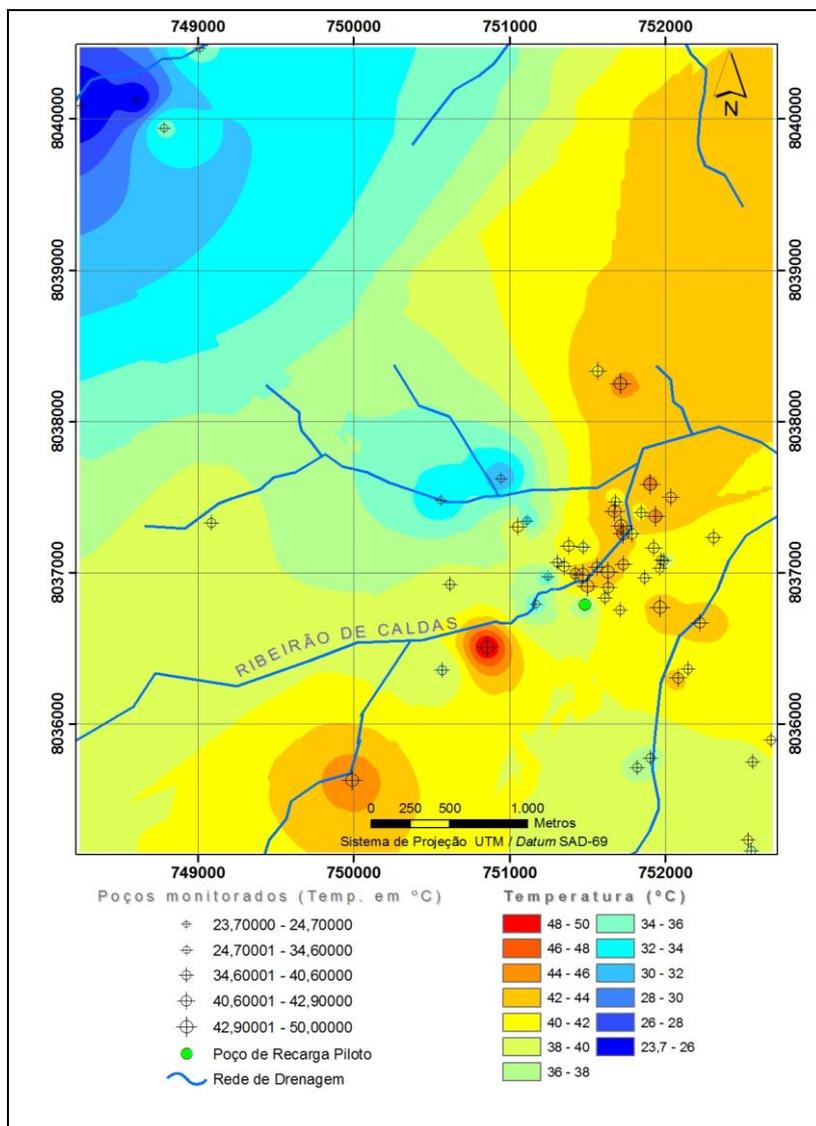


Figura 6.7 – Mapa de isotermas no interior da sub-bacia Caldas Novas.

A grande anisotropia dos aquíferos, o intenso bombeamento dos poços tubulares, termais e frios, e a mistura de águas entre os sistemas aquíferos Intergranular, Araxá e Paranoá, dificultam a confecção de mapas de isotermas e potenciométricos na região, porém, o atual conhecimento

hidrogeológico local permite afirmar que a Serra de Caldas é a principal área de recarga e existe uma divisão regional de fluxo, que é caracterizada pelas nascentes termais do rio Quente, a oeste da serra, e as ocorrências termais ao longo de um *trend* preferencial SW-NE (Serra de Caldas – Região Central da Caldas Novas - Lagoa da Pirapetinga).

Mesmo que algumas condições de contorno das sub-bacias hidrogeológicas ainda não estejam completamente definidas, a recarga artificial deverá contribuir consideravelmente para elevação da superfície potenciométrica dos sistemas aquíferos locais.

6.4 VIABILIDADE QUALITATIVA

O monitoramento qualitativo do sistema de recarga artificial possibilitou caracterizar as águas de descarte das piscinas termais com boa qualidade e próprias para recarga artificial dos aquíferos termais. O uso destas águas, tanto para a recarga no aquífero intergranular, como no aquífero Araxá, é recomendado, sem tratamento prévio, ou com tratamento simplificado.

O risco de contaminação dos aquíferos é praticamente nulo, uma vez que, para o aquífero intergranular, as águas deverão percolar a zona não saturada, que desempenhará a função filtro. Neste processo há eliminação de eventuais contaminantes bacteriológicos, retenção de íons e rápida oxidação de NH_4 , transformando-a em NO_3 . Após este processo as águas de recarga terão qualidade igual ou superior às águas dos aquíferos sotopostos.

Para o Sistema Aquífero Araxá, com a recarga artificial realizada através de poços de injeção, o tratamento simplificado, com eliminação de agentes bacteriológicos e diminuição dos compostos nitrogenados é bastante eficaz. As águas de descarte das piscinas termais, que já possuem boa qualidade, devem ser tratadas através de uma estação de tratamento simplificada, projetada principalmente para eliminação de coliformes totais e modificações na série nitrogenada.

Os filtros de ozônio e os filtros UV desempenham papel importante na remoção de agentes bacteriológicos indesejáveis. Estes filtros, integrados com a aeração, que acelera os mecanismos químicos responsáveis pela conversão de NH_4 em NO_3 , são muito eficazes. A operação dos 2 filtros e do mecanismo de aeração é extremamente simples.

Para maior eficácia dos filtros UV as águas termais de descarte devem conter as seguintes especificações: Temperatura máxima de 40°C , ideal entre $25\text{-}28^\circ\text{C}$; pH ideal entre 7.4-7.6, com máximo de 7.8; baixa alcalinidade e teores de cloro reduzidos (máximo de 0,2 mg/l de Cl). A manutenção dos filtros UV é simples, sendo necessário realizar limpeza no tubo de quartzo regularmente e conferir a vida útil da lâmpada, que geralmente é superior a 1 ano.

Os filtros de zeólitas, embora comumente aplicados para a redução de teores elevados de amônia (ex. de 50 mg/l para 2 ou 3 mg/l), não possuem eficiência para a redução de valores desta

substância em soluções ou efluentes com teores originalmente baixos. Tanto os experimentos de campo quanto os de laboratório mostram que não há um resultado consistente na redução das concentrações de amônia nos diversos ambientes e sob as diferentes condições de contorno aplicadas. Os resultados analíticos mostraram apenas dessorção preferencial de sódio e absorção de cálcio e magnésio.

Os resultados, utilizando filtros de zeólitas, obtidos nos ensaios *in situ* e na estação de tratamento simplificada apresentam padrão aleatório de NH_4 , quando se comparam os resultados de entrada e saída. O uso deste conjunto de minerais no sistema integrado de filtragem é, portanto, desnecessário, caso o objetivo seja exclusivamente a remoção de amônia.

Os resultados do monitoramento são favoráveis à implantação de mecanismos de recarga artificial do ponto de vista qualitativo. As águas de descarte das piscinas termais possuem boa qualidade e as injeções de água podem, inclusive, melhorar a qualidade das águas dos aquíferos, que apresentam teores de nitrato (média de 5mg/l) mais elevados que as águas de recarga artificial.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos desenvolvidos na presente tese contribuíram para o conhecimento da hidrogeologia e para a compreensão dos mecanismos de aquecimento das águas na região de Caldas Novas. O trabalho também permite afirmar que a recarga artificial dos aquíferos é uma importante ferramenta para a gestão e para a sustentabilidade dos aquíferos termais da região.

A integração dos resultados dos diversos trabalhos anteriores com os estudos relativos a esta pesquisa permitiu concluir que os mecanismos de recarga artificial de aquíferos, utilizando águas de circulação em piscinas termais, são ferramentas efetivas e extremamente viáveis para o gerenciamento das águas termais da região.

O contínuo aprimoramento do modelo hidrogeológico conceitual, com delimitação mais precisa da bacia hidrogeológica, e a definição mais realista dos mecanismos de fluxo, são importantes para a correta gestão. O conhecimento atual permite caracterizar inúmeros aspectos sobre a região de Caldas Novas, que necessariamente devem ser incluídos na formulação e implantação de ferramentas de gestão. Neste sentido, algumas considerações sobre as condições hidrogeológicas da região são destacadas a seguir:

O aquecimento das águas na região de Caldas Novas está vinculado exclusivamente ao gradiente geotérmico da região e a principal área de recarga está situada na Serra de Caldas. Este termalismo é associado a regimes de fluxos locais a regionais e a um arranjo de fraturas que alcançam profundidades maiores que 1.000 metros. As águas termais são exploradas principalmente por meio de poços tubulares profundos.

Existem três sistemas aquíferos na região denominados de Sistema Aquífero Intergranular, Sistema Aquífero Araxá e Sistema Aquífero Paranoá:

- O Sistema Aquífero Intergranular compreende reservatórios intergranulares livres, contínuos lateralmente, de ampla extensão, com espessura saturada muito variável e de grande importância hidrogeológica local. Este sistema aquífero é associado principalmente a Latossolos, com perfis que alcançam 50 metros e apresenta águas frias e pouco mineralizadas.
- O Sistema Aquífero Araxá compreende aquíferos fraturados muito heterogêneos, anisotrópicos, livres, frios ou termais, com extensão lateral restrita, controlada pela distribuição das zonas de fraturamento em xistos, e profundidades que variam de

100 a 400 metros. As águas são bicarbonatadas cálcicas/magnesianas, e pouco mais mineralizadas que as águas dos demais sistemas aquíferos. A exploração deste aquífero é responsável pela maior parte das águas termais utilizadas na região de Caldas Novas.

- O Sistema Aquífero Paranoá é representado por aquíferos fraturados, livres ou confinados, frios ou termais, anisotrópicos e heterogêneos, associado principalmente a quartzitos, com águas pouco mineralizadas e profundidades que variam de 0 a 1000 metros.

As águas subterrâneas frias da região estão relacionadas às zonas de fraturas com águas de fluxos descendentes em profundidades inferiores a 400 metros. As águas termais são associadas a condições de fluxo descendentes em profundidades maiores que 450 metros, ou quando o fluxo ascendente a partir de fraturas for mantido, em qualquer profundidade.

Nos últimos anos a exploração do Sistema Aquífero Paranoá Termal para clubes, condomínios e outros empreendimentos turísticos aumentou consideravelmente devido à captação de águas com temperaturas mais elevadas.

As águas termais são extraídas principalmente através de poços tubulares profundos que apresentam vazões médias de 20 m³/h, com máximas de 63 m³/h, e profundidades entre 200 e 1.000 metros. A temperatura das águas termais varia entre 35°C e 49°C, oriunda do gradiente geotérmico do Sistema Aquífero Araxá, e entre 43°C e 59°C, no Sistema Aquífero Paranoá. As nascentes da Pousada do Rio Quente e da Lagoa da Pirapetinga são as únicas surgências naturais ainda perenes na região.

O controle estrutural, aliado aos dados geofísicos, hidroquímicos e isotópicos das águas termais indica a presença de dois sistemas de fluxo na região: A porção oeste da Serra de Caldas (Pousada do Rio Quente) está associada a regimes de fluxos intermediários, com águas mais jovens (entre 600-800 anos, com mínimas de 30 anos) e com temperaturas mais baixas. Na porção leste da serra, na cidade de Caldas Novas, os dados isotópicos indicam águas com idades mais antigas que 2000 anos e temperaturas mais elevadas.

O uso das águas termais é controlado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM que realiza monitoramento mensal de nível, temperatura e vazão dos sistemas aquíferos termais. As águas frias são reguladas pelo órgão gestor do estado de Goiás, atualmente a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos-SEMARH/GO, por intermédio de outorga de uso das águas.

No ano de 1997, o DNPM suspendeu a emissão de alvarás de pesquisa e lavra, e implantou medidas reguladoras, como a instalação de hidrômetros nos poços termais e limitação do tempo de

bombeamento e de vazão para cada usuário. As medidas contiveram o rebaixamento dos níveis piezométricos durante alguns anos, porém estes níveis estão novamente em queda.

O quadro de declínio dos níveis potenciométricos dos aquíferos deve ser atribuído não apenas ao bombeamento excessivo, mas também à ocupação e impermeabilização do solo na região da cidade de Caldas Novas, a qual limita a recarga natural do Sistema Aquífero Araxá a partir dos Latossolos que recobrem os aquíferos termais.

Medidas eficazes que objetivem a sustentabilidade do aquífero termal precisam ser efetivamente implantadas para manutenção do potencial hidrotermal da região de Caldas Novas.

