

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

NATÁLIA ZANETTI

ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO
LIVRE NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO/SP

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Acácio Monteiro dos Santos

Rio Claro (SP)

2012

551.49 Zanetti, Natália
Z28e Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município
de Rio Claro/SP / Natália Zanetti. - Rio Claro : [s.n.], 2012
110 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Biociências de Rio Claro
Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga
Co-Orientador: Fernando Acácio Monteiro dos Santos

1. Águas subterrâneas. 2. Vulnerabilidade de aquíferos. 4. GOD. 5.
DRASTIC. 6. Problema inverso. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

NATÁLIA ZANETTI

ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO
LIVRE NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO/SP

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências.

Comissão Examinadora

Antonio Celso de Oliveira Braga

Cesar Augusto Moreira

José Luiz Albuquerque Filho

Rio Claro, SP 28 de junho de 2012

À minha família:

Albertina e Roberto,
Rafael Z. e Rafael D.

Agradecimentos

Sempre a Deus pelo amor e vida que me permite desfrutar...

Aos meus pais Albertina e Roberto e ao meu irmão Rafael, pacientes, compreensivos e nobres ao entenderem meus motivos pra avançar em cada direção.

Ao Rafael Daros, companheiro, confidente, amigo e amor que a vida me deu de presente. E à sua família também companheira.

Ao Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga pelos ensinamentos, amizade, oportunidades e confiança que depositou em mim.

Ao Prof. Dr. Fernando Acácio Monteiro dos Santos, grande pesquisador que me abriu as portas da Universidade de Lisboa e me confiou seus conhecimentos, ideias e tempo de trabalho.

Ao Dr. José Luiz Albuquerque Filho pelos preciosos conselhos, auxílios, disposição e amizade.

Ao Prof. Dr. Alexandre Perinotto pelo grande apoio ao intercâmbio, não poupando esforços e me abrindo caminhos para o enriquecimento da pesquisa.

À Pró-Reitora de Pós-Graduação, Dra Marilza Vieira Cunha Rudge, ao Programa de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente e à Unesp pela confiança e apoio financeiro sem o qual não seria possível o grande enriquecimento deste trabalho.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a execução deste trabalho, especialmente à Rosângela, Elias Hideo Teramoto e Dagmar Carnier Neto.

Aos meus grandes amigos de sempre Mônica, Natália, Robson, Itajubá, Salsa, Camila, Malu, Cris, Michelle e à nova Aline.

Ao DAEE pelo apoio e incentivo, desde a presença nas aulas até a execução do trabalho.

*“A Terra pode oferecer o suficiente
para satisfazer as necessidades de todos os homens,
mas não a ganância de todos os homens.”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

A estimativa da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos é de extrema importância como ferramenta de gestão da qualidade e quantidade das águas nas cidades. O município de Rio Claro/SP possui boa parte de seu território sobre a Formação Rio Claro, que se assenta sobre a Formação Corumbataí e apresenta solo e litofácies arenosas intercalados por camadas de conglomerados e sedimentos argilosos. Este trabalho objetivou elaborar mapas de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, por meio da aplicação dos métodos GOD de Foster & Hirata (1988), e DRASTIC de Aller *et al.* (1987) voltados para o aquífero livre de Rio Claro. O objetivo foi determinar a vulnerabilidade natural do aquífero a partir de informações como grau de confinamento, litologia dos estratos acima da zona saturada, profundidade do nível d'água, recarga e material do aquífero, topografia, tipo de solos e condutividade hidráulica. Dados secundários resultantes de ensaios geofísicos que utilizaram a técnica da sondagem elétrica vertical permitiram a caracterização da litologia da Formação Rio Claro, além de estimar a condutividade hidráulica da região a partir da equação de Kozeny–Carman–Bear dada por Domenico e Schwartz (1990). O mapa de vulnerabilidade obtido pela aplicação do método GOD demonstra que a área de estudo é altamente vulnerável, informação correspondente a estudos realizados em menor escala. Com o uso do método DRASTIC, a maior parte da área é classificada como de baixa e moderada vulnerabilidade, entretanto, com a normalização das escalas, o resultado foi similar ao obtido com a aplicação do método GOD. Na disponibilidade de dados, indica-se o método DRASTIC, porém a análise preliminar resultante da aplicação do método GOD oferece bons resultados, observada a margem de erro. Análises qualitativas podem demonstrar resultados genéricos e, dessa forma se faz necessário quantificar a vulnerabilidade. Para isto, utilizou-se o método de resolução do problema inverso Simulated Annealing para obter a condutividade hidráulica (k) local a partir do monitoramento do nível freático, que determinou k da ordem de 10^{-5} m/s para uma área do campus da Unesp - Rio Claro. O monitoramento temporal do nível freático é de extrema importância para estudos de vulnerabilidade, pois fornece uma avaliação quantitativa e possibilita a produção de dados confiáveis de condutividade hidráulica, cuja comparação com resultados preexistentes possibilitam a avaliação direta da vulnerabilidade de um aquífero.

Palavras-chave: água subterrânea; mapeamento; vulnerabilidade; GOD; DRASTIC; problema inverso.

ABSTRACT

The evaluation of intrinsic vulnerability of aquifers is extremely important as a management tool for quality and quantity of water in the cities. The city of Rio Claro/SP, has much of its territory on Rio Claro Formation, which is based on Corumbataí Formation and presents thick sandy soil and sandy lithofacies with intercalated layers of conglomerates and clay sediments. This work aims to produce maps of vulnerability to contamination of water through the application of the methods GOD Foster & Hirata (1988), and DRASTIC of Aller *et al.* (1987) adapted to the unconfined aquifer in the Rio Claro. The objective was determine the intrinsic vulnerability of the aquifer from information such as degree of confinement of groundwater, unsaturated zone lithology, depth of the groundwater level, recharge and aquifer material, topography, soil type and hydraulic conductivity. Secondary data resulting from trials that used resistivity method and vertical electrical sounding technique also allowed the characterization of the lithology of the Rio Claro Formation, and the estimation of hydraulic conductivity in the region from the use of the equation of Kozeny-Carman-Bear given by Domenico and Schwartz (1990). The vulnerability map obtained by GOD methodology demonstrates that the area of the unconfined aquifer in Rio Claro is highly vulnerable, information relevant to studies on a smaller scale. Using the method DRASTIC, the map classified as most of the area of low and moderate vulnerability, however with the normalization of scales, the result was similar to that of GOD. In data availability, it is indicated DRASTIC method, but the preliminary results of GOD method provides good results, observed the error rate. Qualitative analysis can become superficial, and it is necessary to quantify the vulnerability. For this, we used the methodology of solving the inverse problem Simulated Annealing for the hydraulic conductivity (k) monitoring location from the water table aquifer, which determined k of the order of 10^{-5} m/s for an area located on the campus of UNESP - Rio Claro. The temporal monitoring of the water table is extremely important for vulnerability studies, because it provides a quantitative assessment and enables the production of reliable data on hydraulic conductivity, whose comparison with preexisting results allow the direct evaluation of the aquifer vulnerability.

Key-words: groundwater; map; vulnerability; GOD; DRASTIC; inverse problem.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO SOLO.	18
FIGURA 2 - TIPOS DE AQUÍFEROS QUANTO À POROSIDADE.	20
FIGURA 3 - TIPOS DE AQUÍFEROS QUANTO À PRESSÃO.	21
FIGURA 4 - COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO.	25
FIGURA 5 - RELAÇÃO RESISTIVIDADE E RESISTÊNCIA.	28
FIGURA 6 - ARRANJO SCHLUMBERGER – SEV.	29
FIGURA 7 - SEÇÃO GEOELÉTRICA.	30
FIGURA 8 - RELAÇÃO CONDUTÂNCIA LONGITUDINAL UNITÁRIA E PROTEÇÃO NATURAL DO AQUÍFERO.	32
FIGURA 9 - SISTEMA GOD PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO.	37
FIGURA 10 - VOLUME DE CONTROLE DO SOLO.	44
FIGURA 11 - PROBABILIDADE DE ACEITAÇÃO DE MUDANÇA DO ESTADO CORRENTE (PROBLEMA DE MINIMIZAÇÃO).	47
FIGURA 12 - MÉDIAS MENSIS DE CHUVA (EM MM) – PERÍODO DE 2000 A 2011.	50
FIGURA 13 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO CORUMBATAÍ NO ESTADO DE SÃO PAULO.	51
FIGURA 14 - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORUMBATAÍ COM DESTAQUE PARA A ÁREA URBANA DE RIO CLARO.	52
FIGURA 15 - MAPA GEOLÓGICO DA BACIA DO RIO CORUMBATAÍ 54	54
FIGURA 16 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ALTA VULNERABILIDADE NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO.	55
FIGURA 17 - FAIXAS DE VARIAÇÕES NOS VALORES DE RESISTIVIDADE – SOLOS/SEDIMENTOS E ROCHAS.	56
FIGURA 18 - CURVA DE PERMANÊNCIA PARA A BACIA DO RIO CORUMBATAÍ.	60
FIGURA 19 - GRÁFICOS GERADOS A PARTIR DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROBLEMA DIRETO (MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS) APÓS A PRECIPITAÇÃO DE 01 A 03 DE AGOSTO DE 2002 NO POÇO IGCE-3.	66
FIGURA 20 - SATURAÇÃO X PROFUNDIDADE (TEMPO = 3600 HORAS).	67
FIGURA 21 - RELAÇÃO ENTRE PLUVIOSIDADE E COLUNA D'ÁGUA PARA OS POÇOS IGCE-3 E IGCE-6.	70
FIGURA 22 - MAPAS DE COMPARAÇÃO ENTRE K MEDIDO E K CALCULADO PARA O AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO.	73
FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO PARÂMETRO D DO MÉTODO GOD PARA O AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO.	75
FIGURA 24 - MAPA DE VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GOD.	76
FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ÍNDICES DRASTIC DO PARÂMETRO D PARA O AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO.	77
FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ÍNDICES DRASTIC DO PARÂMETRO T PARA O AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO.	78
FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ÍNDICES DRASTIC DO PARÂMETRO C PARA O AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO.	78
FIGURA 28 - MAPA DE VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC.	79
FIGURA 29 - MAPA DRASTIC NORMALIZADO.	80
FIGURA 30. MAPAS DE VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO LIVRE NA FORMAÇÃO RIO CLARO RESULTANTES DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GOD E DRASTIC.	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - POROSIDADE TOTAL EM SEDIMENTOS E ROCHAS SEDIMENTARES.	24
TABELA 2 - DEFINIÇÃO PRÁTICA DAS CLASSES DE VULNERABILIDADE DOS AQUIFEROS.	37
TABELA 3 - PESOS ATRIBUÍDOS AOS PARÂMETROS DRASTIC.	41
TABELA 4 - INTERPRETAÇÃO DOS ÍNDICES FINAIS DE VULNERABILIDADE OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC.	42
TABELA 5 - VARIÁVEIS ADOTADAS NA APLICAÇÃO DO MODELO DE DIFERENÇAS FINITAS PARA A VALIDAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO NO AQUIFERO LIVRE.	65
TABELA 6 - VARIÁVEIS ADOTADAS NA APLICAÇÃO DO MODELO DE MINIMIZAÇÃO GLOBAL SA PARA A VALIDAÇÃO.	68
TABELA 7 - DADOS DE ENTRADA UTILIZADOS NO MÉTODO DO PROBLEMA INVERSO PARA CÁLCULO DA TAXA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NO AQUIFERO LIVRE.	71
TABELA 8 - PARÂMETROS HIDROLÓGICOS CALCULADOS (EQUAÇÃO DE KOZENY-CARMAN-BEAR).	74
TABELA 9 - DADOS DE SAÍDA GERADOS PELO PROGRAMA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO.	82

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	13
1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	13
1.2. RELEVÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	15
1.3. OBJETIVOS	16
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. HIDROGEOLOGIA – CONCEITOS BÁSICOS	17
2.1.1. Ocorrência e Circulação das Águas Subterrâneas	17
2.1.2. Tipos de Aquíferos	19
2.1.3. Características Intrínsecas dos Aquíferos	21
2.1.3.1. Velocidade de Darcy e Condutividade Hidráulica	21
2.1.3.2. Porosidade	23
2.1.3.3. Coeficiente de Armazenamento	24
2.1.3.4. Coeficiente de Transmissividade	25
2.2. GEOFÍSICA	26
2.2.1. Método da Eletrorresistividade	27
2.2.1.1. Parâmetros Dar Zarrouk	29
2.2.2. Estimativa de Parâmetros Hidrológicos por intermédio de Métodos Geofísicos	32
2.3. VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS	35
2.3.1. Método GOD	36
2.3.2. Método DRASTIC	38
2.3.3. Modelação Matemática	42
2.3.3.1. Método das Diferenças Finitas	42
2.3.3.2. Problema Inverso	45
2.3.3.2.1. <i>Simulated Annealing</i>	46
CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO	49
3.1. LOCALIZAÇÃO	49
3.2. CLIMA	49
3.3. HIDROGRAFIA	50

3.4. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	52
3.5. ÁREAS DE ALTA VULNERABILIDADE	55
CAPÍTULO 4 – MATERIAL E APLICAÇÃO DOS MÉTODOS	56
4.1. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS	56
4.2. MÉTODO GOD.....	57
4.3. MÉTODO DRASTIC.....	58
4.4. MODELO DE INFILTRAÇÃO.....	63
4.4.1. Problema direto	63
4.4.2. Problema Inverso	66
4.4.2.1. Validação.....	66
4.4.2.2. Aplicação Prática.....	69
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1. PARÂMETROS HIDROLÓGICOS	72
5.2. MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD	75
5.3. MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC.....	76
5.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DRASTIC E GOD.....	80
5.5. MODELO DE INFILTRAÇÃO.....	82
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES	84
CAPÍTULO 7 – BIBLIOGRAFIAS REFERENCIADAS E CONSULTADAS	86
ANEXO A – Localização das SEV's selecionadas para o cálculo de K.....	94
ANEXO B - Monitoramento de Coluna d'Água e Pluviometria.....	95

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A escassez de pesquisas relacionadas ao entendimento da dinâmica do meio físico em escalas adequadas dificulta as tomadas de decisão do poder público municipal frente aos problemas geoambientais. Nesse contexto, os mapas de vulnerabilidade são ferramentas que possibilitam a adoção de medidas preventivas no subsídio do planejamento de uso e ocupação do solo na medida em que definem áreas de maior ou menor sensibilidade dos recursos hidrológicos aos impactos antrópicos.

Os Planos Diretores Municipais, estabelecidos pelo Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), devem ser a base para o planejamento do município, a fim de articular políticas públicas existentes e direcionar o desenvolvimento local. O Plano Diretor tem por objetivo realizar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, bem como o uso socialmente justo e ecologicamente equilibrado de seu território, de forma a assegurar o bem estar de seus habitantes (RIO CLARO, 2008).

Em nível federal, a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA (BRASIL, 1981)- objetiva a “preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade humana” e como um dos seus instrumentos, trata do zoneamento ambiental. Esse zoneamento deve tratar integradamente os fatores ambientais que destacam as características do meio, as vocações e as fragilidades, nos seus diferentes aspectos: físicos, biológicos e antrópicos. Deve prever as limitações do meio, preocupando-se essencialmente com este, e não com o empreendimento em si (SILVA, 2003).

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a fim de criar um instrumento legal no estabelecimento de diretrizes e critérios a serem adotados para planejamento, implantação e operação da Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas, publica a Resolução nº 107, em 13 de abril de 2010 (CNRH, 2010).

Existem na bibliografia alguns estudos em pequenas escalas, como o denominado “Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo”, elaborado pelo IG, CETESB e DAEE (1997). Com base nesse trabalho, a Resolução da Secretaria do Meio Ambiente, SMA 014 de 05 de março de 2010, define diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas

para a utilização de água subterrânea, definindo áreas de alta vulnerabilidade no Estado de São Paulo (SMA, 2010).

As características naturais do solo e rochas de determinada região, associadas ao seu uso e ocupação, são indícios significativos para a indicação de possíveis ocorrências de contaminação das águas subterrâneas, uma vez que fatores naturais, como espessura, formação geológica, granulometria e estruturas, determinam sua fragilidade a partir de suas características de permeabilidade e capacidade de retenção e filtração de possíveis cargas contaminantes no solo (ESCADA, 2009).

Os principais condicionantes de contaminação dos aquíferos em meios urbanos são representados pelo processo natural de precipitação e infiltração. Deve-se evitar que sejam construídos aterros sanitários em áreas de recarga e procurar escolher áreas com baixa permeabilidade. Os efeitos da contaminação nas águas subterrâneas devem ser examinados quando da escolha do local do aterro (TUCCI, 1997).

A fim de avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos da Formação Rio Claro, no município de Rio Claro (SP), este trabalho pesquisou e aplicou dois métodos amplamente utilizados no Brasil. O primeiro, desenvolvido por Foster & Hirata (1988) considera como risco o resultado da interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero à poluição e a carga antrópica potencial poluidora. Este método foi utilizado pelo Instituto Geológico (IG), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (antiga Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB) e Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) no *Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo* em 1997.

O segundo método, proposto por Aller et al. (1987) é denominado DRASTIC. O índice de vulnerabilidade obtido corresponde ao somatório ponderado de sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos, que procura sistematizar a determinação do potencial do poluente em alcançar a zona saturada. Esse índice corresponde a uma análise mais detalhada do que o método anterior, por acrescentar parâmetros em sua avaliação.

No município de Rio Claro ainda não foi efetuada uma avaliação do grau de vulnerabilidade para a água subterrânea. Assim, a presente pesquisa vem contribuir para a conservação dos recursos hídricos subterrâneos no município.

Segundo Oliva (2002), no município a exploração de águas subterrâneas tem sido realizada no Subgrupo Itararé que, na região encontra-se relativamente profundo (de 200 a 500 metros) e caracterizado pela baixa produtividade. O incremento da demanda para o abastecimento doméstico, industrial e agropecuário na região levou à utilização de água

subterrânea extraída da Formação Rio Claro, que se assenta sobre a Formação Corumbataí e é o foco deste trabalho.

Para a realização da presente pesquisa, dados geológicos, hidrológicos, e meteorológicos foram analisados e integrados a fim de se obter o mapa temático de interesse. A base de dados hidrogeológicos utilizada na aplicação dos métodos foi coletada em trabalhos e artigos científicos pertinentes.

1.2. RELEVÂNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A fim de subsidiar o planejamento adequado do uso e a ocupação do solo nas cidades, bem como da utilização dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos, é importante conhecer as condições regionais de sensibilidade ambiental. Assim, prever possíveis áreas mais sensíveis à contaminação é tarefa de grande valia, já que permite o direcionamento de recursos financeiros e tempo na priorização das investigações em áreas mais frágeis.

O reconhecimento de que as águas subterrâneas constituem uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público, despertou uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos porque envolve os seguintes aspectos (FOSTER *et al.*, 2002):

- O aumento e a diversificação de produtos químicos, potencialmente poluidores da água subterrânea;
- O lançamento *in natura*, em rios e fossas, de esgotos e efluentes industriais, em larga escala;
- O grande aumento de aplicações de fertilizantes e pesticidas na agricultura;
- Os efeitos potencialmente nocivos à saúde, causados por baixas concentrações de poluidores persistentes e de toxicologia pouco conhecida;
- A dificuldade e a impraticabilidade de remover poluentes em fontes pontuais de captação (poços); e
- O fato de que a reabilitação de um aquífero poluído requer custos muito elevados, a ponto de, muitas vezes, implicar o simples abandono da área de captação.

A qualidade das águas subterrâneas assim como das superficiais, é reflexo não apenas dos processos naturais, como também das formas de apropriação e exploração do espaço. É comum encontrar centros urbanos e/ou industriais locados em margens ou nas proximidades de rios que dizem respeito à fonte de abastecimento de água e de deposição de rejeitos.

A partir desse contexto, verifica-se a necessidade da gestão da qualidade das águas subterrâneas, que se torna viável a partir do conhecimento das propriedades hidrogeológicas da região, integradas a estudos de uso e ocupação do solo.

Um dos maiores desafios é diminuir os efeitos da carência e poluição da água, para tal devem ser realizadas “ações preventivas, a fim de evitar contaminações futuras, e ações corretivas, com o fim de controlar as ameaças de poluição representadas por atos passados e atuais” (FOSTER *et al.*, 2002).

1.3. OBJETIVOS

Objetivo Geral

- Estabelecer instrumentos de gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, na forma de mapeamentos da vulnerabilidade à contaminação do aquífero livre ocorrente no município de Rio Claro (SP).

Objetivos Específicos

- Reunir dados hidrogeológicos, geológicos, climáticos e de uso e ocupação do solo no domínio da Formação Rio Claro;
- Avaliar a aplicabilidade da geofísica na geração de dados pertinentes em estudos de vulnerabilidade;
- Tratar, através de um modelo de infiltração, os dados hidrológicos disponíveis e calculados a fim de prever quantitativamente o comportamento local de contaminantes;
- Comparar os resultados obtidos pelas metodologias GOD e DRASTIC.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HIDROGEOLOGIA – CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1. Ocorrência e Circulação das Águas Subterrâneas

Quase toda a água subterrânea existente na Terra tem origem no ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna por processos superficiais e subterrâneos aos oceanos (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997).

A distribuição das águas superficiais e subterrâneas é muito variável, visto que elas se inter-relacionam no ciclo hidrológico e dependem das condições climatológicas (temperatura do ar, ventos, umidade e insolação), gravidade e cobertura vegetal.