7.2 CONCLUSÕES

A implantação de sistemas de recarga artificial de aquíferos é fundamental para manutenção do potencial termal existente na região. Estes mecanismos devem ser realizados a partir de caixas de recarga no Sistema Aquífero Intergranular, e em poços de injeção no Sistema Aquífero Araxá. O constante rebaixamento dos níveis de água, principalmente nos últimos 4 anos, evidencia a efetiva e necessária aplicação de medidas que visem à sustentabilidade de uma das maiores reservas hidrotermais do mundo.

Os sistemas de recarga artificiais devem ser viabilizados com águas de descarte das piscinas termais, após sistema de tratamento, e distribuídas em diversas áreas da cidade de Caldas Novas. A recarga artificial também poderá aproveitar excedentes hídricos pluviais.

A recarga artificial com uso de águas de piscinas deve ser realizada, inicialmente, em períodos de baixa temporada, entre os meses de março e junho, e agosto e novembro. Neste período inicial o monitoramento da recarga, com uso de águas termais de melhor qualidade e com maior controle da temperatura da água, deverá ser facilitado. O monitoramento dos poços de recarga e dos poços adjacentes deve ser criterioso, e realizado com medidores automatizados de nível e temperatura.

Resultados obtidos com perfilagem ótica e ensaios hidráulicos mostram elevada condutividade hidráulica e transmissividade nos sistemas aquíferos Araxá e Paranoá. A presença de fraturas com mais de 20 cm de abertura conferem aos sistemas excelentes condições de circulação hídrica e elevado potencial aquífero, com conseqüente viabilidade para implantação de recarga artificial dos aquíferos.

Os ensaios hidráulicos realizados em poços termais do sistema aquífero Araxá mostraram elevadas condutividades hidráulicas, com alta capacidade de infiltração e rápida recuperação dos níveis de água. Para os poços do Sistema Aquífero Paranoá não existe viabilidade hidráulica com

injeção direta. Para este caso deve-se considerar a possibilidade de se desenvolver recarga a partir da injeção de água sob pressão (com auxílio de bombeamento).

Existe uma zona hidrogeológica favorável para a implantação dos mecanismos de recarga artificial que corresponde à região central da cidade de Caldas Novas, caracterizada por apresentar poços termais com alta vazão e condutividade hidráulica, além de condicionantes estruturais bem definidos. Esta zona favorável é representada pela sub-bacia hidrogeológica Caldas Novas.

Os ensaios hidroquímicos indicam que as águas de descarte das piscinas possuem boa qualidade, principalmente em períodos de baixa frequência de usuários de clubes, com assinatura hidroquímica das águas de descarte semelhante às águas dos sistemas aquíferos explorados. Esta caracterização hidroquímica favorece a viabilidade qualitativa dos mecanismos de recarga.

Em comparação à qualidade natural das águas existe um pequeno incremento de compostos químicos e bacteriológicos introduzidos por ação antrópica nas águas das piscinas termais, como amônia (NH_4), nitrato (NO_3), coliformes e cloro. Os resultados alcançados mostram grande variação em diferentes clubes, dias e horários, com pequenas concentrações de NH_4 , NO_3 e coliformes termotolerantes. Os teores de NH_4 oscilam entre 0,1 e 0,8 mg/l N, enquanto as concentrações de NO_3 variam entre 0,1 e 1,5 mg/l, e coliformes termotolerantes entre 0 e 5000 NMP/100 ml. As temperaturas das águas das piscinas oscilam entre 24,7 e 39,6°C, com média de 32°C. O pH das águas apresentou variação entre 6,4 e 8,1, com média de 7,3.

Para remoção dos compostos indesejáveis foi proposto um sistema simplificado de tratamento de água. A recarga do sistema aquífero intergranular deve ser realizada com tratamento primário, com o uso de gradeamento, para a retenção de particulados maiores, e caixa de separação de gordura. A filtração será continuada na zona não saturada do aquífero freático.

No caso da recarga direta do Sistema Aquífero Araxá é proposta uma Estação de Tratamento Simplificada - ETS, composta por gradeamento, aeração, filtração integrada utilizando filtros de areia de quartzo, zeólitas, carvão ativado e ultravioleta-UV. O filtro de UV pode ser substituído por filtro de ozônio, que apresenta eficácia semelhante.

O uso de zeólitas como meio filtrante não mostrou resultados eficazes para remoção de amônia, porém seu uso pode ser mantido inicialmente, associado a monitoramento da qualidade das águas de descarte. Os ensaios com zeólitas indicam que não há um processo sistemático de sorção, absorção ou troca entre a água de entrada e a superfície do mineral. Os valores máximos de amônia já são muito reduzidos, não compondo um típico efluente e que em muitos casos são teores muito próximos aos limites de quantificação dos métodos analíticos.

Os resultados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$, entre -10 e -15 sugerem fontes difusas de ^{13}C , que podem estar associadas a carbono natural ou fontes de carbono de origem antrópica. As amostras

não apresentaram variações quando foram relacionados os valores de condutividade elétrica e ^{18}O e D. Os resultados de $d^{18}\text{O}$ em torno de -6 ‰ e δD -38‰, sugerem assinatura isotópica de águas mais antigas. Estes resultados corroboram com datações com Trítio e ^{14}C , que resultam em idades maiores que 2000 anos para as águas dos aquíferos termais de Caldas Novas.

O monitoramento do sistema de tratamento na ETS apresentou resultados muito satisfatórios para remoção de coliformes, tanto com uso de filtro ultravioleta, como com filtro de ozônio. O processo de aeração foi eficaz, com redução dos teores de amônia e pequeno aumento dos teores de nitrato. A viabilidade qualitativa do sistema de tratamento foi comprovada.

A recarga artificial realizada através de caixas de recarga, no Sistema Aquífero Intergranular, é altamente eficiente para repor as perdas da recarga superficial devido ao aumento da impermeabilização no perímetro urbano da cidade de Caldas Novas. A recarga contribui, ainda, para contenção dos eventos de cheia e problemas de drenagem urbana que frequentemente ocorrem na região.

A recarga através de poços de injeção no Sistema Aquífero Araxá também deve contribuir consideravelmente para recuperação dos níveis de água dos sistemas termais. A análise da efetividade deve ser obtida com monitoramento sistemático ao longo dos anos e com ampliação dos sistemas piloto de recarga. Esta ferramenta de gestão deve ser implantada gradativamente, com monitoramento contínuo de plantas piloto e nos diversos poços termais da região de Caldas Novas.

Os estudos de viabilidade térmica, qualitativa e quantitativa demonstraram excelentes resultados e reforçam a necessidade da efetiva instalação de mecanismos de recarga artificial. As reservas hídricas renováveis do Sistema Aquífero Araxá alcançam $2,25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e do Sistema Aquífero Paranoá $9,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. As reservas permanentes variam entre $4,5 \times 10^7 \text{ m}^3$, no Araxá, e $1,8 \times 10^8 \text{ m}^3$, no Sistema Aquífero Paranoá.

As vazões outorgadas pelo DNPM alcançam $1.800 \text{ m}^3/\text{hora}$, totalizando $9,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, que corresponde a uma vazão maior que as reservas renováveis do Sistema Aquífero Araxá, estimadas em $2,25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Se forem incluídas nos cálculos as vazões médias de 200 poços frios tem-se um incremento de $1,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água/ano. Estas taxas de bombeamento são extremamente elevadas para a capacidade média dos aquíferos da região.

A avaliação de volumes de misturas entre águas de recarga artificial e águas de reserva permanente, em diferentes cenários de injeção, mostrou que os mecanismos de recarga artificial não devem alterar a temperatura das águas dos aquíferos, uma vez que, a recarga representaria um volume restrito com relação à reserva de saturação. Entretanto, a recarga poderá alterar a

temperatura na vizinhança dos poços de injeção, pois a mistura das águas não se dá de forma instantânea ou homogênea.

Como não é possível modelar o raio de influência de cada poço de injeção, devido às anisotropias/heterogeneidades dos sistemas aquíferos, a análise da provável diminuição da temperatura da água deverá ser feita a partir do monitoramento contínuo. Assim, todos os poços submetidos à recarga e os poços adjacentes deverão ser equipados com sistema de medição automática de nível e temperatura.

Como a recarga artificial é um processo intermitente, os efeitos potenciais da diminuição da temperatura deverão ser minimizados. As águas naturais e de recarga deverão sofrer uma rápida mistura a partir da tendência de subida da água naturalmente quente e descida da água de recarga, sempre mais fria e densa.

Os efeitos locais de resfriamento da água são mínimos se comparados aos problemas de superexploração e diminuição das taxas de recarga natural, que podem culminar com a exaustão de uma das maiores reservas hidrotermais do planeta.

7.3 RECOMENDAÇÕES

Outros estudos devem ser concluídos e integrados com os dados existentes, objetivando a ampliação do conhecimento hidrogeológico e otimização da metodologia de recarga artificial proposta pelo presente trabalho. Entre os estudos que necessitam aprimoramento estão a realização de análises isotópicas para caracterização da origem do nitrato nas águas do Sistema Aquífero Araxá, e o aprimoramento do modelo conceitual e matemático dos sistemas aquíferos, com definição das condições de fluxo das águas e das condições de contorno dos diferentes sistemas.

A divulgação do conhecimento sobre os aquíferos, origem das águas termais e suas características deve ser ampliada para o maior público possível (moradores, empresários, turistas, etc.), pois, o conhecimento da região facilita a aplicação de medidas de gestão. Esta medida é importante uma vez que moradores, turistas e empresários do setor hoteleiro ainda associam as águas termais à existência de um vulcão ou de processos vulcânicos na região. Algumas recomendações, que objetivam o aprimoramento da gestão do aquífero termal são propostas a seguir:

- Amostragens hidroquímicas e isotópicas periódicas para avaliação qualitativa dos sistemas aquíferos submetidos à recarga artificial;
- Incentivo à prática de recarga artificial em poços tipo *ASR*, com poços termais possuindo a função de poços produtores e de armazenamento. Deverá ser discutida uma compensação financeira aos mineradores que utilizarem os mecanismos de recarga artificial. A compensação

pode ocorrer na forma de selo ambiental, imposto verde, ou ICMS ecológico, negociado entre os mineradores, o DNPM e a SEMARH/GO e a prefeitura de Caldas Novas;

- À iniciativa anterior, deve-se somar a proposição de selo “*Amigo das Águas Quentes*”, emitido pelos órgãos responsáveis aos empreendimentos que cultivem boas práticas de preservação ambiental, como reuso das águas, descarte seletivo de resíduos sólidos, captação de água de chuva, entre outros;

- Devem ser revistos pelo DNPM os atuais alvarás de lavra, que autorizam a exploração das águas termais em até 1800 m³/h;

- Aprimoramento da gestão local, com integração dos órgãos gestores, principalmente entre o DNPM e a SEMARH/GO. Atualmente os alvarás de lavra para água termal, emitidos pelo DNPM, e as outorgas de direito de uso das águas frias, emitidas pela SEMARH/GO, não possuem qualquer integração, apesar de haver previsão na Resolução n°76, de 16 de outubro de 2007 do Conselho Nacional de Recursos Hídrico. Esta resolução estabelece diretrizes gerais para a integração entre a gestão de recursos hídricos e a gestão de águas minerais, termais, gasosas, potáveis de mesa ou destinadas a fins balneários. Uma análise crítica deve ser feita com a finalidade de criar mecanismos para viabilizar uma adequada integração normativa para a gestão do aquífero local;

- O monitoramento deve ser expandido para os poços de águas frias e ampliado com a instalação de horímetros e hidrômetros em todos os poços da cidade;

- As atuais concessões para uso das águas do Sistema Aquífero Araxá, por parte da companhia de abastecimento de águas do município de Caldas Novas devem ser revistas e suspensas preventivamente;

- Elaboração de normas infralegais para definição de critérios a serem adotados pelos órgãos gestores de meio ambiente, relativos à implantação de mecanismos de recarga artificial de aquíferos. Sugere-se a elaboração de uma resolução específica do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, sobre o uso da Recarga Artificial de aquíferos no Brasil. Atualmente os gestores públicos não possuem subsídios e conhecimento para licenciar um projeto que vise à recarga artificial. Foi protocolizado junto à SEMARH/GO, no início do ano de 2010, um pedido de licença ambiental para pesquisa na área estudada, o qual não fora autorizado até a conclusão desta pesquisa;

- As políticas ambientais dos clubes devem priorizar a correta utilização das piscinas termais, informando sobre a origem das águas quentes e o ciclo das águas. Os moradores locais e os turistas devem ter o correto conhecimento sobre os mecanismos de aquecimento das águas e sobre a importância do recurso natural renovável, porém finito. As principais ferramentas para

integração de todos os usuários das águas termais são cartilhas explicativas, banners, palestras e cursos para agentes locais. Todas as atividades devem ser contínuas e não restritas a apenas um único período, até que se alcancem os atores envolvidos. O anexo 1 apresenta texto explicativo, em forma de perguntas e respostas, sobre as águas termais de Caldas Novas.

- Manutenção da qualidade das águas das piscinas, com campanhas maciças e didáticas sobre o correto uso das piscinas e banheiros nos clubes. Os técnicos dos órgãos gestores e outras entidades envolvidas, além da população da cidade devem, necessariamente, ser capacitados para a disseminação de boas práticas entre os turistas;

- Integração de todos os gestores envolvidos, incluindo representantes do DNPM, SEMARH/GO, Departamento Municipal de Água e Esgoto - DMAE, Prefeitura Municipal, Ministério Público, Associação dos Mineradores de Águas Termais - AMAT/GO, entre outros, deve ser eficaz para o monitoramento/fiscalização realizado pelos representantes de cada setor, nas respectivas áreas de atuação;

- Implementação de mecanismos de recarga artificial, utilizando excedentes de chuvas, captados em clubes e praças da cidade para incremento da recarga dos aquíferos locais;

- Integração entre os trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto de preservação da AMAT, em parceria com a Universidade Técnica de Berlim e a Universidade de Brasília e os demais estudos com ampla divulgação e discussão com os empreendedores locais, a população e os turistas. A integração destes dados com a modelagem matemática deverá ser uma ferramenta eficaz de gestão.

Estas recomendações, integradas com o contínuo aporte de conhecimento científico, são fundamentais para a manutenção do potencial termal da região de Caldas Novas e a sustentabilidade dos aquíferos termais locais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABADZIC, S.D. & RYAN, J.N. 2001. Particle release and permeability reduction in a natural zeolite (clinoptilolite) and sand porous medium. *Environmental Science Technology*, **35**: 4502-4508.
- ABGE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. 1996. *Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua execução no campo*. São Paulo. Boletim número 4. 35 p.
- ALMEIDA, L., RESENDE, L., RODRIGUES, A.P., CAMPOS, J.E.G. 2006. *Hidrogeologia do Estado de Goiás*. Superintendência de Geologia e Mineração. Governo do Estado de Goiás, v.1000, Goiânia. CDU: 556.3 (817.3). 232 p.
- AMAT. ASSOCIAÇÃO DOS MINERADORES DE ÁGUAS TERMAIS DO ESTADO DE GOIÁS. 2008. *Relatório Técnico Sobre as Condições Físico-Químicas/Bacteriológicas das Águas Termais Após o Uso em Piscinas na Cidade de Caldas Novas, Estado de Goiás*. Caldas Novas. 54 p.
- AMAT. ASSOCIAÇÃO DOS MINERADORES DE ÁGUAS TERMAIS DO ESTADO DE GOIÁS. 2010. *Simpósio e Workshop do Projeto de Preservação das Águas Termais de Caldas Novas e Rio Quente*. Resumos. Caldas Novas. 16 p.
- AMAT. ASSOCIAÇÃO DOS MINERADORES DE ÁGUAS TERMAIS DO ESTADO DE GOIÁS. 2011. Disponível em <http://www.amatgo.org.br>. Acessado em 10 mar 2011.
- ANDRADE, A. M. & ALMEIDA, L. 2011. Aquífero Termal de Caldas Novas: Monitoramento Mensal Realizado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM. No prelo.
- ARRAES, T.M. & CAMPOS, J.E.G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 81-89.
- ASANO, T.; TSUCHIHASHI, R.T.; SAKAJI, R.H. 2002. Health aspects of groundwater recharge with reclaimed water. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 11-20.
- ATTIA, F.; MOUSTAFA, M.; OBSTHORN, T.; SMIDT, E. 1998. The role of artificial recharge in integrated water management in Egypt. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. 47-54.
- AZAROUAL, M.; DOMINIQUE, T.; NADIA, A.; MARIE, P.; CROISSET, C.; JOEL, C.; KATIA, B.; NICHOLAS, R. 2010. Physical, Geochemical and Microbial Processes Induced During the Aquifer Recharge Using Treated Wastewaters: Laboratory and Pilot Experiments and Numerical Simulations. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 8 p.
- BARBOSA, O. 1970. *Projeto Brasília - Goiás: Geologia e Inventário dos Recursos Minerais do Projeto*. Rio de Janeiro. PROSPEC/DNPM. 225 p.
- BARRETO FILHO, J.A. & COSTA, J.F.G. 1981. *Gravimetria na Região de Caldas Novas. Relatório Final*. Eletroprojetos S.A/CPRM. Goiânia. 34 p.
- BARRY, K. & DILLON, P. 2005. Domestic-scale ASR with rainwater at Kingswood, South Australia. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 656-662.
- BARRY, K.; DILLON, P.; PAVELIC, P. 2007. Mixing and clogging constraints on domestic-scale ASR at Kingswood, South Australia. *In: Artificial Recharge of Groundwater*.

-
- Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 61-73.
- BEKTAS, N. & KARA, S. 2004. Removal of lead from aqueous solutions by natural clinoptilolite: equilibrium and kinetic studies. *Separation and Purification Technology*, **39**:189-200.
- BERGER, S.G. & GIENCKE, F.J. 1998. Seawater intrusion reversed through artificial recharge beneath the Oxnard Plain, California. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam.* p. 3-9.
- BONIFACE, E.S. 1959. Some experiments in artificial recharge in the lower Lee Valley. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **14**: 325–338.
- BLAINEY, G. 2009. *Uma Breve História do Mundo*. Editora Fundamento Educacional. São Paulo. 336 p.
- BOSHER, C.B.; SIMMS, T.O.; KRACMAN, B. 1998. Wasterwater Aquifer Storage and Recovery (ASR) - Towards sustainable reuse in South Australia. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam.* p.87-92.
- BOUWER, H. & RICE, R.C. 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, volume 12, nº 3. p. 423-428.
- BOUWER, H. 1998. Predicting infiltration and mounding, and managing problem soils. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam.* p. 149-154.
- BOUWER, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, **10**:121-142.
- BRAUN, O.P.G. 1968. Contribuição a Estratigrafia do Grupo Bambuí. *In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia. Belo Horizonte.* p. 155-166.
- BUCICH, N.G. 2005. Groundwater exploitation in an arid zone in relation to the recharge in a central region of the Argentine Republic. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin.* p. 862-867.
- BUIK, N.A. & WILLEMSSEN, A. 2002. Clogging rate of recharge wells in porous media. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide.* p. 195-198.
- CADAMURO, A.L.M.; REGO, A.P.M.; JOKO, C.T.; GIUSTINA, C.C.D.; PONTES, C.H.C.; D'ANGIONELLA, G.; OLIVEIRA, L.A.; LIMA, M.C. 2000. *Hidrogeologia Aplicada a Região de Caldas Novas - Goiás: Caracterização dos Aquíferos e Balanço Hídrico Preliminar*. IG-UnB (Relatório Final, não publicado). Brasília. 93 p.
- CADAMURO, A.L.M. 2002. Proposta, Avaliação e Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial em Aquíferos Fraturados para Condomínios Residenciais do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 130 p.
- CADAMURO, A.L.M., CAMPOS, J. E. G., TRÖGER, U. 2002. Artificial recharge in fractured rocks. An example from the Federal District of Brazil for the sustainability of the system. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide.* p. 523 - 526.

-
- CADAMURO, A.L.M. & CAMPOS, J.E.G. 2005. Recarga Artificial de Aquíferos Fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para gestão dos Recursos Hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*, **35**: 89-98.
- CAMPOS, E.C. & COSTA, J.F.G. 1980. *Projeto Estudo Hidrogeológico da Região de Caldas Novas*. MME/DNPM/CPRM. Goiânia, v.1, p. 34-47.
- CAMPOS, J.E.G. & DARDENNE, M.A. 1997b. Estratigrafia e sedimentação da bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, **27**(3):269-282.
- CAMPOS J.E.G. & FREITAS-SILVA F.H. 1998. *Hidrogeologia do Distrito Federal*. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. IEMA/SEMATEC/UnB. Brasília. v. IV, p. 1-84.
- CAMPOS, J.E.G.; FORTES. P. T. O.; SANTOS, R. V. 2000. *Geologia do Domo de Caldas Novas*. Relatório Técnico. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 56 p.
- CAMPOS, J.E.G.; TRÖGER, U.; HAESBAERT, F.F. 2009. Águas Quentes de Caldas Novas, Goiás Notável ocorrência de águas termais sem associação com magmatismo. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S. (Org.). *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. CPRM - CEDOC 1ª ed. Rio de Janeiro, v. 2, p. 177-190.
- CARMELO, A.C. 2002. Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 179 p.
- CHAGAS, J.M. 2008. Captação de Água de Chuva para Recarga de Aquíferos e Usos Múltiplos. Monografia de Graduação, Faculdade Araguaia, Goiânia, 40 p.
- CNRH. 2003. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 32 de 15 de outubro de 2003. Define a Divisão Hidrográfica Nacional em Regiões. 3 p.
- CONAMA. 2008. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. 2008. Resolução CONAMA nº 396, de 3 de Abril de 2008. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas. 11 p.
- COSTA, W.D. 2000. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: Feitosa, F.A.C. & Manoel, Filho J. (Coord.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM/REFO, LABHID-UFPE. p. 341-367.
- COSTA, W.D. 2006. Curso de Recarga Artificial de Aquíferos. In: III Seminário de Engenharia de Saúde Pública. Fortaleza. 207 p.
- COSTA, W.D. 2008. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: Feitosa, F.A.C. & Manoel, Filho J. (Coord.). *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM/REFO, LABHID-UFPE. p. 725-742.
- COX, M.E. & WILSON, A.S. 2005. Use of geochemical and isotope plots to determine recharge to alluvial aquifers: Lockyer Valley, Queensland, Australia. In: *Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources*. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 253-263.
- CRAIG, H. 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural Waters. *Science*, **133**:1833-1834.
- CRAIG, H. & GORDON, L. 1965. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. In: *Stable isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures* Ed. Tongiorgio, Spoleto. p. 9-130.
- CUNHA, L.S. 2007. *Caracterização Geométrica por Eletroresistividade na Área Urbana da Cidade de Caldas Novas – GO*. Nota Técnica. Geodinâmica. Brasília. 26 p.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M.R. 1975. *Hidrología Subterránea*. Barcelona, Omega. Volume 1 e 2. 1ª Edição. 1157 p.

-
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M.R. 1983. *Hidrologia Subterrânea*. Barcelona, Omega. Volume 1 e 2. 2ª Edição. 1157 p.
- CUSTÓDIO, E. & GURGUÍ, A. 1989. *Groundwater Economics*. Amsterdã, Elsevier Science. 625 p.
- DARDENNE, M. A. 1978a. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGR. BRAS. GEOC., 30. Recife, 1978. *Anais...*, Recife, SBG. v. 2. p. 597-610.
- DARDENNE, M. A. 1978b. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. In: CONGR. BRAS. GEOC., 30. Recife, 1978. *Anais...*, Recife, SBG. v. 2. p. 299-308.
- DARDENNE, M. A. 1979. Les minéralisations plomb, zinc, fluor du Proterozoïque Supérieur dans le Brésil Central. Paris. Univ. Pierre et Marie Curie - Paris VI. 251p.. (These de Doctorat d'Etat).
- DARDENNE, M.A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SBG-BA, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais. Salvador. p.140-156.
- DARDENNE, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.A. Campos (eds). *Tectonic Evolution of South America*. 31st Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, pp. 231-263.
- DAVID, R. & PYNE, G. 2005. Recent advances in ASR Technology in the United States. In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. 15 p.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1981. *Minerais Constituintes das Rochas*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 558 p.
- D'EL-REY SILVA, L.J.H.; KLEIN, P.B.W.; WALDE, D. 2004. The Caldas Novas Dome, Goiás: Structural evolution and implications for tectonics in the Brasília Belt, Brazil. *Jour. of S. Ame. E. Sciences*. v. 17, n° 2, p. 153-169.
- D'EL-REY SILVA, L.J.H., WALDE, D., GUIMARÃES CAMPOS, J.E. & CIPULLO, R.A. 2008. Why the Rio Quente is a Special Spring within The Caldas Novas Thermal Aquifer, Central Brazil? In: 1st WSEAS International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering. Malta. ISSN: 1790-5095. p. 70-76.
- DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2011. Cadastro mineiro. Disponível em: <http://sistemas.dnpm.gov.br>. Acessado em 09 mar 2011.
- DIAMANTINO, C. 2005. Metodologias de Recarga Artificial de Aquíferos. In: 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Évora. 15 p.
- DÍAZ, J.M.M.; GÓMEZ, J.A.O.; ARMAYOR, J.L.; CASTANO, S.C. 2000. *Recarga Artificial de Aquíferos. Síntesis Metodológica*. In: J.A. Hernández, L.R. Actuaciones Realizadas en La Provincia de Alicante. Edições López Geta.
- DILLON, P. & PAVELIC, P. 1998. Environmental guidelines for aquifer storage and recovery: Australian experience. In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 313-318.
- DILLON, P.; TOZE, S.; PAVELIC, P.; VANDERZALM, J.; BARRY, K.; YING, G.; KOOKANA, R.; SKJEMSTAD, J.; STUYFZAND, N.P. 2005. Water quality improvements during aquifer storage and recovery at ten sites. In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 85-94.
- DILLON, P.; WARD, J.; CUNLIFFE, D. 2007. Innovation in Governance of Managed Aquifer Recharge. In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 1-14.