A água subterrânea está em constante circulação e flui, de modo geral, lentamente, através dos espaços vazios, denominados poros das rochas - em alguns tipos de rocha, a água circula através de fraturas, que são superfícies de ruptura. Um dos parâmetros que promovem o fluxo da água subterrânea é a permeabilidade. Essa propriedade indica a facilidade com que a água flui através da rocha e está relacionada com o tamanho e o volume de poros interconectados (transmitindo fluxo), a forma, a distribuição e a variação do tamanho dos grãos. Quanto mais homogêneos o tamanho e a distribuição dos grãos, maior é a interconexão entre poros e a capacidade do aquífero em transmitir água (IRITANI & EZAKI, 2008).

A parte mais superficial do terreno, segundo Bear (1975) pode ser dividida verticalmente em zonas dependendo da proporção relativa de espaço dos poros ocupado por água: uma zona de saturação na qual os poros são completamente preenchidos com água, e uma camada sobreposta chamada de zona de aeração ou não saturada, onde os poros contêm gases (principalmente ar e vapor de água) e água (figura 1).

Os níveis d'água nos poços que penetram um aquífero freático sob condições de fluxo horizontal serão iguais ao nível do lençol freático em torno desses poços. Quando esses níveis são unidos, fica definido um plano, chamado lençol freático ou superfície potenciométrica. Essa superfície móvel descreve não somente o potencial total da água, mas é literalmente o contorno físico do lençol freático (CLEARY, 2011).

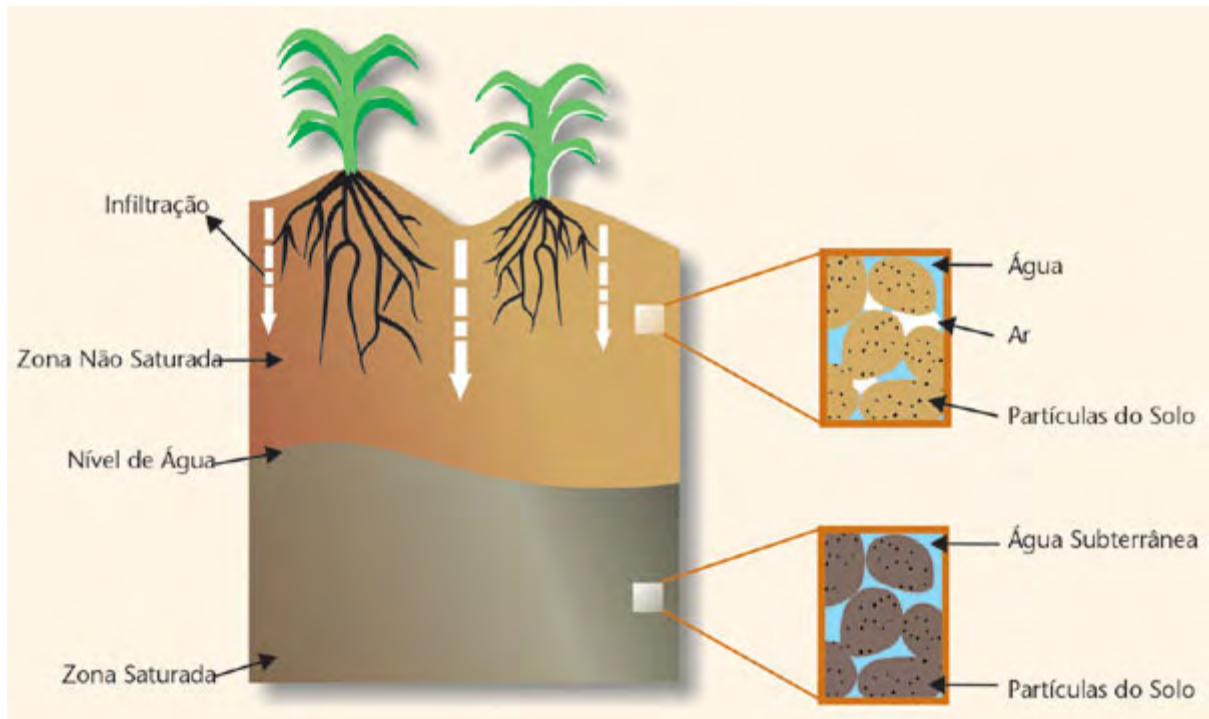


Figura 1 - Distribuição da água no solo.
Fonte: LNEG (2001).

A água subterrânea move-se muito lentamente em comparação com a água superficial. Segundo Cleary (2007) uma alta velocidade de água subterrânea estaria na faixa de 1 metro por dia enquanto um rio rápido pode mover-se a uma velocidade de 1 metro por segundo. O autor destaca ainda que os altos tempos de residência para a água subterrânea (segundo Lvovitch (1970) o tempo médio da água subterrânea no subsolo é de 280 anos) significam que as taxas de recarga anual são muito pequenas, o que juntamente com o enorme volume de poros nos aquíferos torna esta uma reserva confiável a longo prazo, efetivamente imune às flutuações anuais de precipitação.

Em contrapartida, existe a dificuldade de recuperar ou despoluir um aquífero uma vez que tenha sido contaminado. Sua recuperação pode levar séculos até que ocorra a descontaminação por mecanismos naturais.

Dentre as fases do ciclo hidrológico, Tucci e Beltrame (2000) citam a infiltração como uma das etapas mais importantes, uma vez que é responsável pela recarga de aquíferos e influencia diretamente o escoamento superficial e, conseqüentemente a erosão hídrica.

A água proveniente das precipitações, depois de haver sofrido perdas por evapotranspiração e absorção pela superfície vegetal, chega à superfície do solo, onde há separação em duas frações: o escoamento em superfície e a infiltração (CASTANY, 1971).

O termo infiltração pode ser definido como sendo o fluxo em subsuperfície que atravessa a zona de aeração em direção ao nível freático, o qual delimita a porção extrema superior da zona saturada do solo (Horton, 1933).

A infiltração pode ser influenciada pelas propriedades do solo, características das chuvas ou quantidade de água aplicada, tipos de cobertura vegetal, uso e manejo do solo, características das encostas, microtopografia da superfície do terreno, condutividade total da umidade nos horizontes inferiores e quantidade d'água que o perfil reterá na sua capacidade de campo (BUCKMAN; BRADY, 1968; GUERRA, 1999 apud BARBOSA, 2010).

Os métodos de medição da infiltração podem ser classificados em diretos e indiretos. Os métodos diretos permitem avaliar a quantidade de água infiltrada em uma superfície de solo determinada. Já nos indiretos, a infiltração é calculada por dedução, uma vez conhecidos os outros elementos hidrológicos do balanço hídrico (precipitação, escoamento e evapotranspiração) (Castany, 1971).

2.1.2. Tipos de Aquíferos

Aquífero é uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997).

Os aquíferos podem ser classificados de acordo com dois fatores: pressão das águas nas suas superfícies limítrofes e segundo sua porosidade.

A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras) é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua qualidade como reservatório (ABAS, 2012).

Quanto à porosidade, os aquíferos se classificam em 3 tipos (BORGHETTI *et al.*, 2004), conforme ilustração da figura 2:

- Poroso - formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se faz nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Ocorrem em bacias sedimentares e várzeas, onde ocorre acúmulo de sedimentos arenosos. A distribuição homogênea dos grãos permite o fluxo de fluidos em todas as direções, permitindo que a água flua para qualquer direção, tão somente em função dos diferenciais de pressão hidrostática existente (isotropia);

- Fissural - formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas e duras, onde a circulação da água ocorre em fraturas, fendas e falhas, abertas devido ao movimento tectônico e intemperismo. A capacidade de acumulação está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. Nesses aquíferos, a água flui onde há fraturas, que tendem a ter orientações isotrópicas condicionadas a direções preferenciais; e
- Cárstico - formado em rochas calcárias ou carbonáticas, onde a circulação da água ocorre em fraturas e outras discontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras (pH elevado), com fluxo em canais.

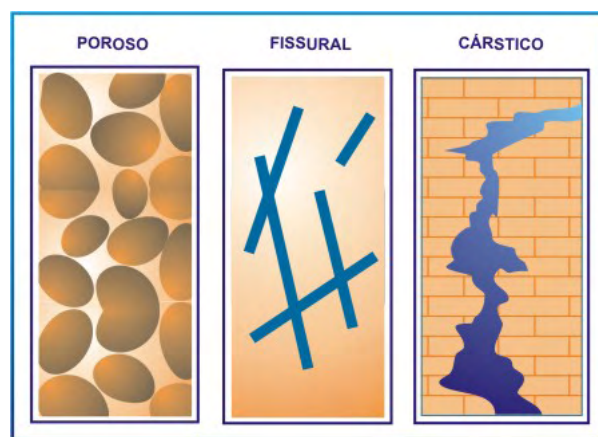


Figura 2 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.
Fonte: Borghetti *et al.* (2004).

Segundo a pressão das águas nas superfícies limítrofes os aquíferos são classificados em dois tipos (BORGHETTI *et al.*, 2004) (Figura 3):

- Livre ou Freático – na maioria das vezes constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A porção superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica. Os aquíferos livres são classificados ainda em drenantes (ou de base semipermeável) e não drenantes (ou de base impermeável) (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997);
- Confinado ou artesianos - constituído por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele

ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. O seu reabastecimento ou recarga, através das chuvas, ocorre preferencialmente em locais onde a Formação aflora à superfície. Nesses aquíferos, a água está sob pressão, podendo causar artesianismo nos poços que captam suas águas. Os aquíferos confinados têm a chamada recarga indireta e quase sempre estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas (bacias sedimentares). Esse tipo de aquífero pode ainda ser classificado como drenante (pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável) e não drenante (ambas as camadas limítrofes são impermeáveis).

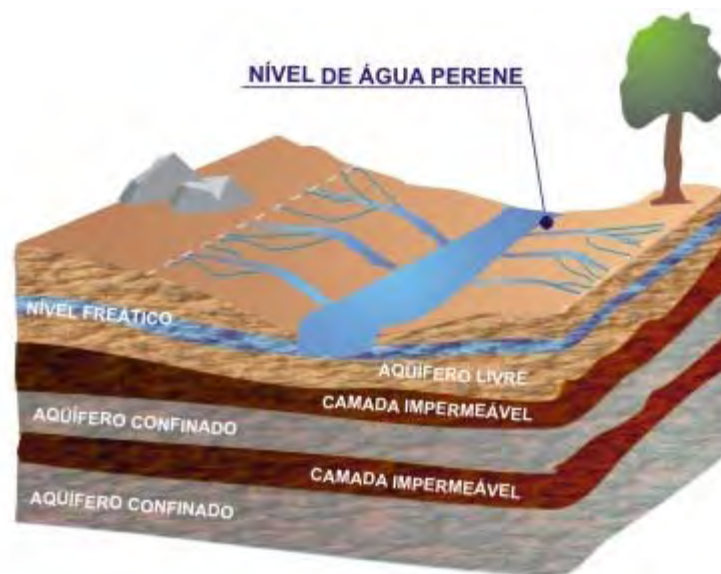


Figura 3 - Tipos de aquíferos quanto à pressão.
Fonte: Borghetti *et al.* (2004).

2.1.3. Características Intrínsecas dos Aquíferos

2.1.3.1. Velocidade de Darcy e Condutividade Hidráulica

O principal fator que determina a disponibilidade de água subterrânea nos aquíferos é a capacidade em permitir o fluxo de água através dos poros. Esta propriedade dos materiais conduzem água é chamada de permeabilidade, que depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (CABRAL, 2008).

A velocidade de Darcy (q), também chamada de velocidade aparente ou descarga específica pode ser definida como a vazão (Q) por unidade de área (A) como mostra a equação 1:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Onde:

q = Velocidade de Darcy;

Q = vazão;

A = área total.

Entretanto, esse parâmetro (q), mesmo tendo unidade de velocidade (LT^{-1}), não representa a velocidade real do fluxo, já que a seção considerada (A) representa a área total, ou seja, a área correspondente aos vazios e à parte sólida. A área da seção transversal do escoamento pelos poros é bem menor que a área da seção do aquífero, e pode ser obtida pela multiplicação da área pela porosidade efetiva de fluxo, e assim obter a verdadeira velocidade de escoamento pelos poros por (equação 2):

$$V = \frac{Q}{\eta_{ef} A} \quad (2)$$

Onde:

V = velocidade real do fluxo;

Q = vazão;

η_{ef} = porosidade efetiva;

A = área da seção transversal do escoamento.

No cálculo da vazão de um aquífero é utilizada a velocidade aparente e a área total. No entanto, é importante destacar que para o cálculo do transporte advectivo de poluentes, deve ser utilizada a velocidade real.

O fluxo d'água através dos poros é usualmente assumido como laminar. Quando o fluxo d'água atravessa os poros de um solo saturado, ocorre perda de energia devido à trajetória do fluxo. A lei de Darcy estabelece a relação entre velocidade de fluxo (v) e a perda de carga (Δh) sobre a distância (l), em fluxo laminar. Esta lei pode ser escrita da seguinte forma (equação 3):

$$V = k \frac{\Delta h}{l} = k \cdot i \quad (3)$$

Onde:

K = coeficiente de condutividade hidráulica;

$\Delta h/l$ = gradiente hidráulico (i).

O coeficiente de proporcionalidade K que aparece na lei de Darcy pode ser chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição, forma e arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica).

A condutividade hidráulica, que pode ser expressa em m/s ou cm/s, corresponde à velocidade de fluxo de fluidos em aquíferos sob a influência do gradiente de uma superfície potenciométrica.

A determinação de condutividade hidráulica por meio de análise granulométrica é aplicada com frequência em sedimentos inconsolidados, com resultados (OLIVA, 2002).

Os sedimentos da Formação Rio Claro não podem ser considerados totalmente inconsolidados, mas, por possuírem pouco cimento, fornecem excelentes resultados.

2.1.3.2. Porosidade

A porosidade de um solo ou rocha pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total (equação 4):

$$\eta = V_v / V_t \quad (4)$$

Onde:

η = porosidade;

V_v = volume de vazios;

V_t = volume total.

A porosidade depende do tamanho dos grãos, grau de arredondamento, seleção, dentre outros (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997). Se os grãos são de tamanho variado, a porosidade tende a ser menor do que no caso de grãos uniformes, porque os grãos pequenos ocupam os espaços vazios entre os maiores.

Um terreno muito poroso pode ser muito permeável caso os poros sejam grandes e bem interconectados, tal como sucede nas areias limpas, ou pode ser quase impermeável em poros pequenos e semi-fechados, como ocorre nas rochas ígneas e metamórficas (MIDOES & FERNANDES, 2001).

Argilitos e siltitos apresentam elevada porosidade (35-60%), porém baixa permeabilidade. Assim, apesar da grande capacidade de armazenamento, este tipo de formação rochosa não permite a extração de água em quantidade satisfatória (IRITANI & EZAKI, 2004).

Tabela 1 - Porosidade total em sedimentos e rochas sedimentares.

Sedimentos (*)	Diâmetro da Partícula (mm)	Porosidade total dos sedimentos (%)	Rochas Sedimentares (**)	Porosidade total das rochas (%)
Cascalho	>2,0	24 – 38	Arenito	5 – 30
Areia grossa	0,6 – 2,0	31 – 46	Siltito	21 – 41
Areia fina	0,06 – 0,2	26 – 53	Calcário/Dolomito	0 – 40
Silte	0,002 – 0,06	34 – 61	Calcário cárstico	0 – 40
Argila	< 0,002	34 – 60	Folhelho	0 - 10

Fontes:

(*)Domenico & Schwartz (1990)

(**)Fetter (1994)

2.1.3.3. Coeficiente de Armazenamento

Esta propriedade indica a relação entre a quantidade de água armazenada em um aquífero e a correspondente mudança na elevação da superfície piezométrica ou freática, no caso de aquíferos não confinados (BEAR, 1975).

O armazenamento específico de um aquífero saturado é definido como o volume de água liberado por um volume unitário do aquífero submetido a um decréscimo unitário de carga hidráulica (Figura 4). O coeficiente de armazenamento é adimensional e definido como (equação 5):

$$S = S_s \cdot b \quad (5)$$

Onde:

S = coeficiente de armazenamento;

S_s = armazenamento específico;

b = espessura do aquífero.

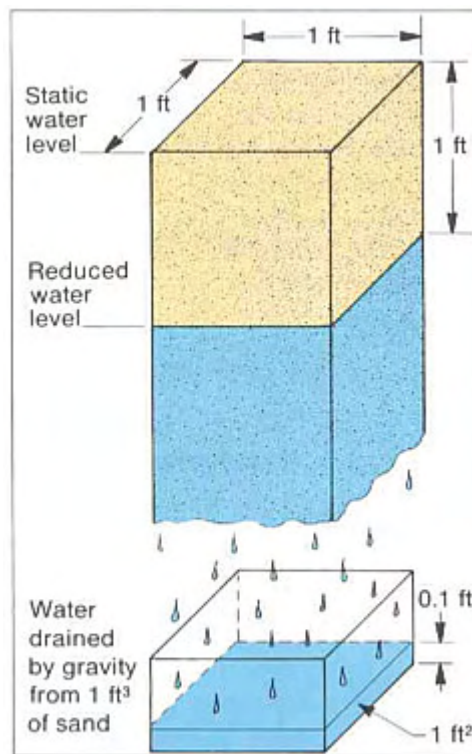


Figura 4 - Coeficiente de Armazenamento.
Fonte: Driscoll (1986).

2.1.3.4. Coeficiente de Transmissividade

O coeficiente de transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. É possível conceituá-la como a taxa de escoamento de água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário (CABRAL, 1997).

A transmissividade corresponde à capacidade do meio em transmitir água. Está diretamente relacionada à condutividade hidráulica e é principalmente usada quando a abordagem bidimensional hidráulica é válida. Para um aquífero confinado com espessura b , o coeficiente de transmissividade é definido como (equação 6):

$$T = K \cdot b \quad (6)$$

Onde:

T = transmissividade;

K = condutividade hidráulica;

b = espessura do aquífero.

Nos aquíferos freáticos, nos quais a espessura saturada varia com o tempo e conforme o trecho considerado no aquífero, T pode variar de acordo com a variação da carga hidráulica, tornando não linear a descrição matemática do problema. As unidades do coeficiente de transmissividade mais usadas são m^2/s e m^2/dia .

2.2. GEOFÍSICA

Os métodos geofísicos são um conjunto de técnicas de investigação de diferentes aspectos do meio ambiente subterrâneo por meio de medição, análise e interpretação dos campos físicos obtidos na própria superfície dos terrenos, o que os classifica como métodos não invasivos ou não destrutivos. Esta ciência é fundamental em vários campos de atuação, como na indústria do petróleo, no monitoramento e investigação ambiental e na construção civil.

Os principais métodos geofísicos utilizados em estudos ambientais são:

- Métodos Geoelétricos: eletrorresistividade, polarização induzida, eletromagnéticos e potencial espontâneo;
- Métodos Sísmicos: refração, reflexão, ensaios entre furos (tomografia), utilizados na superfície terrestre, e perfilagem sísmica contínua, sonografia e ecobatimetria; e
- Métodos Potenciais: magnetometria e gravimetria.

O fator determinante na escolha do método geofísico adequado a um estudo refere-se ao tipo de informação necessária para avaliação do problema. Ou seja, qual será o parâmetro obtido através da aplicação de determinado método e se este é o ideal para refletir as características do meio que são interessantes para a pesquisa.

A fim de auxiliar os estudos ambientais em uma etapa preliminar, é possível aplicar a uma determinada área, o método da eletrorresistividade utilizando a técnica da sondagem elétrica vertical, que apresenta como produtos principais (BRAGA, 2008):

- *Resistividade elétrica* dos materiais geológicos, que permite identificar as diferentes litologias e até obter uma correlação com a condutividade hidráulica (SHEVIN *et al.*, 2006) (MAZAC *et al.*, 1989);
- *O Parâmetro de Dar Zarrouk condutância longitudinal*, o qual permite estimar a proteção dos aquíferos frente a contaminantes (Braga, 2006); e
- *Profundidade do nível d'água*, com a confecção de mapas de fluxo subterrâneo, importantes para determinar o caminho preferencial das águas subterrâneas e de prováveis contaminantes (OLIVEIRA *et al.*, 2003).

2.2.1. Método da Eletrorresistividade

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletrorresistividade – ER, é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam fundamentalmente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas (BRAGA, 2006).

O método da eletrorresistividade corresponde a um método geofísico que emprega uma corrente artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos localizados nas proximidades do fluxo corrente (IAG/USP). As relações entre corrente elétrica, potencial elétrico e disposição geométrica dos eletrodos no terreno permitem calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície.

Os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico apresentam como uma de suas propriedades fundamentais o parâmetro físico resistividade elétrica, o qual reflete algumas de suas características servindo para caracterizar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação, etc., e até identificá-los litologicamente, sem necessidade de escavações físicas (BRAGA, 2008).

A Lei de Ohm define que a relação entre a resistividade e a resistência de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica ou prismática (Figura 5), é dada pela equação 7:

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (ohms)} \quad (7)$$

Onde:

R = resistência;

ρ = resistividade elétrica;

L = comprimento do condutor;

S = Seção transversal.

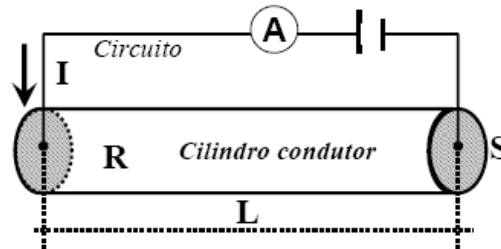


Figura 5 - Relação resistividade e resistência.
Fonte: Braga (2006)

Assim, a resistividade é definida como (equação 8):

$$\rho = R \frac{S}{L} \text{ (ohm.m)} \quad (8)$$

Onde:

ρ = resistividade elétrica;

R = resistência;

S = seção transversal;

L = comprimento do condutor.