-
- DILLON, P.; MOITLINSKI, K.; PAVELIC, P. 2010. Aquifer Storage and Recovery (ASR) in a Low-permeability Fractured Media. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. *Resumos*.
- DINIZ, H.N.; BATISTA, G.T., SANTORO, J. & TARGA, M.S. 2007. Projeto Piloto de Recarga Artificial na Bacia do Rio Una, Município de Taubaté. *In: IPABHi, I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: O Eucalipto e o Ciclo Hidrológico*. Taubaté, p. 9-16.
- DINIZ, H.N.; TINOCO, M.P.; MONTEIRO, J.L. 2008. Recarga Artificial por Meio de Poço Tubular Profundo, no Município de Taubaté, SP. *In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Natal. 20 p.
- DRAKE JR., A.A. 1980. The Serra de Caldas Novas Window, Goiás. *In: Tectonic Studies in the Brazilian Shield*. USGS/DNAE/DNPM/CPRM. Professional Paper, 1119-A/B. p. 1-11.
- DRIJVER, B.C. & WILLEMSSEN, A. 2005. Feasibility of ASR for surface water storage in Haarlemmermeer (Netherlands). *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources*. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 95-102.
- DRISCOLL, F. G. 1995. *Ground Water and Wells*. Johnson Screens. Minnesota, 1089 p.
- DUIJVENBODE, S. W. VAN; OLSTHOORN, T. N. 1998. Effects of natural channel bed filtration prior to deep well injection. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 67-72.
- EATON, L. & WINSHIP, D. 2007. The City of Beaverton's basalt-hosted ASR project: a successful case study. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 494-506.
- ECKERT, P.; ROHNS, H.P; IRMSCHER, R. 2005. Dynamic processes during bank filtration and their impact on raw water quality. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources*. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 17-22.
- EDWORTHY, K. J. & DOWNING, R. A. 1979. Artificial groundwater recharge and its relevance in Britain. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, **33**:151-172.
- EGBOKA, B.C.E. & OKORO, E.I. 2007. Basin groundwater recharge and discharge at the gully erosion - prone areas of Anambra state, Nigeria. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 447-555.
- EL-SHEIKH, R. A. & HAMDAN, S. M. 2002. Artificial recharge of groundwater in Palestine: A new technique to overcome water deficit. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 413-417.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2011. Projeto Barraginhas. Disponível em <http://www.cnpms.embrapa.br>. Acessado em 27 jan 2011.
- ESCALANTE, E.F. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). *Revista Ecosistemas*, 14 (3): 140-147.
- ESCALANTE, E.F. & SENENT, M.W. 2010. Implementation of Techniques for Soil and Aquifer Treatment (SAT) in Spain. Contributions to the State of the Art. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. *Resumos*.

-
- ESCHWEILER, B.; KILB, B.; KUHLMANN, B.; PREUB, G. ZIEMANN, E. 1998. DNA-analysis to study the microbial diversity in recharged groundwater. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 129-134.*
- EVANS, W.R. 2010. Aquifer Storage and Recovery Feasibility Study, Australian Capital Territory, Australia. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. 15 p.*
- FARIA, A. 1995. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João da Aliança-Alto Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 199 p.
- FATHELBARI, M.O.M. & MASOUD, A.H. 2010. Study of Artificial Recharge around Gedarif Town, Eastern Sudan. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. Resumos.*
- FETTER, C. W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Mac Millan College Publ. Co. 3^a ed. New York, 619 p.
- FIORI, J.P.O.; CAMPOS, J.E.G.; ALMEIDA, L. 2010. Variabilidade da Condutividade Hidráulica das Principais Classes de Solos do Estado de Goiás. *Geociências* 29 (2): 229-235.
- FISCHER, T. & GRISCHEK, T. 2005. Sustainability of riverbank filtration in Dresden, Germany. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 23-28.*
- FOURNIER, M., MASSEI, N., DUSSART-BAPTISTA, L., BAKALOWICZ, M., RODET, J. & DUPONT, J. P. 2005. Pumping influence on particle transport properties of a chalk karst aquifer exploited for drinking water supply. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 681-686.*
- FOSTER, S.S.D.; VENTURA, M. E HIRATA, R. 1982. Contaminacion de las aguas subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situación en America Latina y el Caribe en relación com el Suministro de agua Potable. *In: CEPIS. Technical Report (OMS, OPS-HPE, CE-PIS). Lima. 42 p.*
- FRANKLIN, J. & BUTCHER, S. 2010. Aquifer Storage & Recovery (ASR) - a Diversified and Sustainable Water Solution. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. Resumos.*
- FRANKLIN, J.; DUDDING, M.; BUTCHER, S.; MUSAEFENDIC, D. 2010. Integrating Aquifer Storage and Recovery (ASR) into a Recycled Water Supply System for New Large Urban Residential Development in Geelong, Victoria, Australia. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. 8 p.*
- FUCK, R.A. 1994. Faixa Brasília e a Compartimentação Tectônica na Província Tocantins. *In: SBG/Núcleo GO/DF. Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 4, Brasília, p. 184-187.*
- FUJITA, Y.; ZHOU, J.; ORWIN, E.; REINHARD, M.; DAVISSON, M.L.; HUDSON, G.B. 1998. Tracking the movement of recharge water after infiltration. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 155-160.*
- FUNGARO, D.A. & IZIDORO, J.C. 2006. Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão. *Química Nova*, 29(4):735-740.
- GALE, I. NEUMANN, I., CALOW, R.; MOENCH, M., 2002. The effectiveness of Artificial recharge of groundwater: a review. *In: Groundwater Systems and Water Quality Programme. Phase 1, Final Report CR/02/108N. British Geological Survey. Keyworth, Nottingham. 82 p.*

-
- GALE, I. 2005. Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. Paris. Unesco-IHP.
- GAMACHE, M.; MASTERSON, K.; O'ROURKE, D. 2010. Aquifer Storage and Recovery (ASR): Why Modeling is Essential for Successful Projects. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. *Resumos*.
- GAUS, I.; CIKUREL, H.; PICOT, G.; AHARONI, A.; GUTTMAN, Y.; AZAROUAL, M.; KLOPPMANN, W. 2007. Alternative SAT of secondary effluents using a combination of UF and short term SAT for increasing infiltration rates at the Shafdan site (Israel). *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 544-557.
- GERRARD, J. 2002. Stormwater harvesting in open pit final voids in the Northern Goldfields of Western Australia. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 425-430.
- GIL, E.J. 2001. Aquífero Termal de Caldas Novas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GODOY, E.V.; GARCIA, D.S.; FARINA, S.L. 1994. Recarga Artificial do Aquífero Freático em Filadélfia - Chaco Central Paraguáio. *In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife*. p. 385-393.
- GONÇALVES, R.F.; JORDÃO, E.P.; SOBRINHO, P.A. 2003. Desinfecção de Efluentes Sanitários. *In: Ricardo Franci Gonçalves (coord.). Projeto PROSAB, ABES, Rio de Janeiro*, 438 p.
- GONZAGA, G.M. & TOMPKINS, L.A. 1991. Geologia do Diamante. *In: Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília. DNPM/CPRM. v.4. p. 53-116.
- GOREY, P. & KING, H. 2005. Developing regulatory controls for stormwater discharge to a potable aquifer in regional South Australia. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 813-818.
- GOSSEL, W.; SEFELNASR, A.; EBRAHEEM, A; WYCISK, P. 2005. Large scale recharge modeling in the arid area of the eastern Sahara. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 877-880.
- GUNKEL, G. & HOFFMANN, A. 2005. Clogging processes in a bank filtration system in the littoral zone of Lake Tegel (Germany). *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 599-604.
- HAEFFNER, H.; DETAY, M.; BERSILLON, J.L. 1998. Sustainable groundwater management using artificial recharge in the Paris region. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. 9-14.
- HAESBAERT, F.F. & COSTA, J.F.G. 2000. *Geologia e Hidrologia da Região de Caldas Novas: Adequação à Portaria 312 do DNPM*. Geocenter/Geocaldas. Relatório Técnico. Caldas Novas. 123 pp.
- HARRINGTON, G.A.; LOVE, A.J.; SANFORD, W.E. 2002. Aquifer storage recovery in a fractured rock aquifer on the Clare Valley, South Australia. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 315-318.

-
- HARRIS, B.; DUPUIS, C.; ALMALKI, M.; LI, Q.; MARTIN, M.; PROMMER, H. 2010. Near well seismic methods for aquifer recharge projects; Perth Basin Western Australia. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 8 p.
- HEILWEIL, V.M.; SUSONG, D.D.; COREY, C.J. 2007. Reservoir infiltration to fractured sandstone at Sand Hollow, southwestern Utah, U.S.A. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 475-483.
- HESPAHOL, I. 2002. Potencial de reuso de água no Brasil - Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos-RBRH*, vol. 7 n° 4, p. 75-97.
- HIGARASHI, M.M., KUNZ, A. & MATTEI, R.M. 2008. Aplicação de adsorção para remover amônia de efluentes suínolas pré-tratados. *Quim. Nova*, Vol. 31, 5:1156-1160.
- HIRATA, R. & FERREIRA, L.M.R. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências*, 31:43-50.
- HIRATA, R.; FOSTER, S.; OLIVEIRA, F.R. 2011. Águas Subterrâneas Urbanas no Brasil: Uma avaliação crítica para o desenvolvimento de políticas sustentáveis de gestão. No prelo.
- HOFMANN, T. & SCHOTTLER, U. 1998. Microparticle facilitated transport of contaminants during artificial groundwater recharge. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. 205-210.
- HOLLÄNDER H.M.; MULL, R.; PANDA, S.N. 2007. A concept for managed aquifer recharge using ASR-wells for sustainable use of groundwater resources in an alluvial coastal aquifer in Eastern India. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 15-29.
- HOLLÄNDER, H.M.; HINZ, I.; BOOCHS, P.W.; BILLIB, M. 2005. Experiments to determine clogging and redevelopment effects of ASR-wells at laboratory scale. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 611-616.
- HOOGENDOORN, J. 2002. Artificial recharge for sustainability and cost reduction in the eastern Netherlands *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 53-56.
- HORST, G.T. 1998. The role of artificial recharge of groundwater for the Water supply of Amsterdam. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. xv-xvi.
- IASH. INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SCIENTIFIC HYDROLOGY. 1970. UNESCO. *Technical Papers in Hydrology*, Paris. 59 p.
- ISMAIL, Y.L.; SAYED, E.E.; GOMA, M.A.A. 2005. Preliminary hydrologic investigations of Nubia sandstone and fractured basement aquifers in the area between El Shalateen and Halayeb, Eastern Desert, Egypt. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 868-876.
- JIN, M.; LIANG, X.; LUO, Z.; BAO, J. 2010. Integrative Technologies for Safely Managed Groundwater Recharge Using Reclaimed Water in Zhengzhou, China. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 7 p.
- JONGE, H. DE; FRAPPORTI, G.; KORTLEVE, M. 2002. Sustainable use of aquifers for artificial recharge in South-Holland. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*.

-
- Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 41-48.
- KALANTARI, N. & GOLI, A. 2005. Artificial recharge of Baghmelak aquifer, Khouzestan province, southwest of Iran. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Berlin. p. 43-48.
- LACERDA FILHO, J.V. 1999. *Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal.* CPRM/METAGO/UnB. Goiânia. 200 p.
- LAPOLLI, F.R.; SANTOS, L.F.; HASSEMER, M.E.N.; AISSE, M.M.; PIVELI, R.P. 2003. Desinfecção de efluentes sanitários por meio de Ozonização. *In: Ricardo Franci Gonçalves (coord.). Desinfecção de Efluentes Sanitários.* Projeto PROSAB, ABES, Rio de Janeiro. p 169-208.
- LATRUBESSE, E.M. 2006. *Mapa Geomorfológico do Estado de Goiás.* SIC/SGM/FUNMINERAL. Goiânia. 85 p.
- LIMAYE, S.D. 2002. Aquifer recharge management for sustainable water supply in a semi-arid, hard rock region of western India. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. p. 309-313.
- LLURIA, M.R. 1998. Successful operation of a large aquifer storage facility for a desert community. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Rotterdam. p. 41-46.
- MALIK, R.S.; JHORAR, B.S.; JHORAR, R.K.; STRECK, T.; RICHTER, J. 2002. Long-term successful operation of existing brackish cavity wells for ASR to improve quality for irrigation by Indian farmers. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. p. 465-468.
- MALIVA, R.G. & MISSIMER, T.M. 2010. Hydrogeology of ASR - Lessons from Over 60 Years of Global Practice. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Abu Dhabi. 9 p.
- MAMEDE, L. & NASCIMENTO, M.A.L.S. 1981. *Geomorfologia.* *In: MME-Brasil. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL, Folha SD. 22 Goiás.* Rio de Janeiro.
- MARTIJN, G. 1998. Water in Europe. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Rotterdam. p. xiii-xiv.
- MIGLIORINI, R.B. 1999. Hidrogeologia em meio urbano. Região de Cuiabá e Várzea Grande MT. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 146 p.
- MILCZAREK, M.; WOODSIDE, G.; HUTCHINSON, A.; KELLER, J.; RICE, R.; CANFIELD, A. 2010. The Orange County Water District Riverbed Filtration Pilot Project: Water Quality and Recharge Improvements Using Induced Riverbed Filtration. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Abu Dhabi. 8 p.
- MILLS, W. 2002. The Quest for Water Through Artificial Recharge and Wastewater Recycling. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. 8 p.
- MIRECKI, J.E. 2010. Dynamics of Sulfate-Reduction in the Floridan Aquifer System (Florida, Usa) During Asr Cycle Testing, With Implications for Arsenic Sequestration at Reclaimed and Treated Surface Water Asr Systems. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Abu Dhabi. 7 p.