Portanto, a dimensão da resistividade é o produto de uma resistência elétrica por uma longitude; em função disto, a unidade de resistividade no sistema SI será ohm.m. De maneira simplista, a resistividade pode ser definida como sendo uma medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra na sua passagem em um determinado material, e isto está ligado aos mecanismos de propagação de corrente elétrica (GRIFFITHS, 1976)

Ainda segundo Braga (2008), no caso de aquífero livre, onde a camada sobrejacente corresponde à zona não saturada, os valores de resistividade não identificam sua litologia dessa camada. Entretanto, o valor da resistividade obtido para a camada saturada pode ser extrapolado para os sedimentos sobrepostos, desde que a litologia seja aproximadamente a mesma. Dessa maneira, o grau de proteção do aquífero livre pode ser estimado.

O arranjo Schlumberger permite a realização de sondagens elétricas verticais (SEVs) especialmente concebidas para a investigação de meios com variações verticais de

resistividade elétrica. Neste dispositivo os eletrodos de corrente são afastados simetricamente do ponto central “O” (SANTOS, 2006).

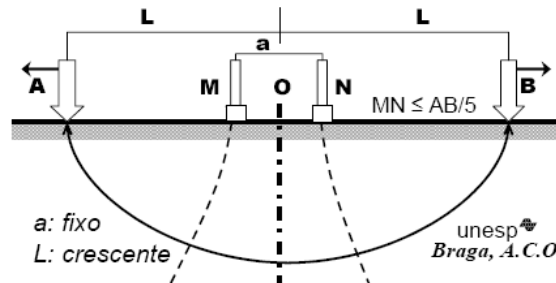


Figura 6 - Arranjo Schlumberger – SEV.
Fonte: Braga (2006).

Segundo Orellana (1972), o erro produzido por esse tipo de arranjo, observado nos dados de campo, em função dos ajustes necessários nas equações gerais básicas, pode ser considerado insignificante, não se traduzindo em desvantagem. O autor ainda sugere que a relação entre os eletrodos seja: $MN \leq AB/5$.

Na aplicação do método da Eletrorresistividade utilizando a técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) – arranjo Schlumberger, é possível determinar a profundidade do nível d’água subterrâneo, espessura e resistividade das camadas e ainda o parâmetro de Dar Zarrouk, condutância longitudinal, como descrito a seguir.

2.2.1.1. Parâmetros Dar Zarrouk

Nas discussões teóricas sobre os meios condutores estratificados, alguns parâmetros têm fundamental importância na interpretação e entendimento do modelo geoeletrico para uma determinada situação geológica em profundidade. Tais parâmetros resultam de uma combinação, por meio de multiplicação ou divisão, da espessura e resistividade de cada camada geoeletrica obtida no modelo (ORELLANA, 1972).

Conforme demonstrou Orellana (1972) a partir de uma seção geoeletrica (Figura 7), a corrente elétrica ao fluir no subsolo pode seguir dois caminhos preferenciais: um perpendicular e outro paralelo à estratificação. No fluxo perpendicular à estratificação, as camadas apresentam o comportamento de condutores em série cujas resistências se somam. Assim, a resistência de uma camada i , sendo L seu comprimento e S sua seção transversal, será dada por (equação 9):

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{E_i}{1 \times 1} = \rho_i E_i = T_i \quad (9)$$

Onde:

R_i = resistência da camada;

ρ_i = resistividade da camada;

L = comprimento da camada;

S = seção transversal;

E_i = espessura;

T_i = resistência transversal unitária.

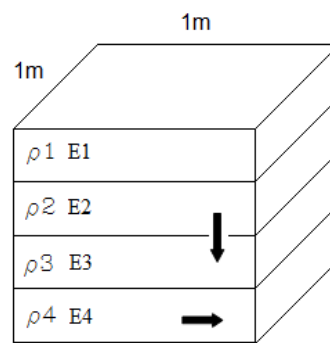


Figura 7 - Seção geoeletrica.
Fonte: adaptado de Braga (2006).

Este produto é denominado resistência transversal unitária (T) dado em ohm/m^2 , e o conjunto das n primeiras camadas corresponderá à resistência total (igual ao somatório das resistências unitárias).

No caso da corrente elétrica seguir com o fluxo paralelo à estratificação, a resistência da camada i é dada pela equação 10:

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{1}{E_i \times 1} = \frac{\rho_i}{E_i} \quad (10)$$

Onde:

R_i = resistência da camada;

ρ_i = resistividade da camada;

L = comprimento da camada;

S = seção transversal;

E_i = espessura;

Dessa maneira, as resistências não podem ser somadas, já que estão em paralelo, o que torna conveniente somar suas inversas (que têm propriedade aditiva). As inversas da resistividade, neste caso, têm a denominação de condutância longitudinal (S), conforme a equação 11:

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (11)$$

Onde:

S_i = condutância longitudinal;

E_i = espessura;

ρ_i = resistividade elétrica.

A condutância longitudinal pode, portanto, ser somada, como na equação 12, onde obtêm-se o valor de S para as n primeiras camadas da seção:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i} \quad (\text{Siemens}) \quad (12)$$

Onde:

S = condutância longitudinal;

n = número de camadas;

ρ_i = resistividade elétrica.

A determinação da condutância longitudinal da camada sobrejacente a um aquífero permite estimar o grau de sua proteção natural frente a um contaminante migrando verticalmente, como demonstrou Henriot (1995).

Quanto maior o valor de S da camada sobrejacente, maior será o grau de proteção do aquífero frente a esses contaminantes, pois quanto maior a espessura da camada sobrejacente maior o tempo de percolação do poluente (maior filtro) e quanto menor sua resistividade, mais argiloso e menos permeável o material (BRAGA, 2008). Esta relação pode ser verificada na figura 8.

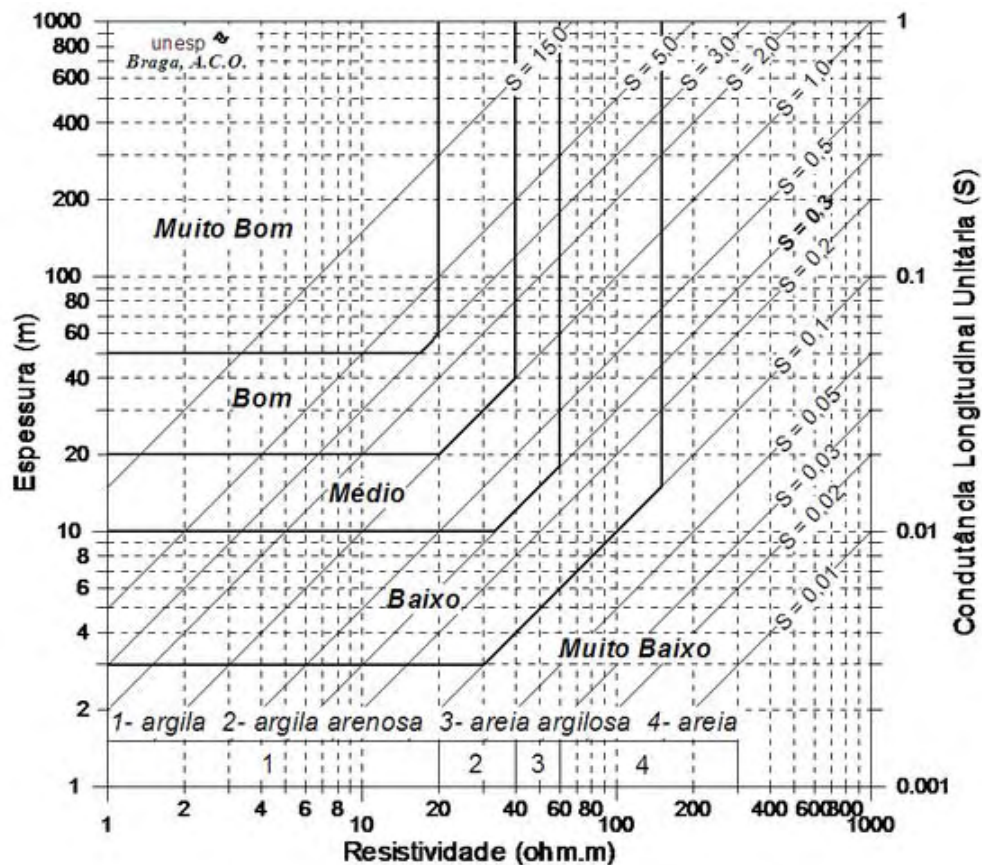


Figura 8 - Relação condutância longitudinal unitária e proteção natural do aquífero.
Fonte: Braga (2006).

2.2.2. Estimativa de Parâmetros Hidrológicos por intermédio de Métodos Geofísicos

Segundo Soupios *et al.* (2007), é essencial estimar as propriedades hidráulicas de qualquer sistema aquífero a fim de obter informações quantitativas a respeito do fluxo de água subterrânea e modelar o transporte de contaminantes. A maneira mais usual de obtenção dessas informações, tais como condutividade hidráulica e coeficiente de transmissividade, é por intermédio de testes de bombeamento e experimentos em laboratório, quando se dispõe de amostras.

Essa maneira de avaliar os parâmetros hidráulicos pode não ser a ideal em alguns casos por motivos como o fator financeiro e a dificuldade de locar ou perfurar os poços. O arranjo espacial pode significar problemas na elaboração do modelo hidrogeológico, pois em muitos casos é necessário perfurar mais poços do que inicialmente havia sido previsto, o que eleva os custos e pode atrasar os trabalhos. Assim, a aplicação de métodos geofísicos

combinados com os testes de bombeamento oferece uma alternativa eficiente para estimar os parâmetros do aquífero (BRAGA, 2006).

As técnicas de obtenção da resistividade elétrica, especificamente, são bem estabelecidas e largamente utilizadas para detectar uma variedade de problemas geotécnicos, geológicos e ambientais (WARD, 1990).

De acordo com Soupios *et al.* (2007), visto que os mecanismos que controlam o fluxo dos fluidos e as correntes elétricas são geralmente regidos pelos mesmos parâmetros físicos e atributos litológicos, pode-se dizer que as condutividades hidráulica e elétrica são dependentes uma da outra. Certamente, deve-se notar que os fatores que governam o fluxo da água e das correntes elétricas no solo (litologia, tamanho dos grãos, mineralogia, forma e orientação dos grãos, geometria dos poros, porosidade, permeabilidade, compactação, consolidação, grau de cimentação, profundidade e distribuição da água) são extremamente variáveis. Assim, é necessário se ter em mente que os valores medidos de resistividade não são absolutos, mas relativos e, portanto, podem ser obtidos somente conclusões relativas sobre os parâmetros hidráulicos de determinada área.

A resistividade de uma rocha 100% saturada com água (ρ_0) varia diretamente com a resistividade da água (ρ_w) e inversamente com a porosidade (ϕ) (ARCHIE, 1972). A partir disso, Archie (1972) propôs uma equação empírica onde para arenitos o coeficiente de cimentação m fica na faixa de 1,8 a 2,2 (equação 13).

$$\rho_0 = \rho_w \cdot \phi^{-m} \quad (13)$$

Onde:

ρ_0 = resistividade elétrica da rocha 100% saturada;

ρ_w = resistividade elétrica da água;

ϕ = porosidade;

m = coeficiente de cimentação.

Archie (1942) definiu a razão ρ_0 / ρ_w como um fator de resistividade da formação rochosa (F), então (equação 14):

$$F = \frac{\rho_0}{\rho_w} = \phi^{-m} \quad \rightarrow \quad \phi = \left(\frac{\rho_0}{\rho_w} \right)^{-1/m} = (F)^{-1/m} \quad (14)$$

Onde:

F = fator de resistividade da formação rochosa;

ρ_0 = resistividade elétrica da rocha 100% saturada;

ρ_w = resistividade elétrica da água;

ϕ = porosidade;

m = coeficiente de cimentação.

Após analisar dados obtidos com amostras parcialmente saturadas de água, Archie (1972) deduziu uma razão entre a resistividade da amostra parcialmente saturada (ρ_t) e a da amostra 100% saturada de água (ρ_0), como índice de resistividade (I_R). Os resultados experimentais mostram que I_R satisfaz uma relação da forma (equação 15):

$$I_R = \frac{1}{S_w^n} \rightarrow \frac{\rho_t}{\rho_0} = \frac{1}{S_w^n} \rightarrow S_w = \left(\frac{\rho_0}{\rho_t}\right)^{1/n} \quad (15)$$

Onde:

I_R = índice de resistividade;

S_w = Saturação em água;

n = expoente de saturação;

ρ_0 = resistividade elétrica da amostra 100% saturada;

ρ_t = resistividade elétrica da amostra parcialmente saturada.

A expressão geral para a lei de Archie é dada por (equação 16):

$$\rho_t = \rho_w \cdot \phi^{-m} \cdot S_w^{-n} \rightarrow \phi = \left(\frac{\rho_w}{\rho_t \cdot S_w^n}\right)^{1/m} \quad (16)$$

Onde:

ρ_t = resistividade elétrica da amostra parcialmente saturada.

ρ_w = resistividade elétrica da água;

ϕ = porosidade;

m = coeficiente de cimentação.

S_w = Saturação em água;

n = expoente de saturação;

Dessa maneira, a partir de dados da porosidade obtida através da equação acima, pode-se estimar a condutividade hidráulica através da equação de Kozeny–Carman–Bear, dada por Domenico e Schwartz (1990) (equação 17):

$$K = \left(\frac{\delta_w g}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{d^2}{180} \right) \cdot \left[\frac{\phi^3}{(1-\phi^2)} \right] \quad (17)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica estimada, em m/s;

δ_w = densidade do fluido (água), em kg/m³;

g = aceleração da gravidade, em m/s;

μ = viscosidade – 0,0014 kg/m.s (segundo Fetter, 1994);

d = diâmetro médio dos grãos, em m;

ϕ = porosidade média, em %;

2.3. VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

A vulnerabilidade de um aquífero significa a maior ou menor suscetibilidade de ser atingido por uma carga poluidora. É um conceito inverso ao de capacidade de assimilação de um corpo d'água receptor, com a diferença de o aquífero possuir uma cobertura não saturada que proporciona uma proteção adicional (IG/CETESB/DAEE, 1997). A caracterização da vulnerabilidade do aquífero pode ser melhor expressa por meio dos seguintes fatores:

- Acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes; e
- Capacidade de atenuação, resultante de retenção físico-química ou de reação de poluentes.

A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, mas o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma característica intrínseca do aquífero (REBOUÇAS, 1996).

Os componentes que condicionam a vulnerabilidade de um aquífero não são diretamente mensuráveis, mas sim determinados por meio de combinações de outros fatores. Além disso, dados referentes a vários fatores não podem ser facilmente estimados ou não estão disponíveis, o que obriga a uma redução e simplificação da lista de parâmetros a ser considerados (IG/CETESB/DAEE, 1997). Sendo assim, o ideal é agregar o máximo de informações possíveis para compor a análise da vulnerabilidade natural, que muitas vezes é simplificada diante da quantidade limitada de dados por questões de viabilidade financeira.

Dentre os diversos métodos que visam a determinação da vulnerabilidade natural dos aquíferos, destaca-se o método GOD (FOSTER & HIRATA, 1998), bastante utilizado no Brasil, de aplicação simples e sistemática, pois considera três parâmetros básicos em sua análise. Este método tem sido um dos mais utilizados na América Latina e Caribe, a partir dos

anos 90, por causa de sua simplicidade de conceitos e aplicação. As informações necessárias estão quase sempre disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional. Este método é tido como um primeiro passo para a avaliação de áreas prioritárias de ação (BRACHO *et al.*, 2004).

No entanto, a avaliação proporcionada pelo método GOD deve ser considerada com critério, visto que não considera de maneira apropriada outros fatores determinantes da vulnerabilidade natural de aquíferos. A fim de incrementar esta análise, a presente pesquisa utilizou o método DRASTIC, bastante difundido na atualidade e desenvolvido por Aller *et al.* (1987).

2.3.1. Método GOD

O método GOD (Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater table) proposto por Foster & Hirata (1988) considera a avaliação de três parâmetros referentes à capacidade de atenuação e inacessibilidade hidráulica dos poluentes para a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero:

- “G” - Tipo de ocorrência da água subterrânea (ou a condição do aquífero) – deve ser apresentada num intervalo de 0 – 1,0;
- “O” - Características dos estratos acima da zona saturada, em termos de grau de consolidação e litologia – especificação dos tipos litológicos acima da zona saturada do aquífero com a discriminação do grau de consolidação (presença ou ausência de permeabilidade por fissuras) e das características granulométricas e litológicas. Este fator deve ser representado em uma escala de 0,3 – 1,0 e apresentar um sufixo nos casos da presença de fissuras ou baixa capacidade de atenuação de poluentes;
- “D” - Profundidade do nível d’água (ou do topo do aquífero confinado) – deve ser apresentada numa escala de 0,4 – 1,0.

O produto dos três parâmetros resulta no *índice de vulnerabilidade*, numa escala de 0 a 1. Como resultado, os autores definem o grau de vulnerabilidade natural do aquífero como: desprezível, baixo, médio, alto e extremo (tabela 2).

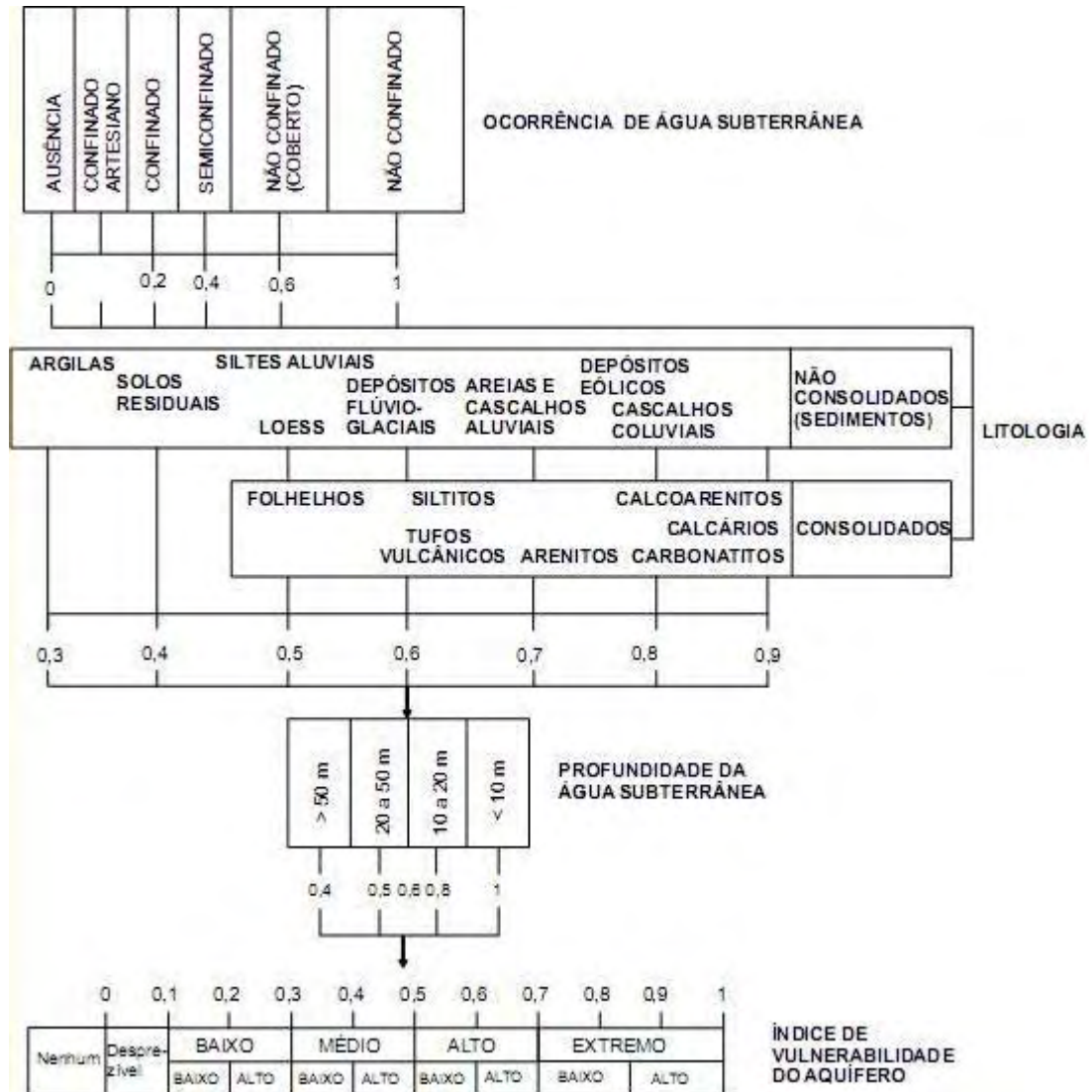


Figura 9 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.
Fonte: Foster & Hirata (1998).

Tabela 2 - Definição prática das classes de vulnerabilidade dos aquíferos.
Fonte: adaptado de Foster *et al.* (2002).

Classe de Vulnerabilidade	Definição Correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação;
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação;
Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados;
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando

	contínua e amplamente lançados ou lixiviados;
Desprezível	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

2.3.2. Método DRASTIC

O método DRASTIC de avaliação e mapeamento da vulnerabilidade foi proposto por Aller *et al.* (1987). Assim como o método GOD, é um método de avaliação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. O índice de vulnerabilidade DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos, a saber:

- “D” – Profundidade do nível d’água subterrâneo (depht) – deve ser apresentada num intervalo de 1 a 10, e incide sobretudo na espessura de material que um poluente qualquer terá de passar ou atravessar para atingir o aquífero;

Profundidade	< 1,5	1,5-4,6	4,6-9,1	9,1-15,2	15,2-22,9	22,9-30,5	>30,5
Índice	10	9	7	5	3	2	1

- “R” – Recarga do aquífero (recharge) – deve estar situada em uma escala de valores de 1 a 9, trata-se de uma variável hidrogeológica que equivale à quantidade de água que atinge a superfície do solo, percola, normalmente na vertical e atinge o aquífero;

Recarga (mm/ano)	< 51	51-102	102-178	178-254	>254
Índice	1	3	6	8	9

- “A” – Tipo de aquífero (aquifer) – este índice possui escala entre 1 e 10. A variável diz respeito à capacidade de atenuação do aquífero, e influencia o fluxo de água subterrânea.

Natureza do aquífero	Índice	Índice típico
Xisto argiloso	1 – 3	2
Rocha metamórfica/ígnea	2 – 5	3

Rocha metamórfica/ígneia alterada	3 – 5	4
“Till” glacial	4 – 6	5
Arenito, calcário e argilito estratificados	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	6
Areia e basalto	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário carsificado	9 – 10	10

• “S” – Tipo de solo (soil) – apresentado em escala de 1 a 10, o solo pode diminuir os efeitos prejudiciais dos agentes poluentes (Lobo Ferreira *et al.*, 1995 *apud* CARDOSO, 2010). Isto depende da permeabilidade (ou poder de retenção) e formação de complexos coloidais.

Solo	Índice
Fino ou ausente	10
Balastro	10
Areia	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansível	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Lodo	2
Argila não agregada e não expansível	1

• “T” – Topografia (topography) – também variando de 1 a 10, está relacionado com declives das superfícies do terreno em estudo. Influencia a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para infiltração.

Declive (%)	< 2	2 - 6	6 - 12	12 - 18	>18
Índice	10	9	5	3	1

• “I” – Impacto da zona não saturada (impact) – dentro de uma escala de 1 a 10, este parâmetro é referente ao tipo de material, que influencia o período de tempo de contacto entre o solo e o poluente. Isto possibilita a ocorrência de processos como a biodegradação e a filtração.

Zona não saturada	Índice	Índice típico
Camada confinante	1	1
Argila/silte	2 – 6	3
Xisto argiloso, argilito	2 – 5	3
Calcário	2 – 7	6
Arenito	4 – 8	6
Arenito, calcário e argilito estratificados	4 – 8	6
Areia e balastro com percentagem significativa de silte e argila	4 – 8	6
Rocha metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Areia e balastro	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário carsificado	8 - 10	10

• “C” – Condutividade Hidráulica (hydraulic conductivity) – deve ser apresentada em um intervalo de 1 a 10, e corresponde à quantidade de água que passa através dos poros, fraturas, cavidades ou planos de estratificação do aquífero.

Condutividade hidráulica (m/d)	Índice
< 4,1	1
4,1 – 12,2	2
12,2 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,7 – 81,5	8

>81,5	10
-------	----

Segundo Aller *et al.* (1987), o método DRASTIC pode ser empregado na avaliação de atividades de ocupação atendendo ao princípio da responsabilidade social. E ainda, pode ser usado para identificar lacunas de dados que afetam a avaliação da poluição potencial, como por exemplo, o reconhecimento adicional de parâmetros hidrogeológicos que iriam, posteriormente, formar uma base de dados incrementada para futuras avaliações.

Diversos autores realizam a análise da vulnerabilidade natural de aquíferos por meio do método DRASTIC pelo mundo. Em Portugal, Lobo Ferreira *et al.* (1995) cita o mapeamento regional das águas subterrâneas desenvolvidos pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Já no Brasil, destacam-se os estudos realizados no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (Fortaleza/CE) por Puerari *et al.* (2003); em Campos dos Goytacazes (RJ) por Alves *et al.* (2009) e no Aquífero Guarani (municípios de Portão e Estância Velha/RS) por Muradás *et al.* (2010).

diplomas legislativos sobre o tema (Lobo Ferreira et al., 1995).

Os parâmetros citados são ainda classificados com diferentes pesos para a avaliação final da soma ponderada (tabela 3):

Tabela 3 - Pesos atribuídos aos parâmetros DRASTIC.
Fonte: Aller *et al.* (1987).

Parâmetro	Peso
Profundidade do nível d'água subterrâneo	5
Recarga do aquífero	4
Tipo de aquífero	3
Tipo de solo	2
Topografia	1
Impacto da zona não saturada	5
Condutividade Hidráulica	3

Dessa maneira, cada parâmetro recebe um índice correspondente à sua classificação, e este índice é multiplicado pelo seu peso equivalente. Finalmente, com a soma dos valores obtidos para cada parâmetro, é obtido o valor do índice de vulnerabilidade pontual, que possui a seguinte interpretação (tabela 4):

Tabela 4 - Interpretação dos índices finais de vulnerabilidade obtidos através da aplicação do método DRASTIC.

Fonte: adaptado de Aller *et al.* (1987).

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
< 100	Insignificante
101 – 119	Muito Baixa
120 – 139	Baixa
140 – 159	Moderada
160 – 179	Alta
180 – 199	Muito Alta
> 200	Extrema

2.3.3. Modelação Matemática

2.3.3.1. Método das Diferenças Finitas

Os modelos matemáticos constituem uma importante ferramenta na previsão da dispersão de contaminantes, pois oferecem uma importante contribuição para o controle e prevenção de alterações ambientais negativas. As técnicas de investigação de campo exigem altos custos, demandam tempo e podem ser auxiliadas pelas técnicas numéricas para obtenção de melhores resultados.

Muitas vezes, para determinação do fluxo de água ou transporte de contaminantes em solos insaturados podem não existir soluções analíticas ou equações puras que descrevam os resultados. Nesses casos, é necessário o uso de métodos numéricos em computadores. Talvez o mais simples dos métodos numéricos para compreender e programar é o das diferenças finitas, derivadas da expansão em série de Taylor (DUCHATEAU & ZACHMANN, 1989).

O método de diferenças finitas divide a região estudada por uma malha uniformemente espaçada de nós, onde cada nó representa uma porção limitada do aquífero. Em cada nó, cada derivada da expressão matemática do problema é aproximada por uma equação linear com referência aos nós adjacentes, formando um sistema de equações lineares, com uma equação para cada célula da malha, que é solucionada através de um processo iterativo (GOMES & CASTRO, 2002).

A equação geral de governo associada ao movimento dos fluidos em meios porosos não saturados é originada de uma combinação da Lei de Darcy e do princípio de conservação de

massa. O meio poroso é considerado isotrópico e homogêneo, escoamento unidimensional e não permanente, densidade da água somente função da pressão capilar, desprezados os efeitos térmicos e de salinidade. Com isso, o movimento do fluido passa a obedecer à equação diferencial parcial não linear de Richards (VASCONCELLOS & AMORIM, 2001).

Matematicamente, a Lei de Darcy (FEDDES *et al.*, 1988, *apud* MANNICH, 2008) no caso de solos isotrópicos pode ser expressa pela equação 18:

$$\vec{q} = -K \Delta h \quad (18)$$

Onde:

q = fluxo;

K = condutividade hidráulica;

Δh = carga hidráulica.

Onde q é o volume [L^3] de água que atravessa uma área unitária perpendicular ao escoamento por unidade de tempo, K [L/T] é a condutividade hidráulica do solo, e h [L] é a carga hidráulica da água em dimensões de altura. No caso de solos não saturados e considerando a velocidade de fluxo desprezível, a carga h é a soma do potencial capilar ψ [L] (negativo para escoamento não saturado) e a altura z [L] (positiva para cima) (equação 19):

$$h = \psi + z \quad (19)$$

Onde:

h = carga hidráulica;

ψ = potencial capilar;

z = altura.

Para um volume de controle diferencial (Figura 10) contendo solo não saturado de dimensões dx , dy e dz , o volume é o produto $dx.dy.dz$ e o conteúdo de água no mesmo é $\theta.dx.dy.dz$, onde θ [L^3/L^3] é a umidade volumétrica definida como a razão entre o volume de água e o volume total. Assim, a equação da conservação de massa (FOX & MCDONALD, 2001) para este volume para o escoamento em meio poroso pode ser escrita como demonstra a equação 20:

$$\Delta. \vec{q} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

Onde:

q = fluxo;

θ = umidade volumétrica;

t = tempo.

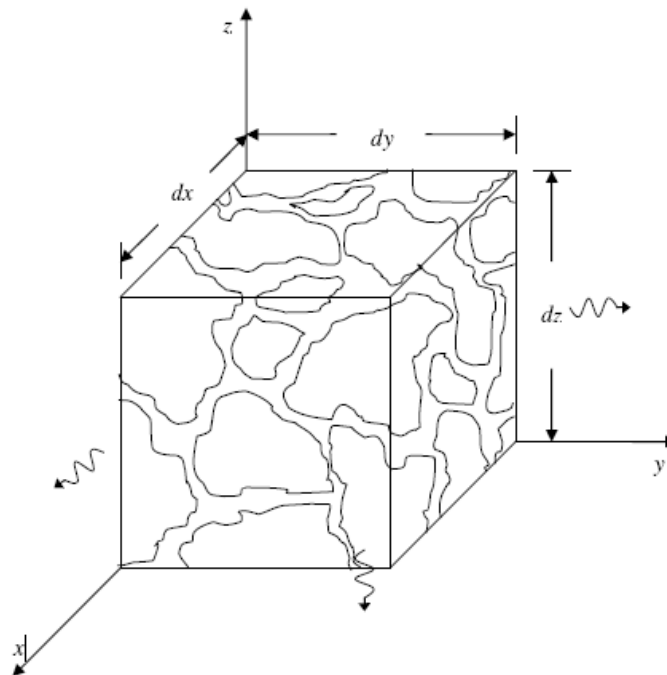


Figura 10 - Volume de controle do solo.

Fonte: Mannich (2008).

Substituindo as equações 18 e 19 na equação 20, temos a equação 21, abaixo:

$$\Delta.[-K(\psi)\Delta(\psi + z)] + \frac{\partial\theta}{\partial t} = 0 \quad (21)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica;

ψ = potencial capilar;

z = altura;

θ = umidade volumétrica;

t = tempo.

Esta é chamada de Equação de Richards e consiste numa equação diferencial parabólica não linear em virtude da variável K ser função do potencial capilar e que governa o processo de infiltração e escoamento em solos não saturados (BASHA, 1999).

Considerando um solo isotrópico com propriedades homogêneas em toda sua extensão e que o escoamento é predominantemente vertical, as derivadas nas direções x e y podem ser desconsideradas, de modo que a equação 21 passa a ser unidimensional e assume a forma da equação 22 (MANNICH, 2008):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial (\psi + Z)}{\partial z} \right] \quad (22)$$

Onde:

θ = umidade volumétrica;

t = tempo.

K = condutividade hidráulica;

ψ = potencial capilar;

z = altura;

A escrita desta equação diferencial no caso do método das diferenças finitas pode ser feita por aproximação de diferenças avançadas para a derivada no tempo e uma aproximação de diferenças centradas para a derivada espacial. A infiltração na borda superior da região estudada (superfície do solo) requer um cuidado especial. A grade de pontos (nós, z_i) é considerada centralizada na quadrícula e o fluxo principal entre dois nós z_i e z_{i+1} , denominado $q_{i+1/2}$ está centralizado entre as bordas do nó. Se o espaço entre os nós, Δz , são uniformes, o programa centraliza $q_{i+1/2}$ entre as bordas. Assim, a fim de aplicar a infiltração, q_{inf} , na superfície do solo, uma aproximação desloca o sistema de coordenadas para cima em $\Delta z/2$ e coloca a superfície em $z_{np} - (\Delta z/2)$. Isto não muda as equações de diferenças finitas, mas deve mudar a interpretação dos resultados (BAKER, 2012).

Para o âmbito deste trabalho, esta alteração não é significativa, pois o objetivo é calcular a quantidade de água que chega a uma certa profundidade num dado intervalo de tempo.

2.3.3.2. Problema Inverso

O problema inverso (PI) é definido em oposição ao problema direto. Neste, são conhecidos os parâmetros e calculadas as respostas do modelo, ou seja, o objetivo é determinar os valores dos parâmetros a partir dos dados. O problema inverso é, ao contrário do problema direto, um problema mal posto, pois diferentes modelos podem representar

igualmente bem os dados (na prática o problema inverso não tem solução única) e a solução é geralmente instável (SANTOS, 2006).

Uma característica das técnicas de problemas inversos é a necessidade de se ter uma equação inicial que forneça a correlação de uma variável a ser medida em função do parâmetro a ser estimado.

Existem diversos métodos desenvolvidos para a resolução do problema inverso. Alguns utilizam um método local, em que a solução é procurada na vizinhança de um modelo inicial (exemplo: método de ajuste aos mínimos quadrados), e outros recorrem a um método global em que a busca da solução é feita em todo o espaço de soluções, como no “*simulated annealing*” (REPRESAS, 2009).

A ideia básica da resolução do problema inverso não linear usando métodos de minimização global é investigar aleatoriamente o espaço de parâmetros levando lentamente a investigação a centrar-se, mas não exclusivamente, em torno do mínimo absoluto segundo (SANTOS, 2006). Para cada conjunto de parâmetros (modelo), é determinado o valor da função objetivo com retenção dos modelos que apresentem valores da função objetivo inferiores a um valor estabelecido. Dessa maneira, uma análise estatística desse conjunto restrito de modelos permite a estimativa das funções de distribuição *a posteriori* dos parâmetros.

2.3.3.2.1. *Simulated Annealing*

O simulated annealing (SA) refere-se a um método de minimização global que funciona analogamente ao processo físico de arrefecimento de metais, processo iniciado com uma temperatura elevada, permitindo transições de alto nível de energia, depois, gradualmente, a temperatura é resfriada até alcançar um estado sólido, onde apenas transições de baixo nível de energia são permitidas. O objetivo é alcançar uma estrutura molecular com um mínimo de energia (GUARDA, 2006).

O processo de simulated annealing consiste em um primeiro momento “derreter” o sistema, otimizado por uma temperatura alta o suficiente e então baixá-la em lentos estágios até o sistema “congelar” e não ocorrerem mais alterações (KIRKPATRICK *et al.*, 1983). A cada temperatura, a simulação deve prosseguir de maneira suficientemente longa até o sistema atingir um estado estacionário.

Assim, analogamente ao problema combinatório, os estados possíveis de um metal correspondem a soluções do espaço de busca; a energia em cada estado corresponde ao valor

da função objetivo e; a energia mínima corresponde ao valor de uma solução ótima local, possivelmente global (SOUZA, 2012).

É Caracterizado por um processo de refinamento sistemático cujo objetivo é atingir uma situação de equilíbrio, situando a solução candidata o mais próximo possível da solução tida como ótima (DAVIS, 1987 *apud* MOLE *et al.*, 2004).

A cada iteração do método, um novo estado é gerado a partir do estado corrente por uma modificação aleatória neste (SOUZA, 2012). Se o novo estado é de energia **menor** que o estado corrente, esse novo estado passa a ser o estado corrente; se o novo estado tem uma energia **maior** que o estado corrente em Δ unidades, a probabilidade de se mudar do estado corrente para o novo estado é $e^{-\Delta/(kT)}$, onde k é a constante de Boltzmann e T a temperatura corrente. Este procedimento é repetido até o equilíbrio térmico (passo de Metropolis) (METROPOLIS *et al.*, 1953).

Como ilustra a figura 11, nas fases iniciais, com a temperatura elevada, são aceitas soluções muito diferentes. À medida que T diminui, a aceitação de soluções é mais exigente e apenas as melhores soluções são aceitas levando o algoritmo a convergir (SANTOS, 2006).

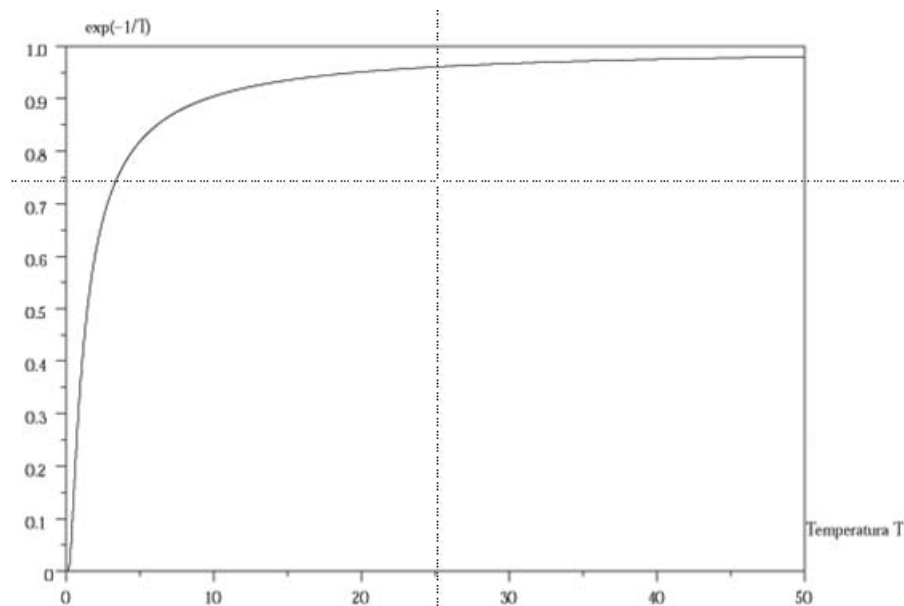


Figura 11 - Probabilidade de aceitação de mudança do estado corrente (problema de minimização).
Fonte: Souza (2012).

Para o mesmo problema, o algoritmo SA pode ser executado várias vezes, com condições iniciais diferentes, de modo a obter-se um conjunto (estatisticamente) significativo de soluções. A análise estatística deste conjunto de soluções permite calcular o modelo médio

$\langle \mathbf{m} \rangle$ e a matriz de covariância *a posteriori* dos parâmetros do modelo usando, respectivamente as equações 23 e 24 (Mrinal *et al.*, 1993, *apud* SANTOS, 2006):

$$\langle \mathbf{m} \rangle = \sum \mathbf{m} P(\mathbf{m}) \quad (23)$$

$$\mathbf{C} = \sum (\mathbf{m} - \langle \mathbf{m} \rangle)(\mathbf{m} - \langle \mathbf{m} \rangle)^T P(\mathbf{m}) \quad (24)$$

onde as somas são sobre os modelos estimados e $\mathbf{P}(\mathbf{m})$ é a densidade de probabilidade *a posterior*, sendo ϕ a função objetiva:

$$P(\mathbf{m}) = \exp (\phi(\mathbf{m})) \quad (25)$$

CAPÍTULO 3 – ÁREA DE ESTUDO

3.1. LOCALIZAÇÃO

O município de Rio Claro está situado a 175 quilômetros da capital paulista e está próximo a outros importantes centros urbanos como Limeira, Piracicaba, Campinas, São Carlos e Araraquara.

Segundo dados de 2011 publicados pela Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados – SEADE (2011), o município de Rio Claro possui população de aproximadamente 188.000 habitantes em uma área de 498 km². A densidade demográfica municipal equivale a 377,51 habitantes por quilômetro quadrado e o grau de urbanização (percentual da população residente em áreas urbanas em determinado espaço geográfico) é de 97,57%.

A economia municipal está baseada na liderança da agroindústria sucroalcooleira. Seu parque industrial é diversificado e inclui destilarias de álcool e usinas de açúcar, indústrias de alimentos e bens de capital, entre outras. Além disso, com os municípios de Santa Gertrudes e Cordeirópolis, forma importante polo cerâmico, com produtos que atendem ao mercado nacional e internacional (SEADE, 2011).

3.2. CLIMA

O clima da região de Rio Claro pode ser considerado tropical com duas estações definidas - Cwa na classificação de Koeppen, ou seja, w: seca no inverno, a: mês mais quente com temperatura superior a 22°C, ou tropical alternadamente seco e úmido, controlado por massas tropicais e equatoriais, que predominam em mais de 50% do ano (MONTEIRO, 1973 apud ZAINE, 2000).

A partir de dados da Estação Meteorológica de Rio Claro, situada no Campus da Unesp no bairro Bela Vista, junto ao CEAPLA, foi produzido um gráfico, que apresenta a distribuição mensal do regime de chuvas correspondente ao período de janeiro de 2000 a dezembro de 2011 (Figura 12). É possível observar um período seco entre os meses de abril e setembro, com temperatura média de 17°C, e um período chuvoso com temperatura média de 22°C, que se estende de outubro a março e representa mais de 80% das precipitações anuais.

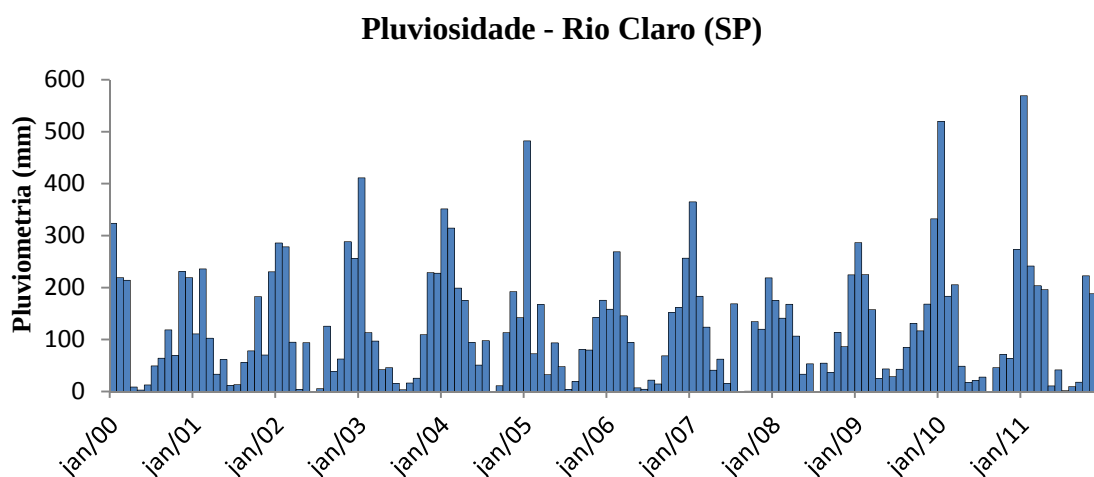


Figura 12 - Médias mensais de chuva (em mm) – período de 2000 a 2011.
Fonte: CEAPLA, (2011).