-
- MISSIMER, T.; MALIVA, R.G.; GRISWOLD, R.F.; AUTREY, M.M. 2010. Reclaimed Water ASR in a Barrier Island Shallow Aquifer, Destin, Florida. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 7 p.
- MONKHOUSE R.A. & PHILIPS, S. 1978. *The design, Construction and Maintenance of Recharge Wells*. Technical Note n° 25, Central Water Planning Unit, United Kingdom.
- MONTENEGRO S.G., MONTENEGRO, A.A., CAVALCANTI, G.L., MOURA, A.E.S. 2005. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: Estudo de caso na planície do Recife (PE). *In: 5^o Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva*. Teresina. Piauí. 10 p.
- MORRIS, T.M. 2007. Injection well hydraulic performance and clogging detection. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 570-577.
- MOSCH, M.J.M. 1998. Dynamic simulation model for water management of a large-scale artificial recharge system. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. 15-20.
- MURRAY, E.C. & TREDoux, G. 2002. Karkams borehole injection tests: Results from injection into a low-permeability fractured granitic aquifer. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 301-304.
- MURRAY, D.R.; BOTHA, F.; RAVENSCROFT, P. 2007. Artificial recharge strategy for South Africa: What is it all about and will it give impetus to artificial recharge in South Africa? *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 140-147.
- NADEE, S.; SRISUK, K.; SARAPIROM, P.; PAVELIC, P.; UPPASIT, S. 2010. Field and Laboratory Experiments to Investigate Infiltration Processes and Clogging Effects from a Ponding Recharge System at Ban Nong Na, Bangrakum District, Pitsanulok Province, Lower Yom River Basin, Thailand. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 7 p.
- OLSTHOORN, T.N. & MOSCH, M.J. M. 2002. Fifty years artificial recharge in the Amsterdam dune area. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Adelaide. p. 29-33.
- PALANISAMI, K.; RAVIRAJ, A.; JAYAKUMAR, B.; GURUNATHAN, S.; ARIVALAGAN, T.; THIRUMURTHI, S. 2005. Technical effectiveness of artificial recharge structures in hard rock area - A case study in Coimbatore District, India. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 720-726.
- PASSADORE, G.; MONEGO, M.; ALTISSIMMO, L.; SOTTANI, A.; PUTTI, M.; RINALDO, A. 2010. Artificial recharge of the aquifer system of Central Veneto (Italy): Modelling and forced infiltration experiments through dismissed quarries. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. *Resumos*.
- PAVELIC, P.; DILLON, P.J.; BARRY, K.E. 2007. Management of clogging for reclaimed water ASR in a carbonate aquifer. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge*. Phoenix. p. 148-161.
- PAVELLIC, P.; DILLON, P.J.; BARRY, K.E.; HERCZEG, A.L.; RATTRAY, K.J.; HEKMEIJER, P.; GERGES, N.Z. 1998. Well clogging effects determined from mass balances and hydraulic response at a stormwater. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge*. Rotterdam. p. 61-66.

-
- PEI, Y.; LUAN, Z.; TIAN, Z.; HU, D. 2002. Diversion of river water to aquifer recharge and landscape utilization in Qiongsan City, China. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. p. 519-522.
- PEIXOTO FILHO, S. 2000. Contribuição à Gestão do Aquífero Termal de Caldas Novas/Rio Quente. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 183 p.
- PENA, G.S. & FIGUEIREDO, A.J. 1972. *Projeto Alcalinas.* DNPM. Goiânia. 143 p.
- PENA, G.S. 1976. *Projeto Goiânia II.* DNPM/CPRM. Relatório Final. Goiânia.
- PÉREZ-PARICIO, A. & CARRERA, J. 1998. Preliminary study for deep injection experiments at the Cornellà site, Barcelona. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Rotterdam. 325-330.
- PERRIN, J.; MASCRÉ, C.; MASSUEL, S.; AHMED, S. 2010. Contribution of Percolation Tanks to Total Aquifer Recharge: The Example of Gajwel Watershed, Southern India. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Abu Dhabi. 8 p.
- PIPE-MARTIN, C. 2005. Protecting an island aquifer by using recycled water as a hydraulic barrier - a case study of Bribie Island. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Berlin. p. 856-861.
- PYNE, R.D.G. 1994. *Groundwater Recharge and Wells: a guide to aquifer storage and recovery.* Lewis Publishers, Florida, 376 p.
- PYNE, R.D.G. 2002. Water quality changes during aquifer storage recovery (ASR). *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. p. 65-68.
- RAHMAN, M.A.; NÖDLER, K.; PTAK, T.; LICHA, T.; RUSTEBERG, B.; DIMITRIADIS, K.; SOUPLAS, Ath.; SAUTER, M. 2010. Influence of Aquifer Properties on Water Quality Changes During Infiltration of Treated Effluent. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Abu Dhabi. 8 p.
- RAMASESHA, C.S.; NANDAKUMARAN, P.; SURESH, S. 2002. Efficacy of sub surface dykes as groundwater conservation structures in hard rock terrain of Tamil Nadu, India. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Adelaide. p. 399-404.
- RINCK-PFEIFFER, S.; PITMAN, C.; DILLON, P. S. 2005. Stormwater ASR in practice and ASTR (Aquifer Storage Transfer and Recovery) under investigation in Salisbury, South Australia. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge.* Berlin. p. 151-159.
- RIVERA, J.J.C. 2000. Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeology Journal.* 8(5): 503-520.
- RUITER, H. DE. & STUYFZAND, P.J. 1998. An experiment on well recharge of oxic water into an anoxic aquifer. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Rotterdam. p. 299-304.
- SADEK, S. & EL FADEL, M. 1998. The Management of surface and groundwater resources in Lebanon. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater.* Rotterdam. p. 35-40.

-
- SALAJEGHEH, A. & KESHTKAR, A.R. 2005. Investigation of water spreading effects on water table of aquifer in arid and semi-arid regions. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 881-882.*
- SALIM, N. & WILDI, W. 2005. Conceptual approach of recharge estimation at the West Bank aquifers - Palestine. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 214-219.*
- SALO, J.E.D.; HARISSON, D.; ARCHIBALD, E.M. 1986. Removing Contaminants by Ground Water Recharge Basins. *Journal American Water Works Association, 78(79):76-81.*
- SANKARANNA, G. 2002. Impact of water harvesting structures on groundwater development: a study from Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 305-308.*
- SARDÁ, L.G. 2006. A utilização da zeólita na remoção de nutrientes do efluente de dejetos suínos. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina. 39 p.
- SARDÁ, L.G., HIGARASHI, M.M., COMIN, J.J. 2007. Uso de zeólitas como alternativa para tratamento de dejetos suínos e redução da poluição ambiental. *Rev. Bras. de Agroecologia. v. 2, n° 2. 4 p.*
- SCHOTT, U. 2010. ASR as a Strategic Resource - Challenges in the Arabian Gulf Region. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. 7 p.*
- SEPLAN. Secretaria de Planejamento do Estado de Goiás. 2010. XXX. Disponível em <http://www.seplan.goias.gov.br>. Acessado em 20 abr 2010.
- SHARMA, S.; KATUKIZA, A.; AMY, G. 2007. Effect of wastewater quality and process parameters on removal of effluent organic Matter (EfOM) during soil aquifer treatment. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 272-284.*
- SHARMA, S.; HUSSEN, M.; AMY, G. 2010. Soil Aquifer Treatment Using Advanced Primary Effluent. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. 8 p.*
- SHASHA, Z.; JING, M.; SUN, Q.; DONG, X.; TANG, Q. 2010. Study of the Transformation and Removal of Nitrogen in Variably Saturated Soil Column Under Alternative Leaching and Drying Conditions. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Abu Dhabi. Resumos.*
- SHAWKY, I. 2005. Applications of most recent borehole geophysical logging for aquifer characterization. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 467-476.*
- SHINZATO, M.C. 2007. Remoção de Metais Pesados em Solução por Zeólitas Naturais: Revisão Crítica. *Revista do Instituto Geológico. São Paulo, 27-28 (1/2): 65-78.*
- SILVA, G.E.S. 2004. Avaliação do Potencial da Recarga Artificial como Alternativa para Recuperação da Potenciometria de Aquífero: Estudo de Caso na Planície do Recife-PE. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 145 p.
- SILVA, G.E.S., MONTENEGRO, S.M.G.L., COSTA, L.M. 2004. Modelagem numérica de recarga artificial em aquífero costeiro na planície do Recife (Brasil). *XXV CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods. Recife, PE. XXP.*

-
- SILVA, S.C., SANTANA, N.M.P., PELEGRINI, J.C. 2006. *Caracterização Climática do Estado de Goiás*. Superintendência de Geologia e Mineração. Governo do Estado de Goiás. Goiânia. CDU 551.58 (817.3). 133 p.
- SONNENHOLZNER, S. 2004. Ensayo de remoción de amonio por mineral zeolita: Efecto del radio del soluto (amonio) com respecto al absorbente (zeolita). *Boletín Informativo Cenain* n° 110 de 15 de Agosto del 2004. Quito. *Resumos*.
- SOUZA, M.T. 2001. Fundamentos para gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 94 p.
- SOUZA, V.C.B. & GOLDENFUM, J.A. 2002. Trincheiras de Infiltração como Elemento de Controle do Escoamento Superficial: Um Estudo Experimental. *In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte. 11 p.
- STUYFZAND, P.J. 1998. Fate of pollutants during artificial recharge and bank filtration in the Netherlands. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater*. Rotterdam. p. 119-128.
- STUYFZAND, P.J.; KORTLEVE, M.; OLSHOORN, T.N.; ROLF, H. 2007a. Accumulation and leaching during artificial recharge compared to a natural recharge system, in the Netherlands. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 174-184.
- STUYFZAND, P.J.; SEGERS, W.; ROOIJEN, N. 2007b. Van. Behavior of pharmaceuticals and other emerging pollutants in various artificial recharge systems in the Netherlands. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 231-245.
- STUYFZAND, P.J.; WAKKER, J.C.; PUTTERS, B. 2005. Water quality changes during Aquifer Storage and Recovery (ASR): results from pilot Herten (Netherlands), and their implications for modeling. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Berlin. p. 164-173.
- TAYLOR, B.E. 1987. Stable isotope geochemistry of ore-forming fluids. *In: Prospecção Geoquímica, Depósitos Mineraiis Metálicos, Não Metálicos, Óleo e Gás*. SBGq/CPRM. Rio de Janeiro. p 457-488.
- THEIS, C.V. 1935. The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *American Geophysical nion Transaction*, Part II, Washington, p.519-524.
- THEIS C.V. 1938. The significance and nature of the cone of depression in ground-water bodies. *Econ. Geol.*, **38**:889-902.
- TREDOUX, G.; CAVÉ, L.; BISHOP, R. 2002. Long-term stormwater and wastewater infiltration into a sandy aquifer, South Africa. *Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial recharge of groundwater, ISAR-4 Adelaide*, South Australia. p. 35-40.
- TREDOUX, G.; MERWE, B.V.D.; PETERS, I.; LOUW, D.R. 2007. Water quality aspects of artificial groundwater recharge at Windhoek. *In: Artificial Recharge of Groundwater. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*. Phoenix. p. 519-532.
- TRÖGER, U.; COSTA, J.F.G.; HAESBAERT, F.F. & ZSCHOCKE, A. 1999. Novas Contribuições aos Aquíferos Termiais de Caldas Novas, Goiás. *In: SBG-Núcleos Centro-Oeste e Minas Gerais. Simpósio de Geologia do Centro-Oeste e Simpósio de Geologia de Minas Gerais*. Brasília. *Resumos*.

-
- TRÖGER, U.; COSTA, J.F.G.; HAESBAERT, F.F. 2003. The Termal Aquifer and the Springs of the Serra de Caldas Area - Goiás - Brazil. *In: Int. Conf. Groundwater in Fractured Rocks*, Prag.
- TRÖGER, U., PEIXOTO FILHO, S. & LACERDA, H. 2004. Thermal Water Springs in Central Brazil - Hidrogeology, Chemical Composition and Isotope Studies. *In: XXXIII IAH Congress*, Mexico. ISBN 970-32-1749-4.
- TRÖGER, U. 2007. Structure Conditional Thermal springs in Central Brazil. *In: Groundwater in Fractured Rocks*. Prague. p 355-371.
- TUCCI, C.E. & MENDES, C.A. 2006. *Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica*. *In: MMA, Ministério do Meio Ambiente*. Brasília. 302 p.
- VANDERZALM, J.; LA SALLE, C. LE GAL.; HUTSON, J.L.; DILLON, P.J. 2002. Water quality changes during aquifer storage and recovery at Bolivar, South Australia. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. 83-88.
- VANDERZALM, J.; LA SALLE, C. LE GAL.; DILLON, P. 2005. Behaviour of trace metals and metalloids during Aquifer Storage and Recovery (ASR) of reclaimed water in a carbonate aquifer at Bolivar, South Australia. *In: Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources*. Proceedings of the 5th International Symposium on Management of Aquifer Recharge. Berlin. p. 316-321..
- VANDERZALM, J.; PAGE, D. W.; BARRY, K. E.; DILLON, P. J. 2010. Comparing Water Quality During Urban Stormwater MAR Via ASTR and ASR. *In: Proceedings of the 7th International Symposium on Management of Aquifer Recharge*. Abu Dhabi. 8 p.
- VISWANATHAN, M.N. & AL-SENAFY, M.N. 1998. Role of artificial recharge in the water resoucers management of Kuwait. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 29-34.
- WENDELL, D. & GLANZMAN, D. 1998. Well recharge in California: Water quantity and quality considerations. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Rotterdam. p. 293-298.
- WOODSIDE, G. D. & WEHNER, M. P. 2007. Innovative water quality studies on the Santa Ana River, California. *In: Artificial Recharge of Groundwater*. Proceedings of the 6th International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater. Phoenix. p. 534-543.
- YAO, Z. J.; GAO, Y. C.; LU, Y.; SHEN, L. 2002. Main technologies and potential analysis on artificial recharge in Beijing. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 431-434.
- ZAISHENG, H. 2002. Artificial recharge of groundwater in North China Plain *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 435-438.
- ZARE, M.; RAEISI, E.; ZEYNALI, A. 2002. Study on the reduction of infiltration rate of Emamzadeh Jaafar artificial recharge project, Iran. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 231-235.
- ZEELIE, S. O. 2002. Dam and recharge ponds to enhance recharge in the Namib Desert. *In: Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Adelaide. p. 387-392.
- ZOBY, J. L. G. 1999. Hidrogeologia de Brasília - Bacia do Ribeirão Sobradinho. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 178 p.

ANEXO 1

**(PERGUNTAS E RESPOSTAS SOBRE AS ÁGUAS QUENTES DE CALDAS
NOVAS E RIO QUENTE, NO ESTADO DE GOIÁS)**

INTRODUÇÃO

O presente texto apresenta os resultados de diversos estudos realizados na região de Caldas Novas e Rio Quente, no estado de Goiás. O objetivo do trabalho é apresentar as características gerais da região para um público amplo, não necessariamente com conhecimentos técnicos, de forma que os empresários ligados à questão das águas quentes, a população da região em geral e os turistas, tenham conhecimentos básicos sobre a origem das águas quentes e algumas ações visando à preservação deste recurso na região das Águas Termais.

Diversos estudos desenvolvidos desde o início da década de 80, pelo DNPM/CPRM, UnB e Universidade Técnica de Berlim, culminando com o Projeto de Preservação das Águas Termais, financiado pela Associação dos Mineradores de Águas Termais do Estado de Goiás-AMAT/GO, foram utilizados para subsidiar o presente trabalho.

Para alcançar o objetivo de máximo alcance de público o texto será organizado na forma de Perguntas e Respostas com linguagem simples e com definição dos termos técnicos mais importantes.

1. QUAIS SÃO OS PRINCIPAIS CONCEITOS E TERMINOLOGIAS TÉCNICAS RELATIVAS AOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS?

Aquífero é todo o material geológico, representado por solo ou rocha, que pode armazenar água na sua forma líquida ou no estado de vapor e transmiti-la de modo eficiente ou aproveitável. Os aquíferos são classificados, em função dos tipos de espaços que podem conter água, em **intergranular**, **fraturado** ou **cárstico**.

Em contraste ao conceito de aquífero existe o termo camada confinante, que recobre o aquífero e apresenta menor permeabilidade sendo classificada em aquífugo/aquicluda (rocha impermeável) ou aquitarde (rocha com baixa permeabilidade em relação ao aquífero).

Os aquíferos intergranulares contêm água nos espaços entre os grãos constituintes das rochas e/ou solos, de forma que o princípio dos vasos intercomunicantes possa ser aplicado. Os arenitos são os melhores exemplos deste tipo de reservatório subterrâneo e representam os mais extensos e proeminentes reservatórios de água subterrânea existentes. Os sistemas aquíferos fraturados são desenvolvidos em rochas que não contêm espaços entre os minerais constituintes (ex. gnaisse, quartzito, granito ou basalto), entretanto a água ocupa as fendas ou fissuras formadas por esforços tectônicos ou por contração térmica, como ocorre na região de Caldas Novas. Os aquíferos cársticos são formados em rochas carbonáticas (calcários, dolomitos ou mármore), que por serem susceptíveis à dissolução desenvolvem vazios que são preenchidos por água.

Portanto, a idéia de que a água subterrânea ocorre na forma de um grande lago subterrâneo ou como veias de águas (similares às artérias humanas) não é correta. Apenas nos aquíferos cársticos pode-se esperar a presença de rios subterrâneos. Contudo, esses sistemas representam a menor parte dos reservatórios subterrâneos. O recurso hídrico subterrâneo deve ser entendido como um volume de água que ocupa os pequenos espaços nos maciços rochosos ou nas coberturas de solos.

Quando esses espaços apresentam aberturas menores que um milímetro, o fluxo da água é denominado **laminar** (no sentido de que lâminas d'água fluem entre os constituintes sólidos). Quando as aberturas são maiores, o fluxo é denominado **turbulento**, pois a água flui de forma similar ao fluxo no interior de uma tubulação.

A porção rasa de um aquífero é chamada de **zona não saturada**, zona vadosa ou zona de aeração. Nessa região a água ocorre na forma de vapor ou como água pelicular (nas bordas dos grãos). Abaixo da zona vadosa ocorre a chamada **zona saturada** do aquífero, onde todos os espaços são preenchidos por água (Figura 1).

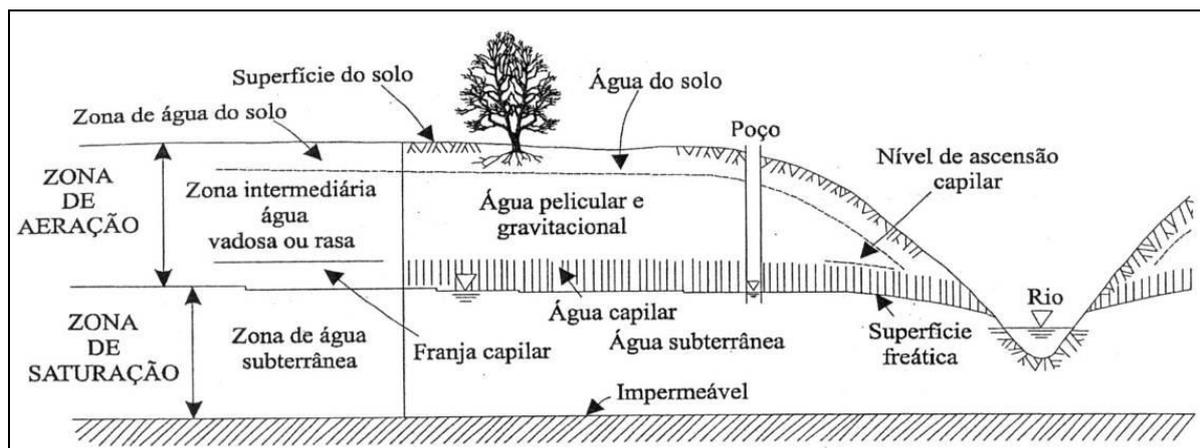


Figura 1 - Representação esquemática da distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas formas da presença da água subterrânea (Fonte: Cabral 2000).

A superfície que delimita as zonas saturada e não saturada é denominada **superfície potenciométrica**. Nos sistemas em que a superfície potenciométrica coincide com superfície física da água, o sistema é denominado aquífero livre.

Quando a superfície potenciométrica ocorre acima da superfície física da água, o aquífero é denominado de confinado ou artesiano. Neste caso é necessária a presença de uma camada de material com condutividade hidráulica (permeabilidade) contrastante com o aquífero em questão (aquífugo ou aquitarde).

Os aquíferos apresentam três funções básicas denominadas de função filtro, reguladora e reservatório. A função filtro é referente ao papel depurador natural das águas que infiltram a partir da superfície em direção às porções mais profundas do aquífero. A função reguladora é relacionada ao papel de transferência das águas subterrâneas para as drenagens superficiais, o que é responsável pela manutenção da perenidade das nascentes, córregos e rios, mesmo no período onde não ocorrem chuvas. A função reservatório é materializada pela acumulação da água nos espaços e inclui os aspectos mais econômicos do aquífero.

A função filtro do aquífero é desempenhada na zona não saturada, a função reguladora retrata a elevação e rebaixamento anual/sazonal da superfície potenciométrica e o papel de reservatório é a principal função desempenhada na zona saturada do aquífero.

A água presente nos mananciais subterrâneos é a mesma que ocupa os rios, lagos, mares e vapor atmosférico. Essas águas circulam continuamente em um circuito denominado de ciclo hidrológico. Com a precipitação na forma de chuva e neve a água que alcança a superfície do terreno, parte infiltra no solo e parte escoar na forma de excedente pluvial. As águas armazenadas nos aquíferos, por sua vez, migram e alimentam nascentes, córregos e demais corpos hídricos superficiais e posteriormente poderão ser evaporadas formando nuvens que novamente voltarão à superfície pelos eventos de chuva.

A exploração adequada de um sistema aquífero deve ser feita de forma a estabelecer um balanço entre as entradas e as retiradas, ou seja, a quantidade de água retirada pelo bombeamento dos poços deve ser equivalente à quantidade de águas de chuva que recarrega o sistema no ciclo hidrológico anual. No caso da instalação de um lago artificial, alguns efeitos são observados nos aquíferos, os quais podem ser entendidos como impactos positivos ou negativos e serão oportunamente descritos e analisados.

2. COMO SÃO CLASSIFICADOS OS AQUÍFEROS DA REGIÃO?

Na região das águas quentes de Goiás, os reservatórios subterrâneos podem ser classificados em dois grandes domínios: águas rasas ou freáticas associadas aos meios intergranulares (solos) e águas profundas relacionadas aos meios fraturados (rochas). Os aquíferos fraturados ainda são classificados em frios e quentes. A nomenclatura dos aquíferos fraturados segue a mesma atribuída às rochas e inclui Aquífero Paranoá (relativo ao Grupo Paranoá) e Aquífero Araxá (vinculado às rochas do Grupo Araxá). Em Geologia o termo **Grupo**, é relativo a um conjunto de rochas com mesma origem, idade e ambiente geral de formação. A seguir são apresentadas as principais informações técnicas e a classificação dos aquíferos.

Sistema Aquífero Intergranular

São aquíferos livres, contínuos lateralmente, de ampla extensão com espessura saturada muito variável e de grande importância hidrogeológica local. Este sistema foi dividido em dois subsistemas denominados de **P_I** e **P_{II}**, em função das características físicas do manto de intemperismo.

O Subsistema **P_I** é limitado ao platô da Serra de Caldas, sendo representado pelo manto de cobertura dos quartzitos (rochas arenosas) do Grupo Paranoá, com espessuras variando de poucos metros até 64 metros. Os solos e saprolitos dessa cobertura apresentam valores de permeabilidade muito elevados (com ordem de grandeza variando de 10^{-5} a 10^{-4} m/s), sendo classificados como latossolos com textura média a arenosa e areias quartzosas.

O relevo essencialmente plano, com cotas superiores a 1000 metros e coberturas de solos permeáveis resulta em uma situação de recarga muito eficiente, de forma que a recarga é representada por mais de 50% da precipitação e o escoamento superficial é limitado às bordas da serra nos períodos de máxima precipitação. A drenança das águas deste subsistema para as zonas mais profundas é muito eficiente, de forma que sua zona não saturada apresente grande espessura e em muitos casos fique limitada ao topo rochoso.

O Subsistema **P_{II}** é representado pelos cambissolos, neossolos litólicos presentes na borda da Serra de Caldas e pelos solos argilosos derivados dos xistos do Grupo Araxá e apresentam espessuras e valores de condutividade hidráulica inferiores ao do Subsistema **P_I**.