3.3. HIDROGRAFIA

O município de Rio Claro está localizado na Bacia do Rio Corumbataí, que faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 05, composta pelas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, denominada Bacias PCJ.

A bacia do Rio Corumbataí, localizada na porção centro-leste do Estado de São Paulo, possui a maior parte de suas terras na Depressão Periférica Paulista, e compreende os municípios de Analândia, Corumbataí, Ipeúna, Itirapina e Santa Gertrudes, que compõem parte da região administrativa de Rio Claro (Figura 12).

Além do Rio Corumbataí, os principais rios da bacia são o Rio Cabeça, Passa Cinco e Ribeirão Claro. Com extensão aproximada de 120 km, o Rio Corumbataí possui um desnível total de 330 m, desde a nascente (Serra de Santana, 800 m) até a desembocadura (Rio Piracicaba, 470 m), apresentando maiores desníveis no seu alto curso, com declividade em torno de 0,7% (CEAPLA, 2011). A bacia hidrográfica é subdividida ainda em outras cinco sub-bacias (Figura 13), a saber:

I - Ribeirão Claro: tem como contribuinte principal o ribeirão de mesmo nome e está situada na porção leste da bacia do Corumbataí, margeando o Horto Florestal Navarro de Andrade (Rio Claro);

II - Passa Cinco: tem os rios Cabeça e Passa Cinco como principais contribuintes e drena a porção oeste da bacia do Corumbataí;

III - Alto Corumbataí: ocupa a porção norte da Bacia do Corumbataí e é representada pela área da nascente do rio, na região do município de Analândia;

IV - Médio Corumbataí: situada na porção central da Bacia do Corumbataí, onde há o encontro do rio Corumbataí com o Ribeirão Claro e os rios Cabeça e Passa Cinco;

V - Baixo Corumbataí: porção sul da Bacia da Corumbataí, onde há a desembocadura do rio Corumbataí, já com todos os seus contribuintes principais, no rio Piracicaba.



Figura 13 - Localização da Bacia do Rio Corumbataí no Estado de São Paulo
Fonte: CEAPLA (2011).

Dentre as várias sub-bacias da bacia do rio Piracicaba, a do Corumbataí configura-se hoje como a mais importante do ponto de vista hídrico. Desde o início de 2000, toda a água consumida pela cidade de Piracicaba é captada neste rio e a maior preocupação hoje é a carga poluente, principalmente esgoto doméstico, lançado no rio, na altura da cidade de Rio Claro (MORETTI, 2001).

Segundo Palma-Silva *et al.* (2007), as características do Rio Corumbataí no alto curso e médio curso permitem seu enquadramento na classe 2, conforme Resolução CONAMA 357 de 2005 (CONAMA, 2005). No entanto, parte do médio curso e baixo curso vem apresentando características de rio classe 4. Isto é decorrente da falta de tratamento de esgoto no município de Rio Claro, além do lançamento clandestino. Ainda, a qualidade da água do

No município de Rio Claro, a exploração de águas subterrâneas tem sido implementada no Subgrupo Itararé que, na região, é relativamente profundo (200 a 500 metros) e caracterizado pela baixa produtividade, além de alta salinidade (aproximadamente 1000 ppm) e suas porções mais profundas (OLIVA, 2002).

Ainda segundo Oliva (2002), muitas indústrias da região de Rio Claro utilizam água proveniente de arenitos da Formação Rio Claro, assentada sobre a Formação Corumbataí e atende satisfatoriamente a demanda atual. No entanto, um incremento muito elevado na exploração do aquífero pode gerar problemas no suprimento de água.

A maior parte do Município de Rio Claro está instalado sobre sedimentos da Formação Corumbataí e Formação Rio Claro, e, secundariamente, sobre rochas intrusivas básicas, como, por exemplo, na área do Horto Florestal, porém a geologia regional contempla outras unidades litoestratigráficas (ZAINÉ, 2000).

A Formação Rio Claro apresenta como características marcantes: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados amarelados e avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. A espessura máxima é da ordem de 40 m, predominando valores entre 25 e 30 m (ZAINÉ, 1994).

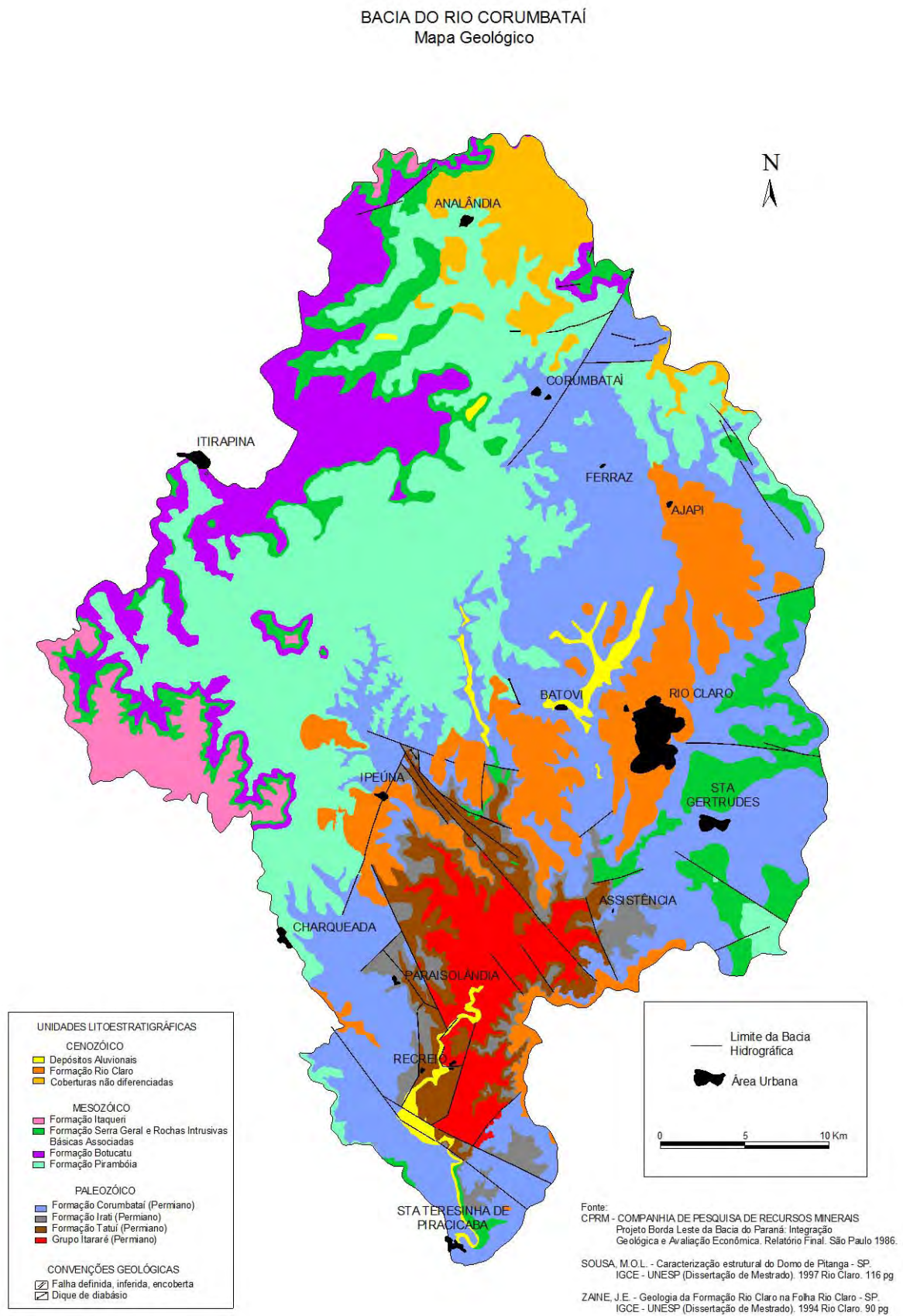


Figura 15 - Mapa geológico da Bacia do Rio Corumbataí
Fonte: CEAPLA (2012).

3.5. ÁREAS DE ALTA VULNERABILIDADE

A Resolução SMA 014 de 05 de março de 2010 (SMA, 2010), publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo em 06 de março de 2010, define diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para uso da água subterrânea.

As citadas áreas foram definidas a partir do “Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo” (IG/CETESB/DAEE, 1997) e das áreas potenciais de restrição e controle de captação e uso das águas subterrâneas.

No município de Rio Claro existem fragmentos considerados como áreas de alta vulnerabilidade de acordo com essa resolução, em uma porcentagem considerável dos limites da área de estudo deste trabalho (Figura 16).

Nessas áreas, o licenciamento de empreendimentos potencialmente impactantes, que captam vazões superiores a 50 m³/h ou que disponham efluentes líquidos, resíduos ou substâncias no solo, fica condicionado à apresentação de estudo hidrogeológico que inclua a avaliação da vulnerabilidade e balanço hídrico, além de um programa de monitoramento sistemático da água subterrânea.

No município existem atualmente 24 áreas comprovadamente contaminadas (CETESB, 2011).

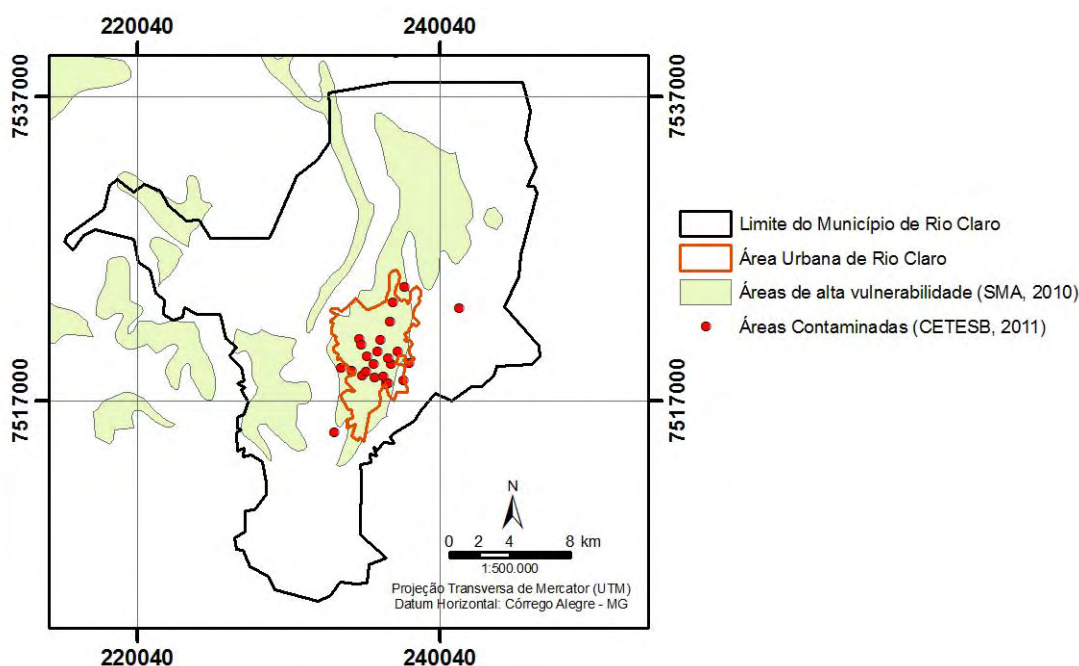


Figura 16 - Mapa de localização das áreas de alta vulnerabilidade no município de Rio Claro.

CAPÍTULO 4 – MATERIAL E APLICAÇÃO DOS MÉTODOS

4.1. ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

Na estimativa dos parâmetros hidrológicos, foram utilizados os dados obtidos pelos ensaios realizados por Oliva (2006), que descreve resultados de sondagens elétricas verticais realizadas em 60 pontos da Formação Rio Claro.

Segundo Braga (2006), a resistividade de sedimentos arenosos e arenitos na zona saturada ocorre numa faixa inferior a 300 ohm.m (Figura 17). Este é o caso do aquífero livre em Rio Claro. Dessa maneira, esta avaliação considera os dados referentes a 20 SEVs de Oliva (2006) além de 10 SEVs realizadas por Braga (1997) no município.

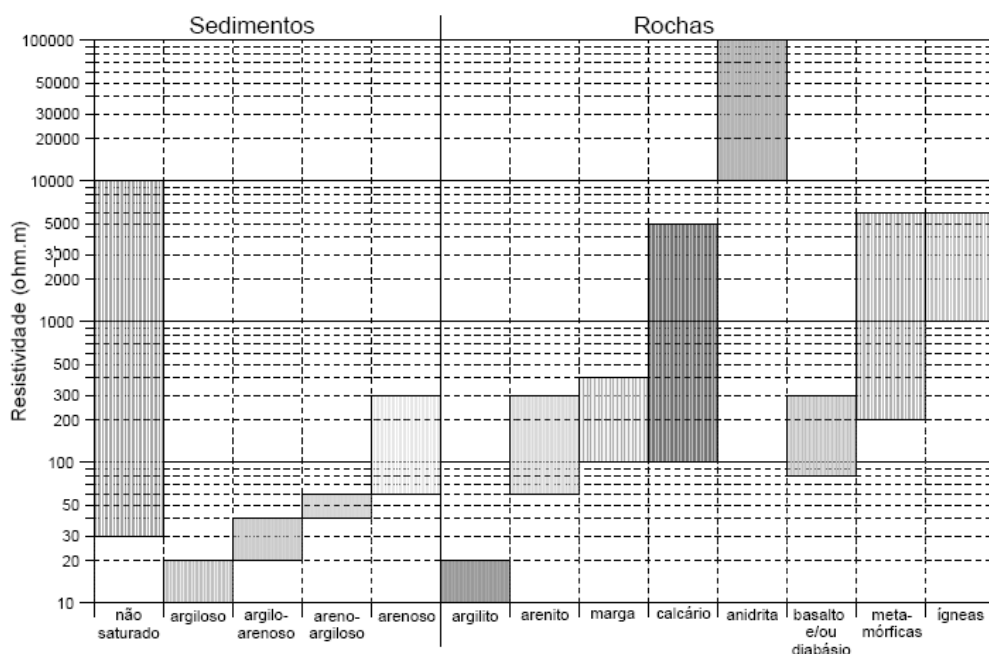


Figura 17 - Faixas de variações nos valores de resistividade – solos/sedimentos e rochas.
Fonte: Braga, (2006).

A partir dessa primeira filtragem dos dados, os valores de resistividade elétrica foram inseridos em uma planilha Excel (Microsoft Corporation, 2007), com suas respectivas coordenadas geográficas, e valores de resistividade da zona saturada, e da zona não saturada. Os valores adotados para essa camada foram os correspondentes à maior espessura, já que de acordo com Oliva (2006) há mais de um nível geoeletrico na zona não saturada.

Além disso, foi inserida uma variável denominada diâmetro médio dos grãos, cujos valores foram obtidos através das análises granulométricas realizadas por Oliva (2002). Com

isto, foi possível levantar o diâmetro médio dos grãos correspondentes a 16 pontos com dados de resistividade. Como há 14 outros locais de análise e as medidas granulométricas dos grãos tiveram pequena variação, foi adotado o diâmetro médio de 0,00033 m ou 0,33 mm, correspondente a materiais com granulometria de areia fina a média (ABNT, 1995).

Assim, foi possível aplicar aos dados obtidos, as equações do subitem 2.5.2. deste trabalho: Lei de Archie e equação de Kozeny-Carman-Bear, dada por Domenico e Schwartz (1990).

As equações foram inseridas em uma planilha Excel (Microsoft Corporation, 2007), onde foi calculada a condutividade hidráulica de todos os pontos selecionados com valores de resistividade elétrica. Além deste, foi calculado também o parâmetro q da lei de Darcy, referente ao fluxo de água que chega ao aquífero, considerando uma variação unitária na carga hidráulica, diretamente relacionado à vulnerabilidade.

4.2. MÉTODO GOD

Para produzir o mapa de vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no aquífero livre em Rio Claro a partir do método GOD, foram gerados mapas específicos para cada um dos três parâmetros a serem avaliados. Assim, com o produto dos resultados parciais, é obtido o mapa com a variação de níveis de vulnerabilidade para a área de estudo.

Foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos para obtenção dos valores para os parâmetros de interesse:

- G – Grau de confinamento do aquífero

A área de estudo selecionada para esta avaliação da vulnerabilidade é justamente o aquífero livre no município de Rio Claro. Dessa maneira, o índice GOD correspondente para aquíferos não confinados é 1.

- O – Características da zona não saturada (litologia e grau de consolidação)

O contexto hidrogeológico do município de Rio Claro é representado por dois sistemas principais de águas subterrâneas, sendo um deles o aquífero livre, pouco profundo, constituído pelos materiais pouco consolidados da Formação Rio Claro (COTTAS, 1983). E ainda, essa Formação apresenta como característica marcante a existência de espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos.

Assim, foi adotado para o parâmetro O, o índice 0,7, estabelecido no método de Foster & Hirata (1988). Com isso, para a geração do mapa correspondente, houve conversão do polígono de delimitação do aquífero livre no ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006) em raster a partir da ferramenta *feature to raster* do módulo *Conversion tools*.

- D – Profundidade do nível d'água subterrâneo

Os dados utilizados para a obtenção do mapa de variação do nível d'água subterrâneo na área de estudo foram obtidos em Oliva (2002). Refere-se a 134 pontos na área de ocorrência do aquífero livre em Rio Claro, que possuem informação de coordenadas geográficas, cota topográfica, profundidade do nível d'água subterrâneo e cota do nível d'água (NA).

Na área existem pontos com profundidades relacionadas a 3 índices do método GOD: menor que 5 metros (índice 1,0), de 5 a 20 metros (índice 0,8) e de 20 a 50 metros (índice 0,6).

A partir das informações disponíveis para cada poço, foi utilizado um método interpolativo do SIG ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006) para determinar as áreas de influência dos poços, determinada *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst*, onde a opção *Inverse Distance Weighted* (IDW) foi selecionada. O método IDW corresponde à interpolação entre cada ponto como uma influência local, diminuindo à medida que a distância entre os pontos aumenta.

Após a elaboração desse mapa, foi realizada a conversão dos intervalos de profundidade em índices específicos determinados pela metodologia para o parâmetro D, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software já citado.

Concluídos os mapas específicos para cada parâmetro, foram multiplicados os índices encontrados: $G \times O \times D$, a partir da ferramenta *Raster Calculation* do módulo *Spatial Analyst* no SIG ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006), e obtivemos o mapa de vulnerabilidade a partir do método GOD.

4.3. MÉTODO DRASTIC

A fim de gerar o mapa de vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas no aquífero livre de Rio Claro a partir do método DRASTIC, mapas específicos para cada um

dos sete parâmetros a serem considerados foram produzidos. Cada mapa é organizado por índices predeterminados por Aller *et al.* (1987) e, posteriormente todos eles são integrados para a geração do mapa final.

Foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos para a obtenção dos valores para os parâmetros de interesse:

- D – Profundidade da zona não saturada

Esse parâmetro é o mesmo considerado no método GOD, onde também é denominado “D”, mas com diferentes índices atribuídos. Primeiro porque o método GOD atribui a este parâmetro pesos que variam de 0,4 a 1 e o método DRASTIC de 1 a 10. E segundo, os intervalos de profundidade onde variam os índices também são diferentes.

Dessa forma, as profundidades encontradas na área de estudo estão enquadradas em 5 diferentes índices: de 1,5m a 4,6m (índice 9), de 4,6m a 9,1m (índice 7), de 9,1m a 15,2m (índice 5), de 15,2m a 22,9m (índice 3) e de 22,9m a 30,5m (índice 2).

Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst* (opção *Inverse Distance Weighted* - IDW). Após a elaboração desse mapa, os intervalos de profundidade foram convertidos em índices específicos, determinados pela metodologia para o parâmetro D com a ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

- R – Recarga do aquífero

Seguindo o conceito fundamental de que a água subterrânea é uma componente indissociável do ciclo hidrológico, sua disponibilidade no aquífero está relacionada diretamente com o escoamento básico da bacia de drenagem instalada sobre sua área de ocorrência. Sendo assim, a água subterrânea constitui uma parcela desse escoamento que, por sua vez, corresponde à recarga transitória do aquífero.

No caso dos aquíferos livres, a recarga média multianual ou ainda o potencial renovável de água subterrânea de uma bacia, corresponde ao volume de água que é drenado pelos rios na forma de seu escoamento básico (CRH, 1999).

A curva de permanência relaciona as vazões em uma bacia com a porcentagem de tempo em que elas serão igualadas ou superadas. Esta relação foi obtida por intermédio do método de regionalização do SIGRH (DAEE), que tem como base séries históricas de vazões com caráter probabilístico. A partir desta curva (Figura 18) é possível obter a vazão com 95% de permanência, mais conhecida como Q95%. Estudos realizados pelo DAEE a fim de

determinar a reserva explotável passível de outorga vêm relacionando o escoamento básico dos rios, escoamento subterrâneo, ao escoamento de aquíferos livres.

Resultado 2: Curva de Permanência

Vazão para "P (%)" de permanência (m^3/s):

P (%)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	75	80	85	90	95	100
Q (m^3/s)	51,306	42,462	35,631	30,878	26,873	24,004	19,764	16,895	14,539	12,677	11,713	10,835	10,043	8,993	7,773	4,775

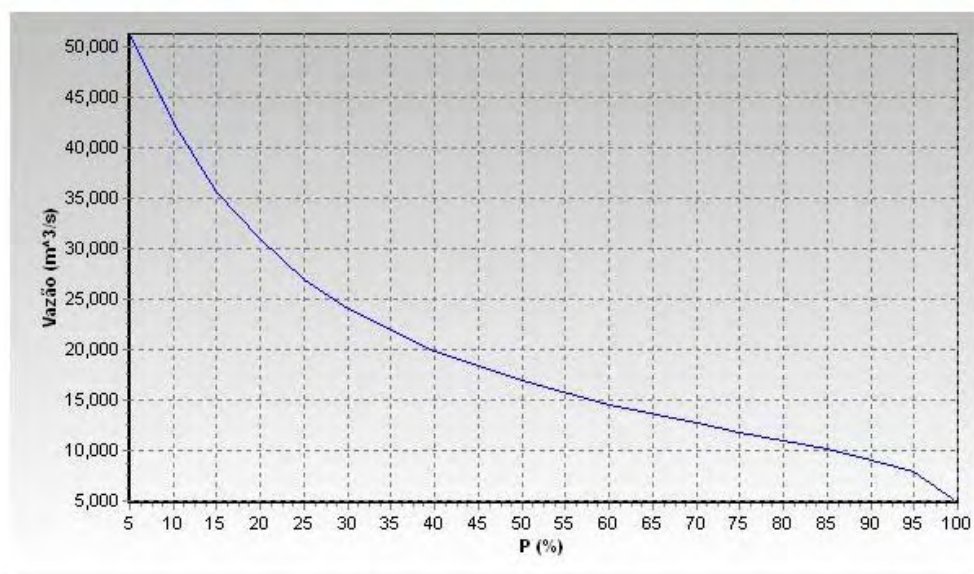


Figura 18 - Curva de Permanência para a bacia do Rio Corumbataí.
Fonte: SIGRH (2012).

Como Q95% equivale a $7,773\text{m}^3/\text{s}$, segundo a curva de permanência, transformando-se esta vazão segundo os índices DRASTIC de recarga, é obtido para a área do aquífero livre de Rio Claro, pertencente à bacia do Rio Corumbataí ($1679,19\text{km}^2$), que a recarga é de $145,98\text{ mm/ano}$. Este valor corresponde ao índice 6, que foi adotado para toda a área de estudo.

- A – Material do aquífero

Esse parâmetro tem o objetivo de considerar como fator determinante na estimativa da vulnerabilidade a capacidade de atenuação do aquífero, relacionada à sua capacidade de influenciar o fluxo de água subterrânea. Esse mapa temático combina a litologia (mapa geológico) e as falhas (mapa de densidade de fraturamento).

Fúlfaro e Suguio (1968, apud OLIVA, 2006) identificaram na Formação Rio Claro duas sequencias principais: a basal, com 20 m de espessura máxima apresenta sucessão de estratos arenosos com intercalações subordinadas de leitos argilosos; e a superior, constituída

dominantemente por sedimentos argilosos, com brechas intraformacionais e lentes arenosas subordinadas.

O trabalho de Aller *et al.* (1987) indica para arenitos, calcários e argilitos estratificados índices entre 5 e 9 e aponta o índice típico 6, no entanto ressalta que ambientes arenosos com quantidade considerável de sedimentos finos podem ter índice 7 atribuído ao parâmetro A.

O mapa de delimitação da Formação Rio Claro foi convertido para o formato raster através da ferramenta *Polygon to Raster* do módulo *Conversion Tools*, que então recebeu a atribuição de peso 7, conforme o índice adotado.

- S – Tipo de solo

O mapeamento pedológico realizado por Prado *et al.* (1981), mostra que no município de Rio Claro ocorrem basicamente três tipos de solos: podzólico vermelho-amarelo, latossolo vermelho-amarelo e latossolo roxo. No entanto, para a área do aquífero livre, foco desta avaliação, ocorre especialmente o latossolo vermelho-amarelo, que atinge profundidades máximas de 10 a 12 m e corresponde ao solo de alteração da Formação Rio Claro.

De acordo com Ferreira (2005), para os perfis de solo da Formação Rio Claro analisados em seu trabalho, a parte mais superficial do terreno é constituída de material arenoso, o que determinou a adoção do índice DRASTIC no valor de 9 para este parâmetro.

- T – Topografia

Este parâmetro tem o objetivo de avaliar a interferência dos declives do terreno na área de estudo. A base do mapa é uma imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) gerado pela Agência Espacial Norte Americana (NASA) em 2000, que possui informações de um modelo digital de elevação do terreno. A base de dados é disponibilizada no Brasil pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Para transformar a base digital de elevação no mapa de declives, utilizou-se a ferramenta *Surface Analysis* do módulo *Spatial Analyst*, com a opção *Slope*. Com isto, o mapa de declividade do terreno foi reorganizado em intervalos correspondentes aos índices de T determinados pelo método.

- I – Impacto da zona não saturada

Os materiais presentes na zona não saturada são importantes para a atenuação do potencial de poluição ou contaminação do aquífero.

Como descreveu Zaine (1994), a Formação Rio Claro apresenta como características marcantes: fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso e domínio de litotipos arenosos, esbranquiçados amarelados e avermelhados, variando de areia fina a grossa, com intercalação de camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. Dessa forma, foi adotado o índice típico 6 para este parâmetro.

- C – Condutividade hidráulica

Esse índice corresponde à quantidade de água que passa através dos poros do aquífero livre e foi obtido de duas maneiras: a primeira, por meio de dados experimentais disponíveis em Oliva (2002) e a segunda por intermédio da estimativa de parâmetros hidrológicos utilizando-se métodos geofísicos, como descreve o item 4.1. do capítulo 4, anteriormente apresentado.

Seguindo a mesma lógica do índice D, foi elaborado para a condutividade hidráulica, um mapa com as áreas de influência dos pontos considerados usando a ferramenta *Interpolate to Raster* do módulo *Spatial Analyst*, onde a opção *Inverse Distance Weighted* (IDW) é selecionada. Posteriormente, os intervalos de condutividade foram reordenados para terem relação com os índices propostos pela metodologia, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst* do software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

Com os mapas individuais contendo os valores dos índices determinados pelo método, a etapa seguinte consistiu na multiplicação dos mesmos com seus respectivos pesos:

$$\text{DRASTIC} = D_p \times D_i + R_p \times R_i + A_p \times A_i + S_p \times S_i + T_p \times T_i + I_p \times I_i + C_p \times C_i$$

Onde:

p = peso atribuído a cada parâmetro;

i = índice atribuído ao elemento.

Para realizar esse cálculo foi utilizado o software ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006), aplicando-se a ferramenta *Weighted Sum* do módulo *Spatial Analyst* (*Overlay*) e assim obtido o mapa de vulnerabilidade a partir do método DRASTIC. Essa ferramenta permite, também, a

atribuição de pesos e importância relativa aos mapas e a combinação de múltiplos fatores, possibilitando uma análise integrada.

4.4. MODELO DE INFILTRAÇÃO

A vulnerabilidade depende sobretudo da capacidade de transmissão de água através da cobertura ou da zona não saturada acima do aquífero: se a camada superior for impermeável, o aquífero estará bem protegido, caso contrário, o risco existirá e será tanto maior quanto maior for a quantidade de água que ela possa transmitir. Portanto, a caracterização da infiltração pela cobertura é crucial no estudo da vulnerabilidade e riscos de contaminação de um aquífero e constituirá uma aproximação mais precisa do que as aproximações anteriores.

A partir dos dados de precipitação e dos dados da variação da altura do nível freático, foi desenvolvido um programa inverso, que permitiu a estimativa da condutividade hidráulica da camada de cobertura do aquífero. A espessura da cobertura é determinada pelos modelos que se utilizam de determinações efetuadas por meio de SEVs, conforme citado anteriormente.

4.4.1. Problema direto

Para realizar essa etapa do trabalho, inicialmente foram obtidos dados de monitoramento do nível d'água subterrâneo apresentados em Neto (2006). A avaliação foi realizada em dois poços de monitoramento localizados no campus da Unesp de Rio Claro: Poço IGCE-3 (7.521.003m N; 237.634m E) e Poço IGCE-6 (7.521.094m N; 237.575m E), nos períodos de 01 de janeiro de 2002 a 31 de março de 2004 e desta data a 31 de dezembro de 2005, respectivamente.

Este autor demonstrou a relação temporal entre a pluviometria e a recarga do aquífero, concluindo que o tempo médio de infiltração é de 87 dias no local monitorado.

Para a confirmação da validade dos 87 dias citados, o PhD Fernando A. Monteiro dos Santos, professor da Universidade de Lisboa, desenvolveu um algoritmo em linguagem de programação FORTRAN (acrônimo da expressão *IBM Mathematical FORMula TRANslation System*) seguindo o método das diferenças finitas. Os dados foram separados por sua natureza

em dois grupos de dados para inserção no programa: variáveis de precipitação e variáveis do modelo do terreno. As variáveis consideradas foram as seguintes:

- Duração da precipitação: período em horas, em que ocorreu a precipitação;
- Precipitação média: valor médio da chuva que ocorreu no período estudado em mm;
- Porcentagem de infiltração: porcentagem do fluxo de água em subsuperfície que atravessa a zona de aeração em direção ao nível freático no local.

A infiltração adotada para o andamento do programa foi de 5%, e está próxima de estudos realizados no campus da UNESP de Rio Claro (BARBOSA, 2010);

- Tempo de modelação: tempo para obtenção de resultados da quantidade de água e condutividade hidráulica para cada nível de profundidade, que pode ser maior que o período de duração da chuva;
- Passo temporal: intervalo de tempo no qual é subdividido o tempo de modelação para interpolação dos dados (em segundos).

Para calibração do modelo, foram realizados testes com os valores de passo temporal iguais a 10, 20, 30, 40, 50 e 60 segundos, não havendo diferença nos resultados obtidos para cada um deles. Assim, foi adotado o valor de 60 segundos;

- Espessura: distância da superfície do solo até o nível d'água subterrâneo (em metros). Segundo Neto (2006), o nível d'água subterrâneo dos poços IGCE-3 e IGCE-6 encontra-se a 7,74 metros e 10,06 metros, respectivamente;
- Número de nós: representa os intervalos de profundidade em que será subdividida a espessura da zona não saturada, para que haja o processamento detalhado de toda a malha;
- Carga inicial: carga hidráulica (h, em metros);
- Condutividade hidráulica da zona não saturada (K_s): o valor de condutividade hidráulica média para a área situa-se entre 10^{-4} e 10^{-5} m/s, segundo Oliva *et al.*, (2005); e
- Theta inicial: corresponde à saturação inicial, obtida através da equação 15.

O programa gera então, um conjunto de dados que traduz o que se passa ao longo do perfil estudado. A camada de solo presente acima do nível d'água inicial do aquífero foi subdividida em 100 intervalos de profundidade e cada intervalo recebe a informação de

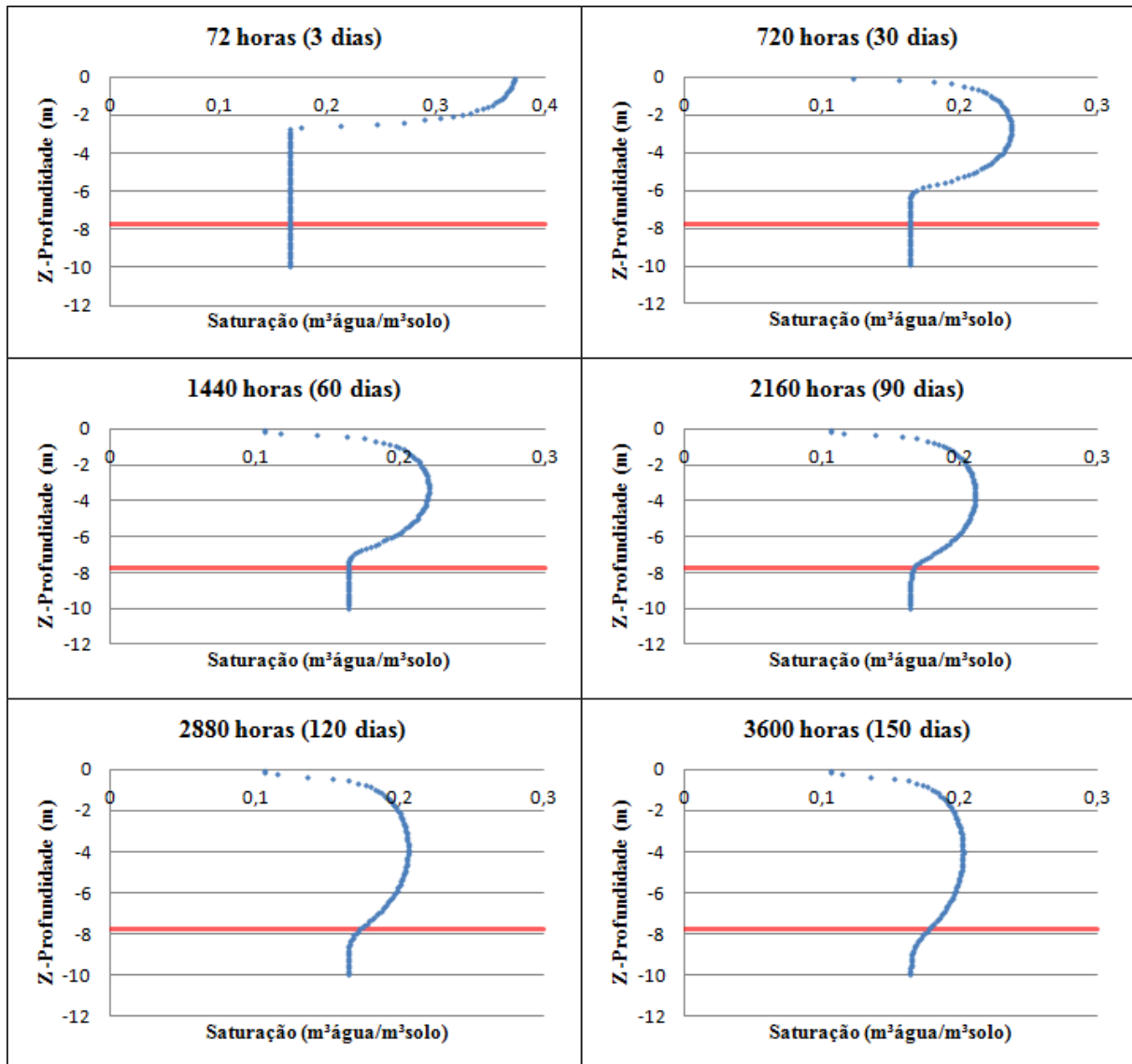
quantidade de água e condutividade hidráulica locais. A partir disso é possível verificar o momento em que ocorre a primeira elevação do nível d'água subterrâneo, realizando testes de aplicação do programa para diferentes períodos de modelação.

Para a validação, foram avaliadas as características do perfil monitorado após um período de chuva entre 01 de agosto de 2002 a 03 de agosto de 2002 no poço IGCE-3 (Neto, 2006). A escolha é justificada pelo fato de haver pouca ou nenhuma precipitação nos 2 meses antecedentes a esse período, o que diminui a interferência de recarga do aquífero por outras precipitações que não as selecionadas. Os dados inseridos no algoritmo estão na tabela 5.

Tabela 5 - Variáveis adotadas na aplicação do modelo de diferenças finitas para a validação da determinação da taxa de infiltração no aquífero livre.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Variáveis do modelo no terreno	Espessura	10	m
	Número de nós	100	-
	Carga Inicial	-100	m
	Condutividade Hidráulica	$1,56 \cdot 10^{-4}$	m/s
	Saturação inicial	0,1694	m ³ água/m ³ solo
Variáveis de precipitação no modelo	Duração da precipitação	72	h
	Precipitação média	34,8	mm
	Infiltração	5	%
	Tempo de modelação	72; 720; 1440; 2160; 2880; 3600	h
	Passo temporal	60	s

Houve uma correspondência numérica dos dados de precipitação com as demais variáveis com os resultados obtidos pelo programa (Figura 19), e a confirmação dos 87 dias citados por Neto (2006) como período médio de chegada ao aquífero da água proveniente de precipitação.



— NA inicial (7,74m)

Figura 19 - Gráficos gerados a partir de resultados da aplicação do problema direto (método das diferenças finitas) após a precipitação de 01 a 03 de agosto de 2002 no poço IGCE-3.

4.4.2. Problema Inverso

4.4.2.1. Validação

A validação do método de minimização global *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK, 1983) para resolução do problema inverso foi realizada com dados sintéticos.

Inicialmente foram utilizados dados de entrada resultantes do problema direto, que permitiu verificar a condição da camada não saturada ao final de períodos previamente determinados.

Para isto, foram realizados testes no programa que forneceu como resultado as elevações do nível d'água subterrâneo em 6 diferentes intervalos de tempo: 72, 720, 1440, 2160, 2880 e 3600 horas após a primeira chuva do período entre 01 de agosto e 03 de agosto de 2002.

Como o programa para a resolução do problema direto fornece a quantidade de água presente em cada estrato da zona não saturada, a elevação da coluna d'água foi calculada de acordo com a equação 26 (Figura 20).

$$\text{Elevação} = (S_{7,75} - S_o) + (S_{7,85} - S_o) + (S_{7,95} - S_o) + \dots + (S_{9,95} - S_o) \quad (26)$$

Onde:

S = saturação em cada intervalo de profundidade (nó).

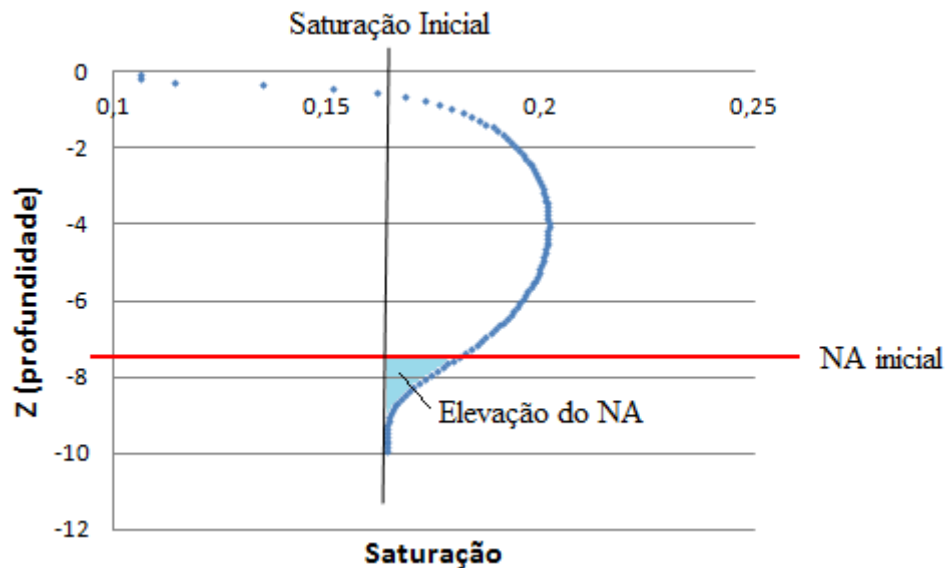


Figura 20 - Saturação x Profundidade (tempo = 3600 horas).

Com a aplicação do programa de minimização global utilizando-se o método simulated annealing - SA, foram gerados resultados de elevação da coluna d'água nos mesmos períodos. Esses dados de saída foram utilizados então como entrada para a validação do modelo.

Os resultados obtidos fornecem a correlação da variável a ser medida em função do parâmetro a ser estimado. E, desta forma, as variáveis do modelo SA.

Os dados sintéticos utilizados como entrada para a validação estão listados na tabela 6. Foi adotada uma condutividade hidráulica qualquer, com o objetivo de verificar a resolução correta do parâmetro adotado no programa.

Após sua execução, o programa forneceu dados de saída (tabela 6). É possível verificar então, que o erro calculado é igual a $1,12 \cdot 10^{-3}$, os valores de elevação observados (entrada) e os calculados (saída) são muito próximos e a condutividade hidráulica calculada é igual a $1,55 \cdot 10^{-4}$. A condutividade hidráulica utilizada como entrada no início da validação (problema direto) foi de $1,56 \cdot 10^{-4}$, portanto, o programa de resolução do problema inverso por processo minimização global Simulated Annealing é válido.

Tabela 6 - Variáveis adotadas na aplicação do modelo de minimização global SA para a validação.

	Parâmetro	Valor de entrada	Valor de saída	Unidade
Variáveis do terreno no modelo	Espessura	10	-	m
	Nível freático	7,74	-	m
	Número de nós	100	-	-
	Passo temporal	60	-	s
	Carga Inicial	-100	-100	m
	Condutividade Hidráulica	$2,0 \cdot 10^{-4}$ (Mín= $1,0 \cdot 10^{-6}$, Máx= $2,8 \cdot 10^{-3}$)	$1,55 \cdot 10^{-4}$	m/s
	Saturação inicial	0,1694	0,1106	m ³ água/m ³ solo
Variáveis de precipitação no modelo	Duração da precipitação	72	-	h
	Precipitação média	34,8	-	mm
	Infiltração	5	-	%
	Tempo de modelação	72; 720; 1440; 2160; 2880;	-	h
	Evaporação	$0,05556 \cdot 10^{-6}$	-	m/s
	Nº de valores de elevação; elevação de referência	5; 0	-	-
	1. Tempo de elev; elev	72; 0,07258	72; 0,07289	h; m

	2. Tempo de elev; elev	720; 0,1479	720; 0,1486	h; m
	3. Tempo de elev; elev	1440; 0,2273	1440; 0,2283	h; m
	4. Tempo de elev; elev	2160; 0,311	2160; 0,3124	h; m
	5. Tempo de elev; elev	2880; 0,399	2880; 0,4012	h; m
	Temperatura inicial	5	-	°C
	Nº de iterações internas	50	-	-
	Nº de iterações externas	40	-	-

4.4.2.2. Aplicação Prática

O programa de computador com o método de minimização global SA para resolução do problema inverso foi executado para diferentes intervalos de tempo selecionados do monitoramento do nível freático de NETO (2006), a fim de obter a condutividade hidráulica da zona não saturada.