Os aquíferos intergranulares são caracterizados por águas frias com temperaturas próximas às médias anuais locais e por águas pouco mineralizadas. O tempo de contato entre as águas de chuva e o material geológico (solo ou rocha alterada), é restrito, o que diminui a taxa total de sais dissolvidos. Os exutórios destes aquíferos são representados por pequenas fontes de contato e/ou de depressão, e pela drenança para os aquíferos fraturados subjacentes.

Estes aquíferos desempenham três importantes funções: funcionam como filtros, favorecem a recarga dos aquíferos sotopostos e regularizam a vazão de base das drenagens superficiais nos períodos de recessão de precipitações pluviométricas.

Sistema Aquífero Paranoá

Este sistema é representado por aquíferos: fraturados, livres ou confinados, frios ou termais, anisotrópicos e heterogêneos e com extensão lateral controlada pelos grandes lineamentos. O Sistema Paranoá é classificado como aquífero livre quando as zonas de fraturas são associadas a áreas de afloramentos de rochas areno-argilo-carbonatadas do Grupo Paranoá, sendo na região de Caldas Novas correspondente ao Domo de Caldas. Por outro lado, quando as zonas fraturadas/fissuradas são recobertas por rochas xistosas do Grupo Araxá, estes aquíferos são classificados como confinados, sendo os xistos considerados como o conjunto aquífero confinante. O Grupo Araxá pode ser considerado como conjunto confinante, pois apesar de também ser potencialmente fraturado, a densidade e a abertura das fraturas são muito inferiores às

do Grupo Paranoá. Esta feição é exclusivamente em função do contraste reológico dos litotipos das duas unidades litoestratigráficas.

Da mesma forma, o Sistema Paranoá pode ser dividido em aquíferos frios e termais. O primeiro caso é relacionado às zonas fraturadas com águas de fluxo descendente em profundidades inferiores a 400 metros. Normalmente essa situação está associada às porções onde estes são classificados como aquíferos livres.

O Sistema Aquífero Paranoá é considerado termal quando estiver associado a condições de fluxos descendentes em profundidades maiores que 450 metros, ou em qualquer profundidade, quando mantiver o fluxo ascendente a partir de fraturas abertas em grandes profundidades.

Para o Aquífero Paranoá Frio, os exutórios naturais são caracterizados por fontes de fraturas, enquanto que para o aquífero Paranoá Termal os exutórios são representados por fontes de fraturas, pelo Rio Quente e pelos poços tubulares profundos em operação na área urbana da Cidade de Caldas Novas.

A recarga deste sistema aquífero se dá principalmente pela drenagem do Subsistema Intergranular **P_I**, ou seja, a partir da infiltração na região plana no platô da Serra de Caldas e secundariamente pela infiltração de águas do Subsistema Intergranular **P_{II}**.

De maneira geral, o Sistema Aquífero Paranoá apresenta excelentes condições de circulação e valores de permeabilidade elevados, porém muito anisotrópicos. Os valores elevados dos parâmetros dimensionais devem-se ao fato de a região de Caldas Novas ter sido submetida a esforços neotectônicos relacionados à fase *drifte* da evolução sul-atlântica. Em Caldas Novas ocorrem poços com profundidades maiores que 900 metros com significativas entradas de águas termais (temperaturas superiores a 55° C).

Sistema Aquífero Araxá

Este sistema é representado por aquíferos fraturados muito heterogêneos e anisotrópicos, livres, frios ou termais, com extensão lateral restrita controlada pela distribuição das zonas de fraturamento.

Os aquíferos ligados ao Sistema Araxá classificados como frios são aqueles cujas zonas fraturadas são recarregadas diretamente pela infiltração de águas de precipitação a partir do Subsistema Intergranular **P_{II}**. Neste caso são consideradas as primeiras centenas de metros da coluna de xistos do Grupo Araxá.

As zonas fraturadas mais profundas, próximas ao contato tectônico entre os grupos Araxá e Paranoá e eventualmente, as zonas fraturadas mais abertas em profundidades menores, compõem o aquífero Araxá termal da região de Caldas Novas. A recarga destes aquíferos se dá por fluxo ascendente a partir de misturas de águas aquecidas do Aquífero Paranoá termal sotoposto.

Nas condições de confinamento, as zonas fraturadas que representam o Sistema aquífero Paranoá Termal apresentam elevada carga potenciométrica, pois a zona de recarga está situada em cotas superiores a 1000 metros. Assim, quando as águas aquecidas encontram fraturas abertas nos xistos, estas sobem e se misturam com as águas frias do aquífero Araxá.

As áreas de descarga do Sistema Aquífero Araxá (termal e frio) são representados pelas antigas nascentes termais da região de Caldas Novas e pelas fontes de água fria, dispersas pela região de exposição dos xistos. Os poços tubulares da região de Caldas Novas também são exutórios artificiais destes aquíferos.

Em termos químicos estas águas são as mais mineralizadas da região, o que é função direta da elevada reatividade das rochas em comparação com os quartzitos e metapelitos do Grupo Paranoá. Os xistos, por sua vez, apresentam grande concentração de micas, além da presença constante de carbonatos em veios.

Da mesma forma que o Sistema Aquífero Paranoá, os parâmetros dimensionais para os aquíferos Araxá não foram tratados quantitativamente. Contudo, por analogia, com os valores obtidos para a região do Distrito Federal (Campos & Freitas-Silva 1998), esses valores são significativamente menores que aqueles atribuídos ao Sistema Aquífero Paranoá. Esta feição é devida a dois fatores: reologia dos xistos, os quais apresentam caráter mais plástico, com tendência de acomodação das fraturas por confinamento litostático em profundidade e atitude da foliação em baixo ângulo, o que dificulta a percolação das águas a partir dos sistemas adjacentes.

3. COMO É A COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS QUENTES DA REGIÃO?

O estudo da composição química das águas foi efetuado com base em análises de águas de nascentes, de córregos e de poços tubulares (em aquíferos termais relacionados aos sistemas Paranoá e Araxá). A amostragem foi realizada em vários projetos de pesquisa desenvolvidos pelas universidades de Brasília - UnB e Técnica de Berlin.

A sílica, cálcio, magnésio e carbonato foram as espécies químicas que proporcionaram a maior distinção entre os vários tipos de águas.

Três conjuntos de águas subterrâneas foram definidos com base em seu conteúdo químico: águas das nascentes, águas do Sistema Aquífero Paranoá e o Sistema Aquífero Araxá. As águas das nascentes são importantes, pois representam a composição química próxima da composição original das águas que infiltram e recarregam os aquíferos profundos. A diferença da composição química entre as águas dos aquíferos Paranoá e Araxá é importante porque é um parâmetro utilizado para a diferenciação dos reservatórios.

As águas das nascentes apresentam os menores valores de totais de sólidos dissolvidos, sendo as águas com menor mineralização total. Essas águas têm composição química próxima a das águas de precipitação pluviométrica. Como seu contato com o meio geológico é mínimo (fluxo hidrogeológico local), sua mineralização é muito reduzida.

As águas termais do Sistema Aquífero Paranoá apresentam baixa mineralização total com total de sólidos dissolvidos (TDS) variando de 17 a 43 mg/l; pH variando de 5,2 a 6,3; e valores de Silício variando de 12 a 17 mg/L. A baixa mineralização dessas águas é atribuída como função dos tipos litológicos pouco reativos que compõem seu reservatório. Ou seja, quartzitos e metassiltitos são pouco reativos e não proporcionam grande disponibilidade de íons para a água que circula através de suas fraturas.

Apenas próximo ao contato com as rochas do Grupo Araxá em situações onde ocorrem mármore existe a possibilidade de ocorrência de águas com maior mineralização.

O último conjunto é representado pelas águas do Grupo Araxá, o qual representa o grupo com maior grau de mineralização, com valores de TDS que podem superar 70 mg/l; pH superior a 6,6; conteúdo de Silício variando de 6 até 12 mg/l; e valores de cálcio e magnésio sempre muito superiores aos valores observados nas águas do Sistema Aquífero Paranoá. Os valores mais elevados da mineralização das águas do Sistema Aquífero Araxá já eram esperados uma vez que o conjunto litológico que compõe os reservatórios subterrâneos é mais solúvel e proporciona maior volume de íons para as águas. Algumas amostras apresentaram valores elevados de nitrato e deverão ser submetidas a análises de isótopos estáveis para definição da origem destas anomalias. De forma geral, as águas subterrâneas de todos os aquíferos são consideradas de excelente qualidade química natural e com baixo conteúdo de sais dissolvidos.

4. COMO SE DÁ O AQUECIMENTO DAS ÁGUAS DA REGIÃO DE CALDAS NOVAS E RIO QUENTE?

A proposta de padrão de circulação das águas subterrâneas foi estabelecida a partir da integração do seguinte conjunto de dados:

- ✓ Informações hidrológicas, principalmente valores de vazões das drenagens superficiais e de precipitação (total médio de chuvas),
- ✓ Idades de águas frias e termais,
- ✓ Informações sobre o balanço hídrico local,
- ✓ Dados sobre a composição química das águas subterrâneas (frias e termais),
- ✓ Dados de subsuperfície, principalmente de construção de poços e de vídeo inspeção (filmagem dos poços).

Do ponto de vista regional, a Serra de Caldas é de extrema importância para as águas termais, pois é naquele setor que se processa o maior volume de recarga das águas quentes. Dessa forma, o modelo de circulação diferentes padrões de fluxo é condicionado aos padrões de fraturas foi propostos a partir dos poços de observação situados na porção central da Serra de Caldas, além dos poços presentes na cidade de Caldas Novas e dos dados de vazão e temperatura das águas do Rio Quente.

Como pode ser avaliado pelas linhas de fraturas e falhas que cortam a Serra de Caldas, a região é influenciada por estruturas que apresentam ampla abertura e continuidade vertical. Sob essas estruturas há o rebaixamento da superfície potenciométrica relacionada ao Sistema Aquífero Intergranular P_I.

Considerando um grau geotérmico de 30° C por quilômetro, isto é, aumento de 1° C a cada 33 metros de penetração na crosta, as águas mais quentes do aquífero Paranoá termal, com cerca de 60° C na superfície, necessitariam estar em contato com rochas a profundidades superiores a 1.000 metros. Assim, a Fig. 2 mostra, de forma esquemática, o padrão regional de circulação das águas termais dos sistemas aquíferos Paranoá e Araxá.

Dados de estudos geofísicos regionais mostram que na região de Caldas há um espessamento do Grupo Paranoá, quando comparado com a região do Distrito Federal ou Alto Paraíso de Goiás. O aquecimento da água se dá a partir do contato entre as águas descendentes e as rochas do Grupo Paranoá, que ao se infiltrarem apresentam aumento de calor relacionado ao grau geotérmico local.

A presença de rochas magmáticas em subsuperfície é totalmente descartada em função da composição química das águas termais do aquífero Paranoá, a qual se caracteriza pela baixíssima mineralização. No caso da presença de rochas ígneas em profundidade, para explicar a fonte de calor, a composição química das águas deveria apresentar valores de íons dissolvidos muito mais elevados do que são observados nas águas quentes da região.

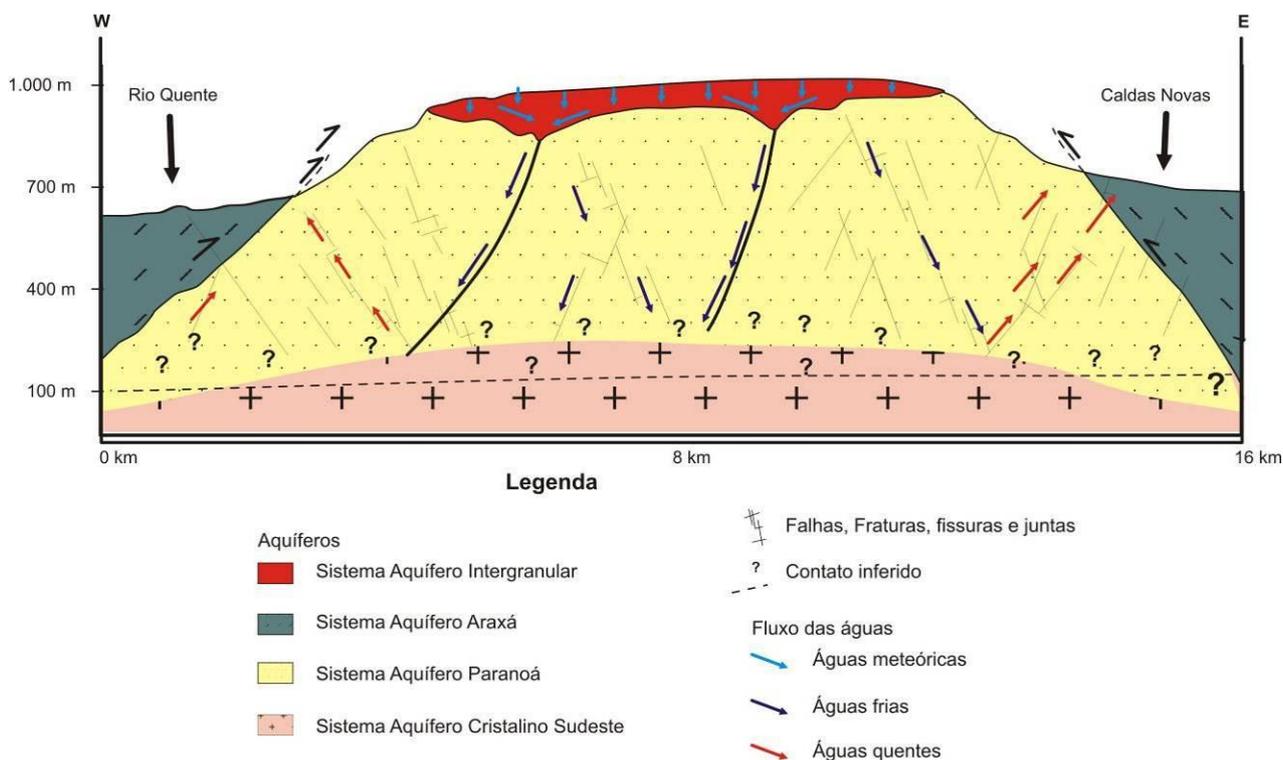


Figura 2 - Seção esquemática ilustrando os sistemas de fluxo hidrogeológico presentes na região das águas quentes do sudeste do estado de Goiás (Almeida *et al.* 2006).

5. QUAIS OS PRINCIPAIS PROBLEMAS OBSERVADOS COM RELAÇÃO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA REGIÃO?

Na região de Caldas Novas ocorrem alguns dos problemas comuns com relação ao uso das águas subterrâneas com destaque para:

Sobreexploração - é materializada pelo bombeamento demasiado da água do aquífero de forma que a vazão de retirada é muito superior à recarga. O efeito mais imediato e direto deste processo é o rebaixamento contínuo da superfície potenciométrica do aquífero. Em Caldas Novas este processo foi muito intenso até o início dos anos 1980 quando o Departamento Nacional da Produção Mineral, órgão responsável pela gestão da exploração mineral iniciou um processo de controle rigoroso coibindo a construção de novos poços e monitorando mensalmente os níveis d'água na região. Desde então o rebaixamento ficou limitado e a sobreexploração foi controlada.

Impermeabilização - é resultante do selamento das superfícies do terreno pelo uso e ocupação do território. Este processo vem ocorrendo de forma acentuada na região da cidade de Caldas Novas com o avanço da urbanização. De fato, a impermeabilização é decorrente da própria instalação da cidade com a pavimentação de ruas, construção de calçadas e passeios revestidos, construção de casas e demais edificações. Assim, parte da água que anteriormente se infiltrava em direção à zona saturada do aquífero passa a compor o excedente de águas pluviais e é destinado diretamente ao corpo hídrico receptor (no caso da região de Caldas Novas o próprio ribeirão de Caldas).

Na região da Serra de Caldas onde está situado o Parque Estadual de Caldas Novas, este tipo de impacto não ocorre, uma vez que se trata de uma unidade de proteção ambiental de caráter restritivo.

Risco a contaminação - corresponde à possibilidade de migração de cargas de efluentes a partir da superfície ou da zona não saturada em direção às porções mais profundas do aquífero. Na região de Caldas Novas os principais focos efetivos de contaminação estão relacionados a:

-
- ✓ Falta de saneamento básico, o que faz com que grande parte da área urbana tenha que processar o saneamento *in situ*, isto é, a partir da infiltração dos efluentes domésticos em sistemas de fossa e sumidouros;
 - ✓ Postos de combustíveis que mantêm os tanques de armazenagem enterrados em solos ácidos o que podem resultar em vazamentos nos reservatórios e nas tubulações adutoras de combustíveis;
 - ✓ Áreas de acumulação de resíduos sólidos, que podem gerar efluentes ácidos, ricos em metais e com elevada toxidez (denominado chorume);
 - ✓ Áreas de sepultamento (cemitérios), as quais podem gerar efluentes ricos em elementos patogênicos como vírus e bactérias.

Na região das águas quentes o risco a contaminação é considerado efetivo apenas nas águas dos Aquíferos intergranulares rasos, pois as águas profundas têm maior proteção natural.

6. QUAIS FORAM OS OBJETIVOS DO PROJETO DE PROTEÇÃO DAS ÁGUAS QUENTES?

Os objetivos práticos dos estudos incluíram:

- ✓ Desenvolver projetos pilotos de **recarga artificial** para implementar a estabilização do nível de água subterrânea do aquífero termal; elevar o nível estático da água subterrânea ao patamar de 1980 e aumentar as condições de recarga para incrementar a capacidade de captação da água termal;
- ✓ Maximizar o volume de informações científicas sobre o sistema termal a partir da análise detalhada do acervo de dados existentes, e de todas as informações geradas durante o período de desenvolvimento;
- ✓ Definir as bases para minimizar os riscos de contaminação das águas subterrâneas de forma a se definir a vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos, os focos potenciais de contaminação e a metodologia mais indicada para a proteção das águas subterrâneas.

7. O QUE É RECARGA ARTIFICIAL E QUAL SUA IMPORTÂNCIA

A recarga artificial de aquíferos é uma prática cada vez mais comumente utilizada em todas as regiões do mundo onde a escassez de água é uma realidade. No Brasil os estudos visando a recarga são incipientes, contudo observa-se uma tendência de que este tipo de iniciativa deverá permear os projetos visando a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

A recarga artificial é desenvolvida objetivando uma série de resultados, dentre os quais destacam-se: aumento das reservas explotáveis dos aquíferos, regulação da temperatura e pH das águas, elevação dos níveis freáticos de aquíferos submetidos a sobre-exploração, maximização da função reservatório dos aquíferos, diminuição do fluxo superficial para minimizar impactos das águas pluviais nas drenagens receptoras entre vários outros.

De forma geral os projetos de recarga artificial tendem a trabalhar em meios porosos, contudo são também realizados em meios fraturados, geralmente recobertos por espessos mantos de intemperismo onde as condições locais favorecem a infiltração.

Para que um estudo visando a recarga seja bem sucedido é fundamental que o modelo hidrogeológico conceitual seja bem entendido, de forma que uma planta piloto seja desenvolvida e quantificada. Só a partir deste momento é que sistemas em maior escala devem ser

implementados. Em geral uma modelação matemática deve ser realizado para que os modelos e preceitos sejam confirmados.

8. QUAIS FORAM AS PRINCIPAIS AÇÕES RELATIVAS AO PROJETO DE PROTEÇÃO DAS ÁGUAS QUENTES?

Para a viabilização da proteção do aquífero termal de Caldas Novas - GO foi necessária a aplicação de uma série de passos metodológicos, que em seu conjunto culminará com a proposição e implantação de projetos pilotos e seu monitoramento. Os estudos incluíram as seguintes ações:

- ✓ Estudo tectônico do aquífero termal baseado em métodos geológicos e geofísicos. O banco de dados dos poços existentes foi uma ferramenta adicional fundamental;
- ✓ Estudo da qualidade e da necessidade de tratamento das águas que serão utilizadas na recarga artificial (principalmente para a propostas de injeção direta);
- ✓ Integração das informações do meio físico, incluindo geologia, modelos hidrogeológicos, geomorfologia, solos, como banco de dados básico para as propostas de recarga artificial;
- ✓ Desenvolvimento de ensaios de infiltração *in situ* na zona vadosa do aquífero;
- ✓ Realização de ensaios hidráulicos em poços profundos, para viabilização dos mecanismos de recarga artificial direta;
- ✓ Estudo analítico da oscilação do nível da água subterrânea do aquífero termal em cada poço em sua relação com a vazão;
- ✓ Estudo da composição química da água subterrânea em um número significativo de poços para avaliar a relação entre os poços e a possível correspondência entre eles;
- ✓ Estudo com traçador para determinar uma possível correspondência entre os poços de captação e poços abandonados para reconhecer os principais sistemas de fraturas com fluxo de água termal;
- ✓ Instalação e monitoramento de um sistema de recarga artificial piloto, no Sistema Aquífero Freático (que foi desenvolvido em solos espessos da região) (Fig. 3);
- ✓ Instalação e monitoramento de um sistema de recarga artificial piloto, no Sistema Aquífero Araxá (que foi desenvolvido na Pousada do Ipê) (Fig. 4);
- ✓ Elaboração de um modelo conceitual e de um modelo numérico para a realização da recarga em poços mais profundos;
- ✓ Caracterização de possíveis impactos negativos da operação do sistema, incluindo os aspectos ambientais e
- ✓ Avaliação da eficiência dos sistemas propostos por meio de estudos de balanço hídrico e pelo monitoramento sistemático da evolução dos níveis d'água no sistema fraturado termal.



Figura 3 - Sistema de Recarga Artificial Piloto, em aquífero freático no clube Bica Pau.

9. É POSSÍVEL AFIRMAR QUE O PROCESSO DE RECARGA ARTIFICIAL É TECNICAMENTE VIÁVEL?

Com os resultados até então obtidos pode-se afirmar que a recarga artificial é viável tecnicamente. Testes hidráulicos realizados em vários poços mostraram que nas zonas mais intensamente fraturadas, é possível infiltrar de forma passiva cerca de 10 l/s ou 36.000 l/h, no Sistema Aquífero Araxá.

A infiltração passiva é importante, pois não há demanda de energia elétrica para bombear a água em direção as zonas profundas do aquífero.

Assim, é possível afirmar que o processo é viável não apenas de forma técnica, mas também do ponto de vista econômico.

10. EXISTE RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A PARTIR DO PROCESSO DE RECARGA ARTIFICIAL DOS AQUÍFEROS?

Como o projeto está estruturado não há qualquer risco de contaminação, uma vez que a água que será injetada deverá apresentar qualidade igual ou superior à água do aquífero. Uma Estação de Tratamento Simplificada - ETS para que a água que circula nas piscinas tenha a qualidade equivalente ou, melhor, que a água subterrânea bombeada para as piscinas.

A ETS é composta por quatro sistemas de purificação:

- Filtragem primária com filtro físico composto por seixos (para eliminação de particulados grossos);
- Sistemas de aeração, composto por aeradores na tubulação, e por um cilindro em que a água fica retida e submetida a injeção de ar atmosférico;
- Filtragem secundária de forma a eliminar todos os componentes particulados. O filtro deverá ser pressurizado e funcionar de forma invertida, isto é, a água é bombeada a partir da base do filtro e é recuperada pela porção superior. O filtro é preenchido por areia quartzosas com diferentes granulometrias, com intercalações de camadas de zeólita e carvão ativado.

- A última fase do tratamento a água passa por uma lâmpada de ultravioleta para eliminação de qualquer contaminante bacteriológico (como vírus ou bactérias). Esta fase é bastante efetiva, pois a água apresenta-se com excelente transparência.

O tratamento simplificado é suficiente, uma vez que as análises realizadas em diferentes épocas do ano, em distintas horas do dia e com diferentes frequências de turistas, mostram que as águas apresentam boa qualidade.

11. O PROCESSO DE RECARGA PROPOSTO PODE CAUSAR O RESFRIAMENTO DA ÁGUA TERMAL?

Não. Estudos de modelagem termodinâmica e de fluxo estão em progresso e deverão dar uma resposta definitiva para esta questão. Os dados preliminares indicam que não deverá ter um efeito importante, pois o volume de água inserido do aquífero é muito pequeno com relação ao reservatório e as águas de recarga não são totalmente frias, pois mesmo depois de circular nas piscinas as águas mantêm uma temperatura entre 28 e 32 °C.

12. QUAIS SÃO AS AÇÕES QUE DEVEM SER COLOCADAS EM PRÁTICA PARA A CONTINUIDADE DO PROJETO?

Depois de se avaliar a efetividade dos processos de recarga devem ser implantados de forma sistemática mais sistemas em locais previamente definidos e ser mantido o monitoramento mensal dos níveis, da qualidade e da temperatura da água.

Estima-se que devem ser instalados pelo menos 10 sistemas de recarga direta e pelo menos 50 pontos de recarga indireta. Esta iniciativa deverá compensar em 20% a captação atual, o que deverá estabilizar os níveis se mantidos as vazões atuais de bombeamento.

Ações de divulgação dos projetos na forma de cartilhas, textos ilustrados, *banners* e demais mídias devem ser desenvolvidas para que a população tenha maior consciência da raridade da ocorrência das águas termais da região de Caldas Novas e Rio Quente.

Esta ação deve ser acoplada às iniciativas formais e informais de educação ambiental e estar vinculada à gestão integrada e sustentável dos aquíferos das regiões de Caldas Novas e Rio Quente.



Figura 4 - Estação de Tratamento Simplificada - ETS.