A seleção dos dados trabalhados ocorreu de maneira a avaliar os efeitos de uma determinada precipitação que ocorreu de forma concentrada após um período de pouca ou nenhuma chuva. Esta é a situação ideal, pois evita que os resultados sejam influenciados por uma entrada de água que não tenha sido considerada no modelo. Os períodos de chuva considerados foram os seguintes:

1. 01 a 03 de agosto de 2002;
2. 08 a 12 de outubro de 2003;
3. 27 de setembro a 26 de outubro de 2004.

A figura 21 indica a relação entre a pluviosidade e a elevação/rebaixamento da coluna d'água nos poços IGCE-3 e IGCE-6 ao longo de um período de quatro anos. Os períodos selecionados para análise referem-se sempre a períodos posteriores a uma estiagem e relacionados com o início da ascensão do nível d'água subterrâneo.

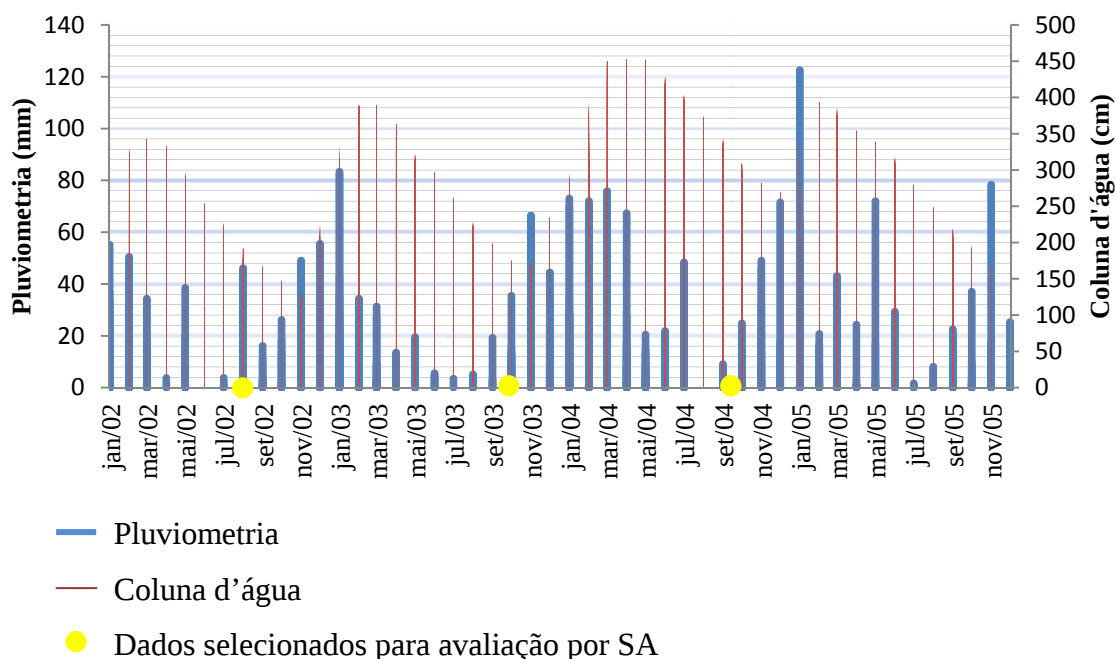


Figura 21 - Relação entre pluviosidade e coluna d'água para os poços IGCE-3 e IGCE-6.

Em cada caso, a elevação do NA adotada foi obtida através da subtração do valor da altura da coluna d'água em um dado momento pelo nível de referência adotado. Este nível de referência é o valor de coluna d'água no momento em que o NA começa a aumentar (aproximadamente 87 dias após a precipitação).

Para o primeiro e terceiro períodos selecionados, o nível de referência foi muito evidente, pois refere-se ao momento em que a coluna d'água começa a sofrer elevação após períodos de 108 e 89 dias de queda, respectivamente após a primeira chuva selecionada. No caso do segundo período, já havia ocorrido pequenas precipitações dispersas que elevaram o NA. No entanto, a elevação mais considerável ocorreu 87 dias após a primeira chuva selecionada (em 27 de setembro de 2004).

Os níveis de referência, precipitação média e elevações estudadas para cada período estão na tabela 7.

Tabela 7 - Dados de entrada utilizados no método do Problema Inverso para cálculo da taxa condutividade hidráulica no aquífero livre.

Período	Precipitação Média (mm)	Tempo (h)	Elevação (m)	Nível de Referência (Coluna d'água – cm)
01 a 03 de agosto de 2002	34,8	2592	0	119,36
		2832	0,0725	
		3072	0,2283	
		3312	0,4703	
08 a 12 de outubro de 2003	65,2	2208	0	240,76
		2448	0,2018	
		2688	0,4306	
		2928	0,6966	
27 de setembro a 26 de outubro de 2004	4,08	2136	0	260,47
		2376	0,0454	
		2616	0,1760	
		2856	0,3163	
		3096	1,0171	

Os demais parâmetros de entrada do programa foram os mesmos adotados na validação: número de nós, saturação inicial, tensão inicial, infiltração, evaporação, temperatura inicial e número de iterações. Excetuando o período de 27 de setembro a 26 de outubro de 2004, quando o monitoramento foi realizado no poço IGCE-6, a espessura da zona não saturada é igual a 10,6 metros,

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

Os parâmetros hidrológicos calculados a partir dos dados de resistividade dos ensaios de sondagens elétricas verticais forneceram valores coerentes aos observáveis em ambientes arenosos, como é o caso da Formação Rio Claro.

O número de ensaios geofísicos realizados por Oliva (2006) e selecionados para esse cálculo é maior que o número de pontos com informações de condutividade hidráulica (k) obtidas em campo por Oliva (2002) (Figura 22).

Na parte central da área não há divergência de resultados, embora haja deficiência de dados a nordeste, algo que inviabiliza a comparação. No entanto, é notável que na parte sudeste da área de ocorrência do aquífero livre, os índices de condutividade hidráulica calculado são mais elevados, apesar de haver também no primeiro mapa uma tendência de elevação dos valores desse parâmetro nessa região. As maiores diferenças são observadas a sudoeste e no norte da área de ocorrência da Formação Rio Claro.

É preciso ressaltar que os dois métodos de obtenção da condutividade hidráulica avaliam esse parâmetro hidrológico a diferentes profundidades. Para Oliva (2006), os resultados obtidos pelo método Guelph forneceram valores que prevaleceram entre $1,96 \times 10^{-3}$ cm/s e $3,9 \times 10^{-3}$ cm/s, e textura variando de arenosa a silto-arenosa, mostrando pequena variação faciológica na zona não saturada a aproximadamente 0,50 m de profundidade, na escala de município.

No caso dos valores de K obtidos através dos cálculos efetuados em função das resistividades obtidas pelas SEVs, foi considerada toda a espessura da zona não saturada. Essa análise forneceu valores na faixa de $1,53 \cdot 10^{-5}$ m/s e $8,04 \cdot 10^{-4}$ m/s. É necessário realçar que em termos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero livre, o ideal é considerar toda a camada sobreposta à zona saturada.

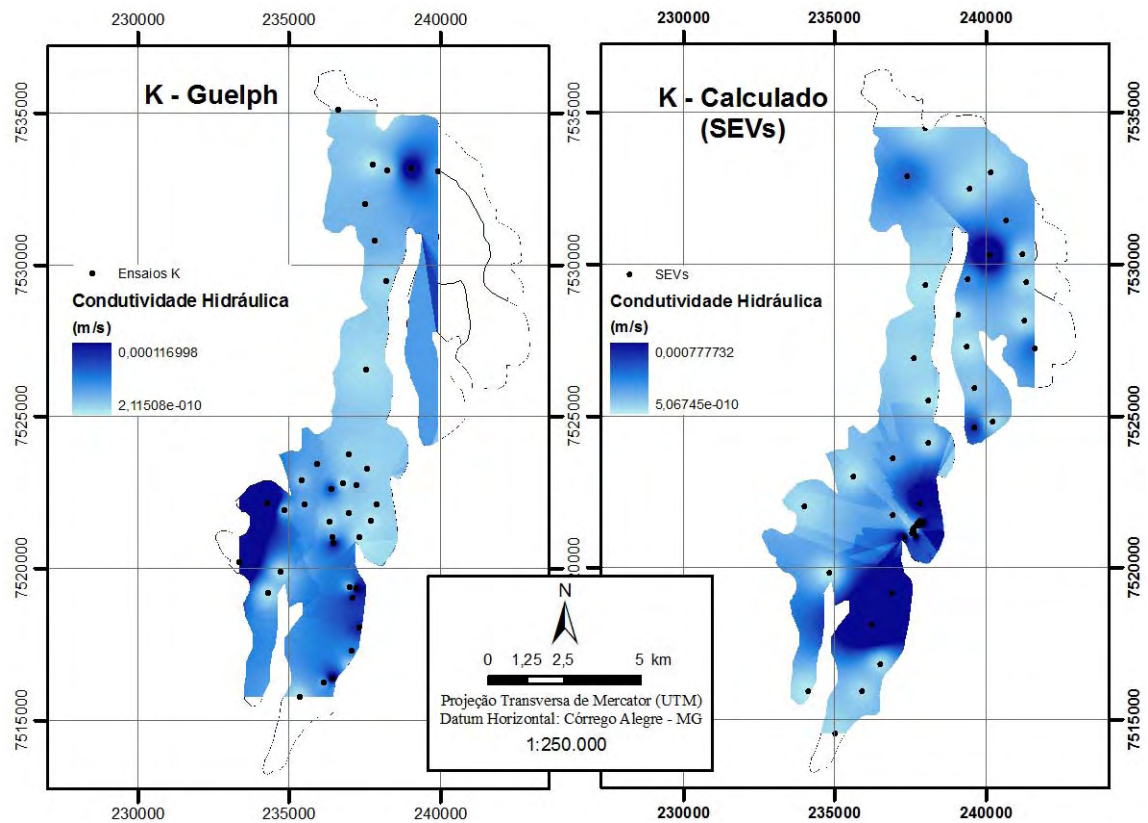


Figura 22 - Mapas de comparação entre K medido e K calculado para o aquífero livre na Formação Rio Claro.

A tabela 8 apresenta a síntese dos resultados obtidos pelo uso da equação de Kozeny-Carman-Bear (Bear, 1972) aplicada aos dados de resistividade elétrica fornecidos pelos ensaios geofísicos. A SEVs numeradas com a precedência da letra “O” tem origem de Oliva (2006), e as acompanhadas da letra “B”, são provenientes de Braga (1997).

Tabela 8 - Parâmetros hidrológicos calculados (equação de Kozeny-Carman-Bear).

SEV	ρ saturada ($\Omega.m$)	ρ não saturada ($\Omega.m$)	Diâmetro médio dos grãos (m)	Saturação Inicial (m³ água/m³ solo)	K (m/s)	Prof. NA (m)	Condutância Longitudinal (Siemens)	Resistência Transversal (Ω/m^2)
O-04	219,20	2778,60	0,00038	0,28087	7,07E-05	15,3	0,02708	18763,968
O-15	68,90	1685,30	0,00033	0,20219	4,21E-04	4,34	0,00362	6617,818
O-29	253,10	2215,40	0,00033	0,338	5,87E-05	20,68	0,01183	42141,832
O-36	242,80	6036,40	0,00033	0,20055	1,96E-05	9,61	0,00171	54863,428
O-41	68,00	1327,00	0,00033	0,22637	5,96E-04	13,12	0,0484	9726,933
O-50	142,20	3640,30	0,00033	0,19764	6,45E-05	16,15	0,0177	23672,427
O-72	272,20	365,90	0,00033	0,8625	5,19E-04	10,16	0,0228	5356,786
O-97	134,50	1934,60	0,00033	0,26367	1,48E-04	3,56	0,00537	6278,227
O-101	142,10	758,20	0,00033	0,43291	4,66E-04	4,01	0,00836	2920,26
O-103	53,10	6550,50	0,00033	0,09003	1,04E-04	12,42	0,00633	107831,889
O-116	202,50	1827,70	0,00033	0,33285	9,62E-05	15,73	0,013	26651,147
O-123	107,90	2391,00	0,00033	0,21243	1,50E-04	11,44	0,00614	26923,887
O-124	110,00	1032,60	0,00033	0,32638	4,33E-04	14,64	0,01535	14772,908
O-245	206,90	1320,80	0,00033	0,39578	1,39E-04	8,57	0,00866	13983,917
O-246	226,70	322,80	0,00033	0,83802	8,04E-04	9,05	0,02543	9728,907
O-255	164,50	774,20	0,00033	0,46095	3,71E-04	12,62	0,01703	19087,84
O-261	225,20	774,20	0,00033	0,53933	2,46E-04	8,99	0,00862	16194,343
O-271	274,40	902,40	0,00033	0,55143	1,57E-04	11,58	0,01086	18913,764
O-283	227,90	763,70	0,00033	0,54627	2,46E-04	13,33	0,01642	18983,596
B-01	157,50	8465,40	0,00033	0,1364	2,18E-05	13,8	0,01359	58672,152
B-02	166,03	7208,40	0,00033	0,15176	2,46E-05	15,1	0,0133	54181,43
B-03	87,80	3878,70	0,00033	0,15045	1,06E-04	17,9	0,00861	50034,544
B-04	55,78	6804,60	0,00033	0,07263	5,53E-05	16,8	0,01138	47550,588
B-05	66,41	7176,70	0,00033	0,09619	7,11E-05	20,5	0,01501	54530,794
B-06	135,66	8695,80	0,00033	0,1249	2,50E-05	22,8	0,0287	35937,553
B-07	173,19	10571,00	0,00033	0,12799	1,53E-05	19,65	0,01648	41636,349
B-08	134,20	4673,80	0,00033	0,16944	5,15E-05	18,82	0,0372	14316,706
B-15	287,96	928,12	0,00033	0,55701	1,43E-04	12,42	0,01435	11289,03
B-16	287,96	1066,70	0,00033	0,51957	1,21E-04	10,93	0,0114	11320,261

SEV = Sondagem Elétrica Vertical

 ρ = Resistividade Elétrica

K = Condutividade Hidráulica

Prof NA = Profundidade do nível d'água subterrâneo

5.2. MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO GOD

Os mapas individuais para os parâmetros G e O não estão apresentados, pois a totalidade da área do aquífero livre em Rio Claro apresenta índices adotados únicos, visto que não há confinamento e os litotipos são, no geral, arenosos e pouco consolidados.

Apesar da variação considerável nos valores de profundidade do nível d'água subterrâneo, o método GOD limitou os intervalos a três índices (Figura 23). Os valores calculados para este parâmetro, D, variam de 0,6 a 1,0.

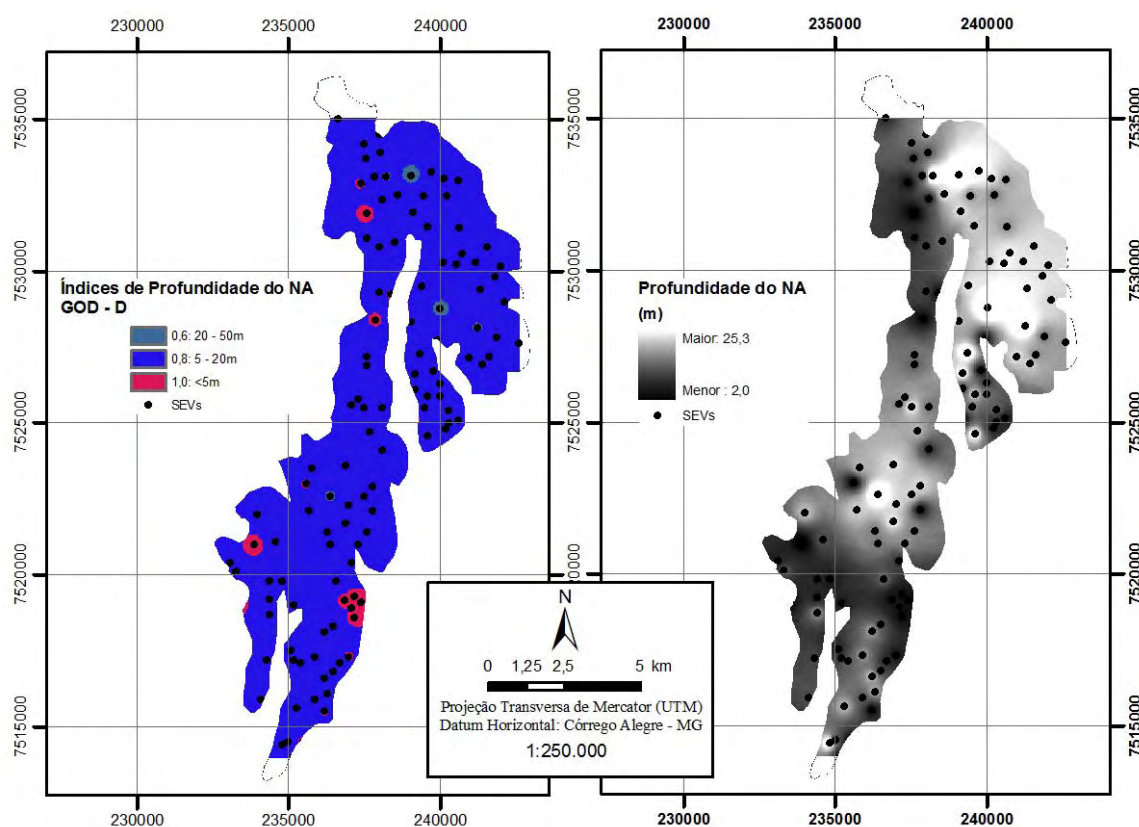


Figura 23 - Distribuição espacial do parâmetro D do método GOD para o aquífero livre na Formação Rio Claro.

O mapa síntese dos parâmetros grau de confinamento da água subterrânea, litologia da zona não saturada e profundidade do nível d'água, resultou em uma avaliação muito homogênea para a área de estudo. Grande parte do aquífero livre recebeu classificação de alta vulnerabilidade, com pequenos trechos denominados médios e extremamente vulneráveis.

O resultado da multiplicação das variáveis é coerente, pois corresponde com a avaliação efetuada por IG/CETESB//DAEE (1997) e publicada pela Resolução SMA 014 de

05/03/2010, que caracteriza o aquífero livre no município de Rio Claro como altamente vulnerável (Figura 24).

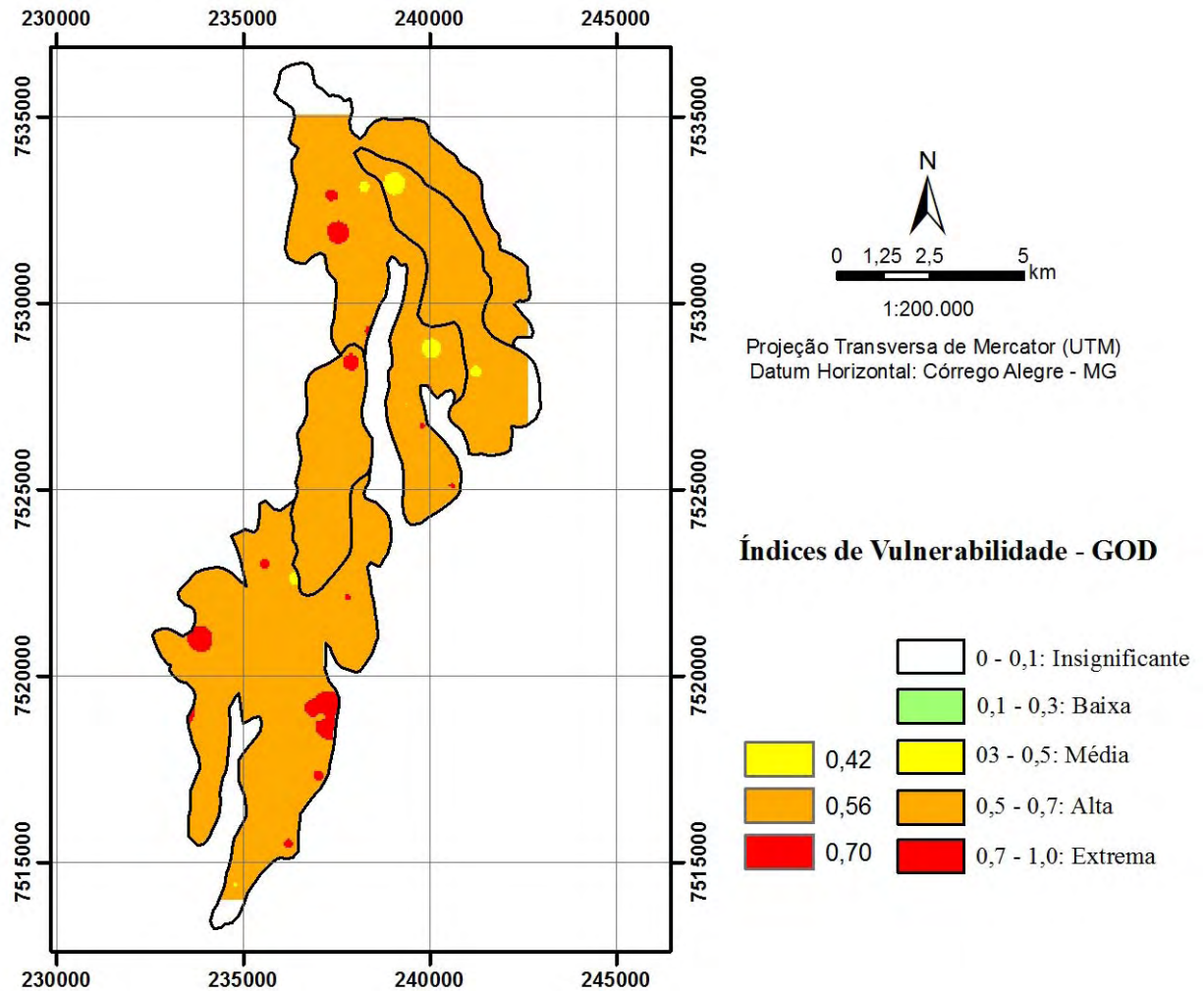


Figura 24 - Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultante da utilização do método GOD.

5.3. MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE COM A APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC

Os mapas individuais para os parâmetros R, A, S e I não estão apresentados, pois a totalidade da área do aquífero livre em Rio Claro apresenta valores únicos para os índices adotados, visto que a recarga encontrada, o material do aquífero, tipo de solo e material da zona não saturada são os mesmos em toda a extensão da área estudada.

Foram encontrados cinco dos sete possíveis intervalos de profundidade do nível d'água subterrâneo classificados pelo método DRASTIC para o parâmetro D, sendo a menor

profundidade igual a 2 metros e a maior, 25,3 metros, com índices que variam de 2 a 9 (Figura 25).

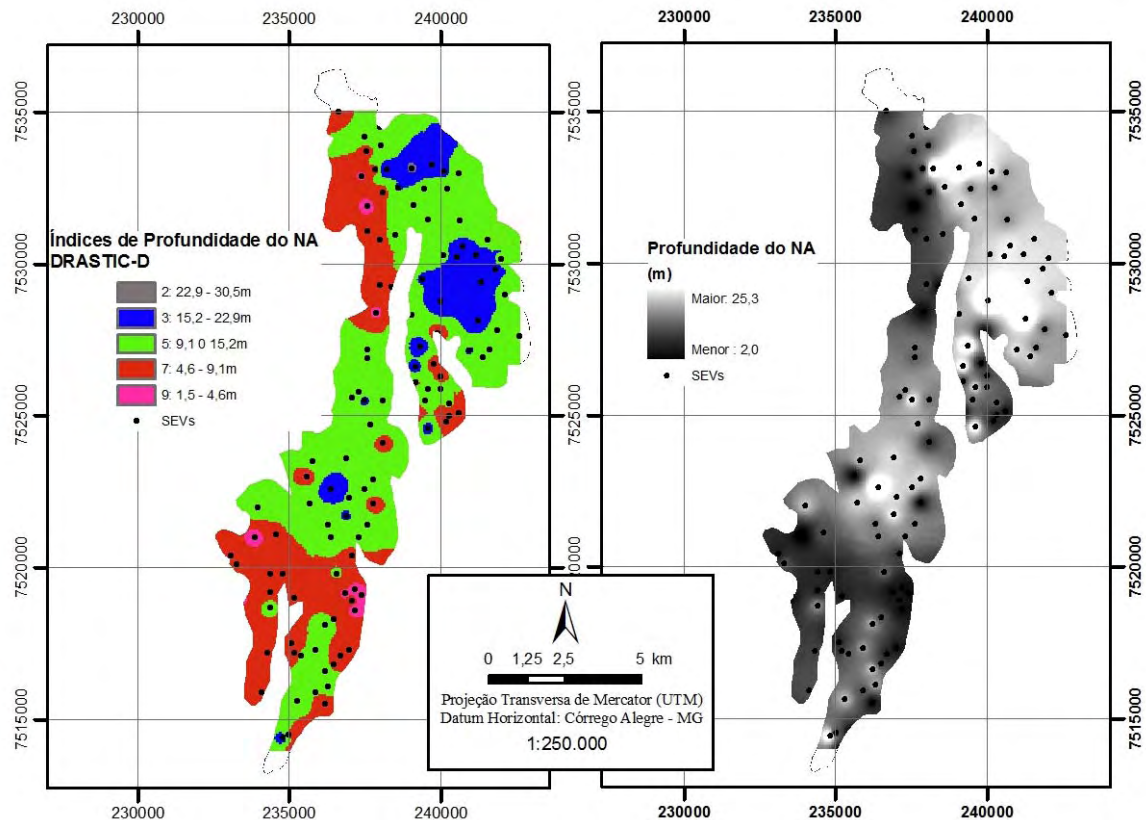


Figura 25 - Distribuição espacial dos índices DRASTIC do parâmetro D para o aquífero livre na Formação Rio Claro.

A topografia da área estudada é pouco variável, com declividade máxima não ultrapassando os 12%. Dos cinco possíveis intervalos de declividade classificados pelo método DRASTIC para o parâmetro T, predominam os três de maior impacto no cálculo da vulnerabilidade (Figura 26).

Para o mapa do parâmetro C houve concentração de maiores índices de condutividade hidráulica na parte sul da área (Figura 27). Esse índice foi o que apresentou maior variabilidade.

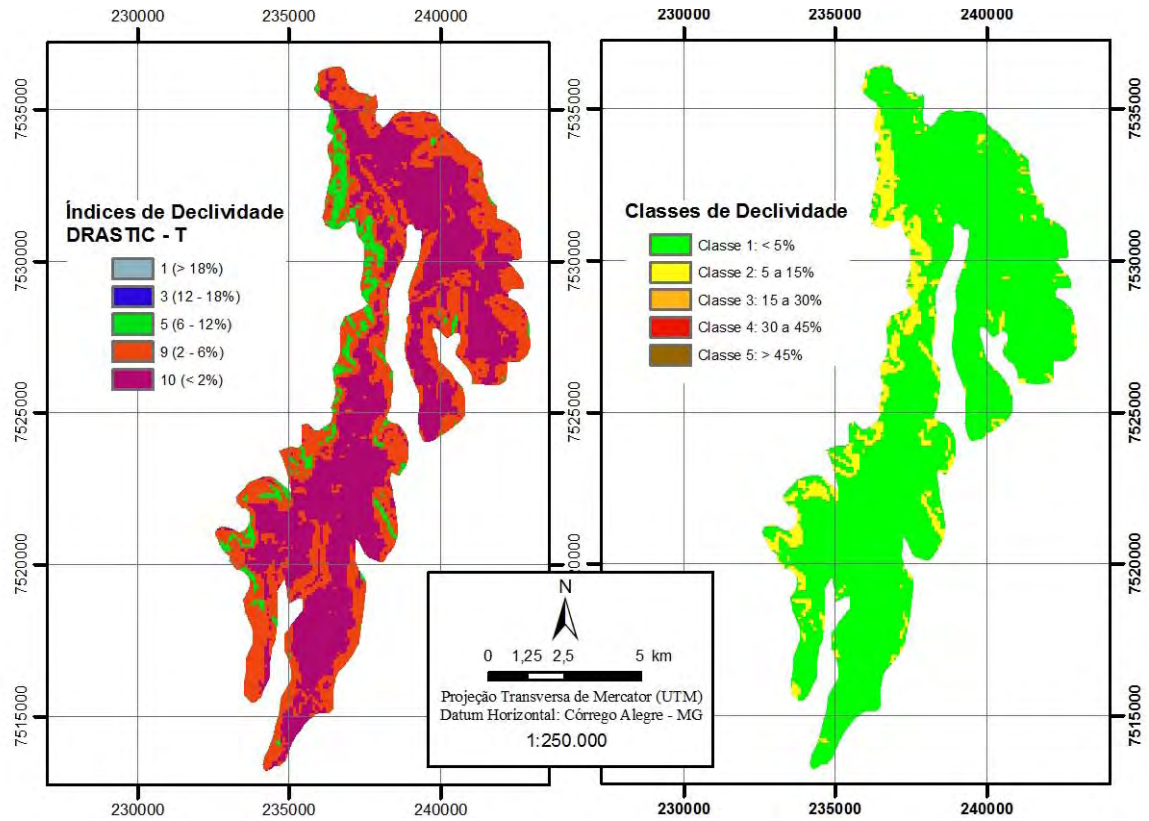


Figura 26 - Distribuição espacial dos índices DRASTIC do parâmetro T para o aquífero livre na Formação Rio Claro.

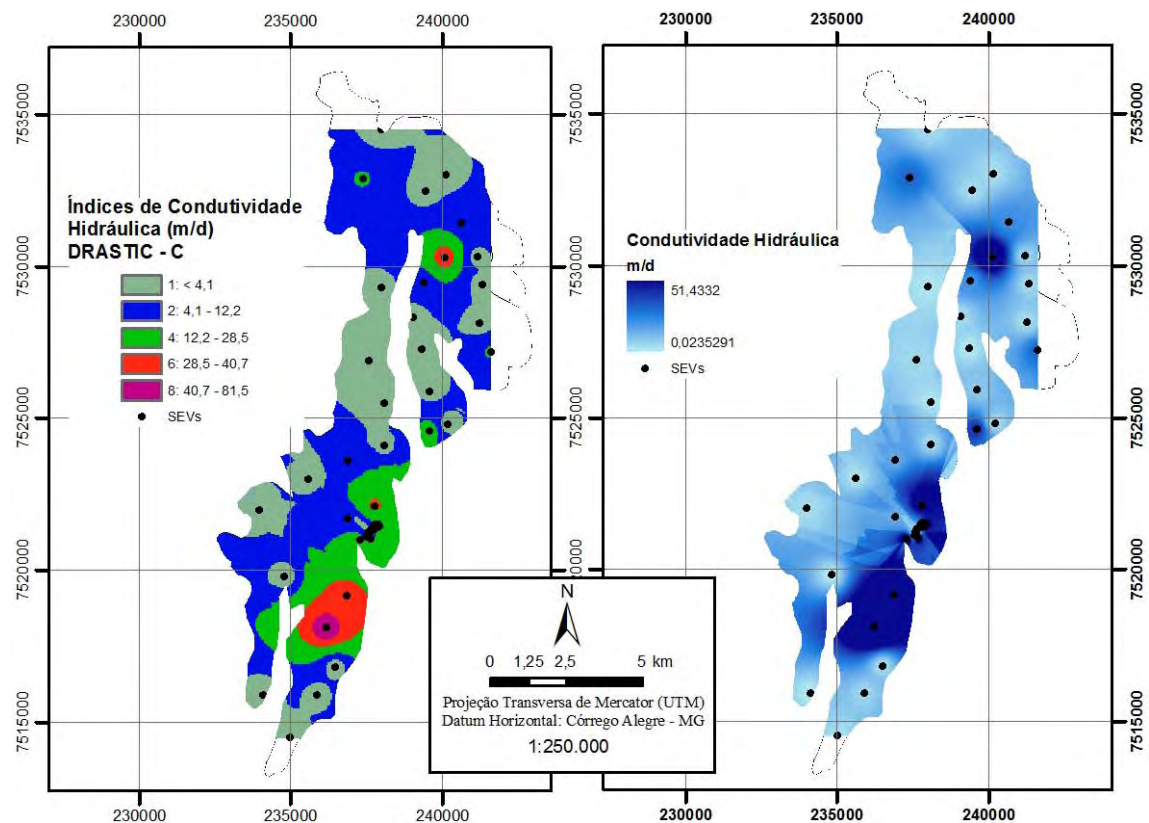


Figura 27 - Distribuição espacial dos índices DRASTIC do parâmetro C para o aquífero livre na Formação Rio Claro.

O mapa síntese dos sete parâmetros considerados no método DRASTIC quais sejam: profundidade do nível d'água, recarga e material do aquífero, solo, topografia, impacto da zona não saturada e condutividade hidráulica é apresentado na figura 28. A maior parte da área do aquífero livre recebeu classificação de baixa e moderada vulnerabilidade, com alguns fragmentos de muito baixa e alta.

A caracterização da vulnerabilidade obtida por este método é menos generalista que a obtida pelo método GOD, pois considera em sua avaliação parâmetros que permitem representar melhor a variabilidade das características naturais na extensão da área de estudo.

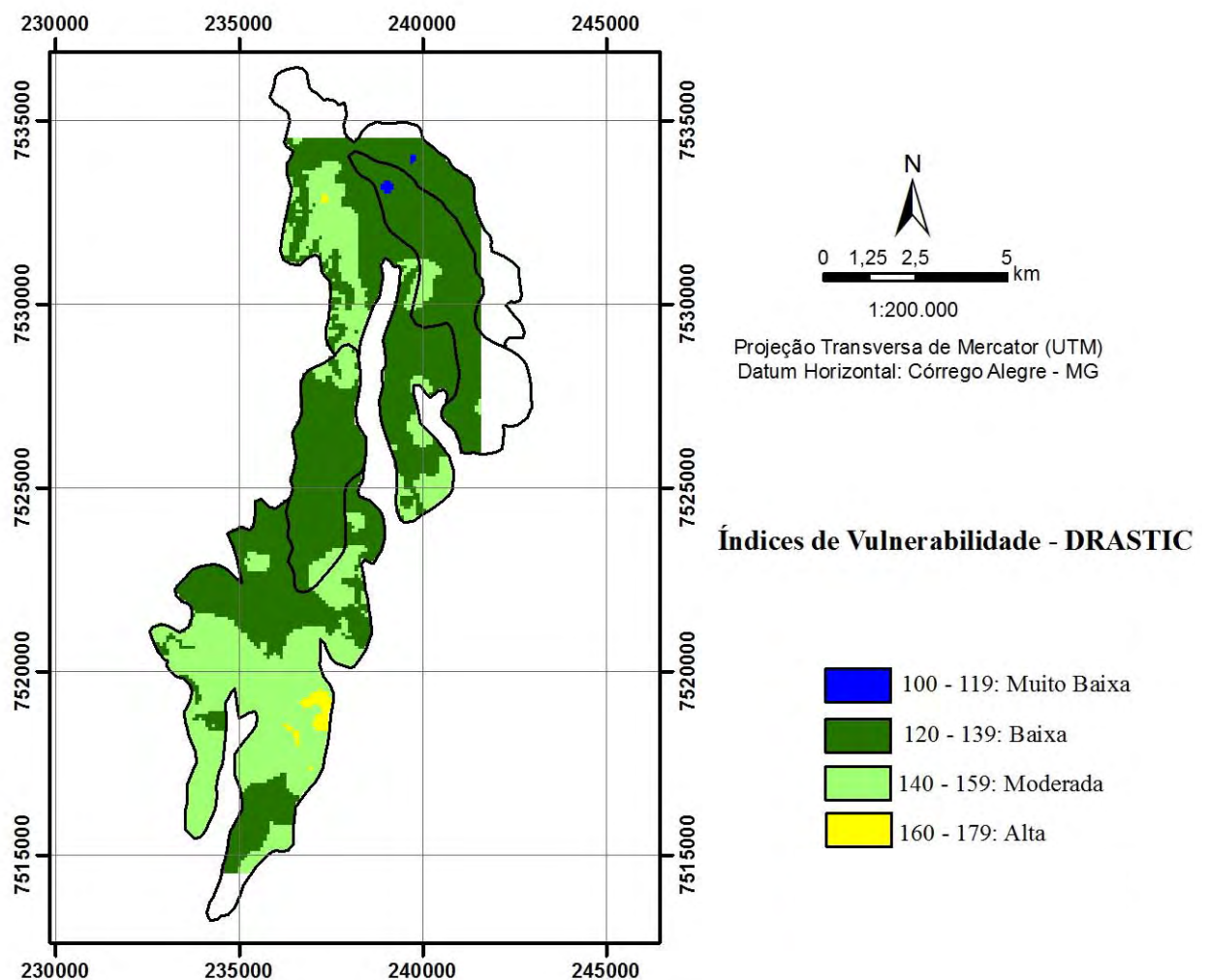


Figura 28 - Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultante da utilização do método DRASTIC.

Quanto maior o índice DRASTIC, maior o perigo potencial de poluição da água subterrânea em um cenário de ameaça. Este índice indica um valor numérico relativo, que possa ser facilmente comparado a um valor obtido para outra configuração quer na mesma

região, ou em uma região diferente. Um valor numérico isolado não tem qualquer significado intrínseco, só tem valor quando comparado aos índices DRASTIC gerados para outras áreas.

5.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS DRASTIC E GOD

A fim de comparar os resultados obtidos pelos métodos DRASTIC e GOD, a escala do primeiro, que varia de 23 a 226, foi normalizada para correspondência com a do índice GOD, de 0 a 1. A normalização foi realizada pela divisão de cada índice DRASTIC pelo valor máximo dos elementos (Figura 29).

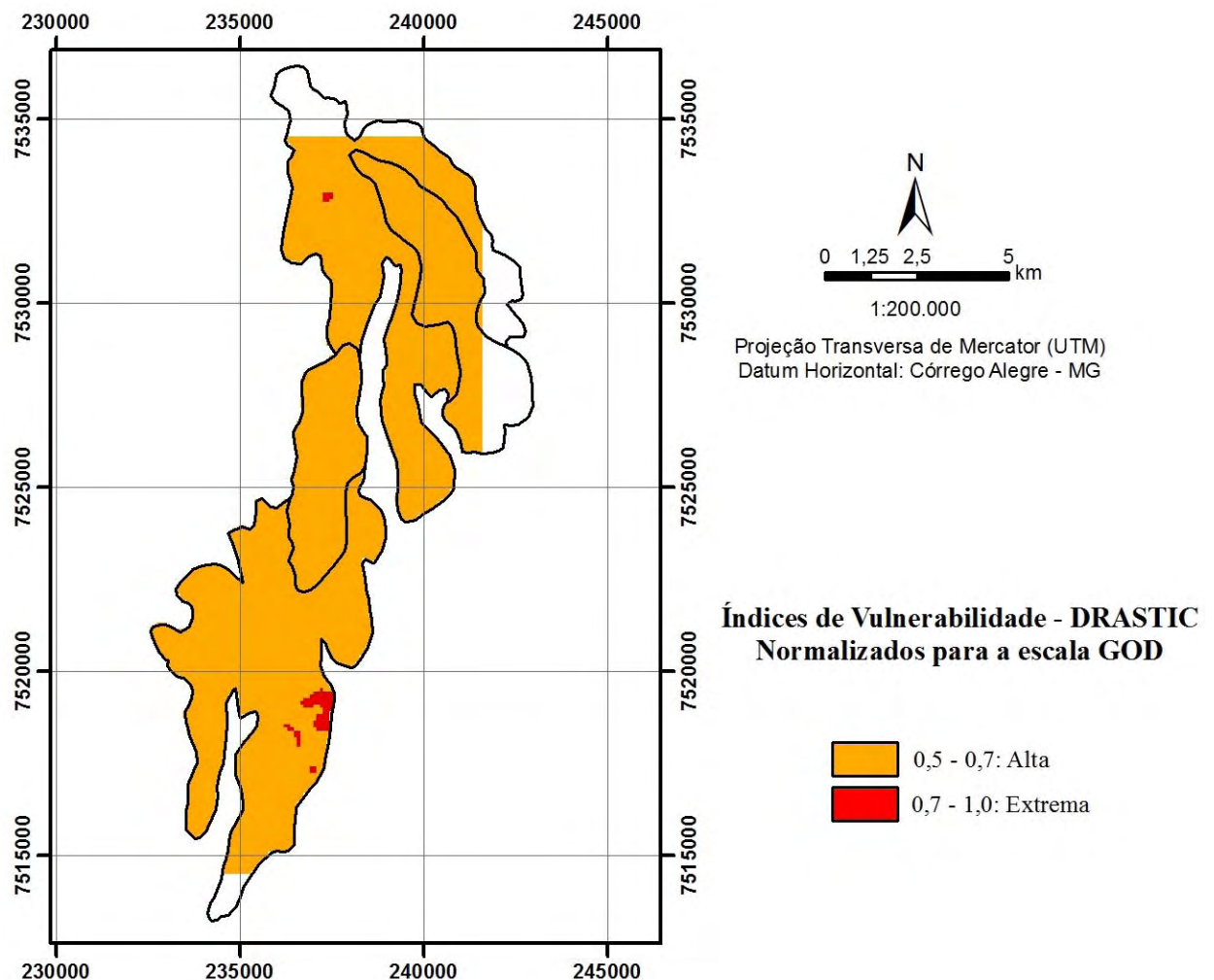


Figura 29 - Mapa DRASTIC normalizado.

Os mapas finais GOD e DRASTIC normalizados apresentam forte semelhança. Ambos definem a maior parte do aquífero livre de Rio Claro como altamente vulnerável, o

que de acordo com Foster & Hirata (1988) significa que essa área é vulnerável a muitos contaminantes em muitas condições de contaminação.

Entretanto, com a observação do mapa DRASTIC sem normalização de escala, a área de estudo é dividida especialmente entre zonas de baixa e moderada vulnerabilidade, sendo a moderada concentrada em áreas onde a espessura da camada não saturada é menor. Esta característica nos aponta a diferença de precisão entre os dois métodos (Figura 30).

Para o método DRASTIC é possível verificar, dentro da área do aquífero livre, zonas com diferentes índices de vulnerabilidade bem distribuídos, enquanto que o resultado da aplicação do método GOD oferece um mapa menos detalhado, ou seja, por considerar menos parâmetros em sua avaliação, resulta em um mapa mais genérico, onde mais de 90% da área de estudo apresenta índice único.

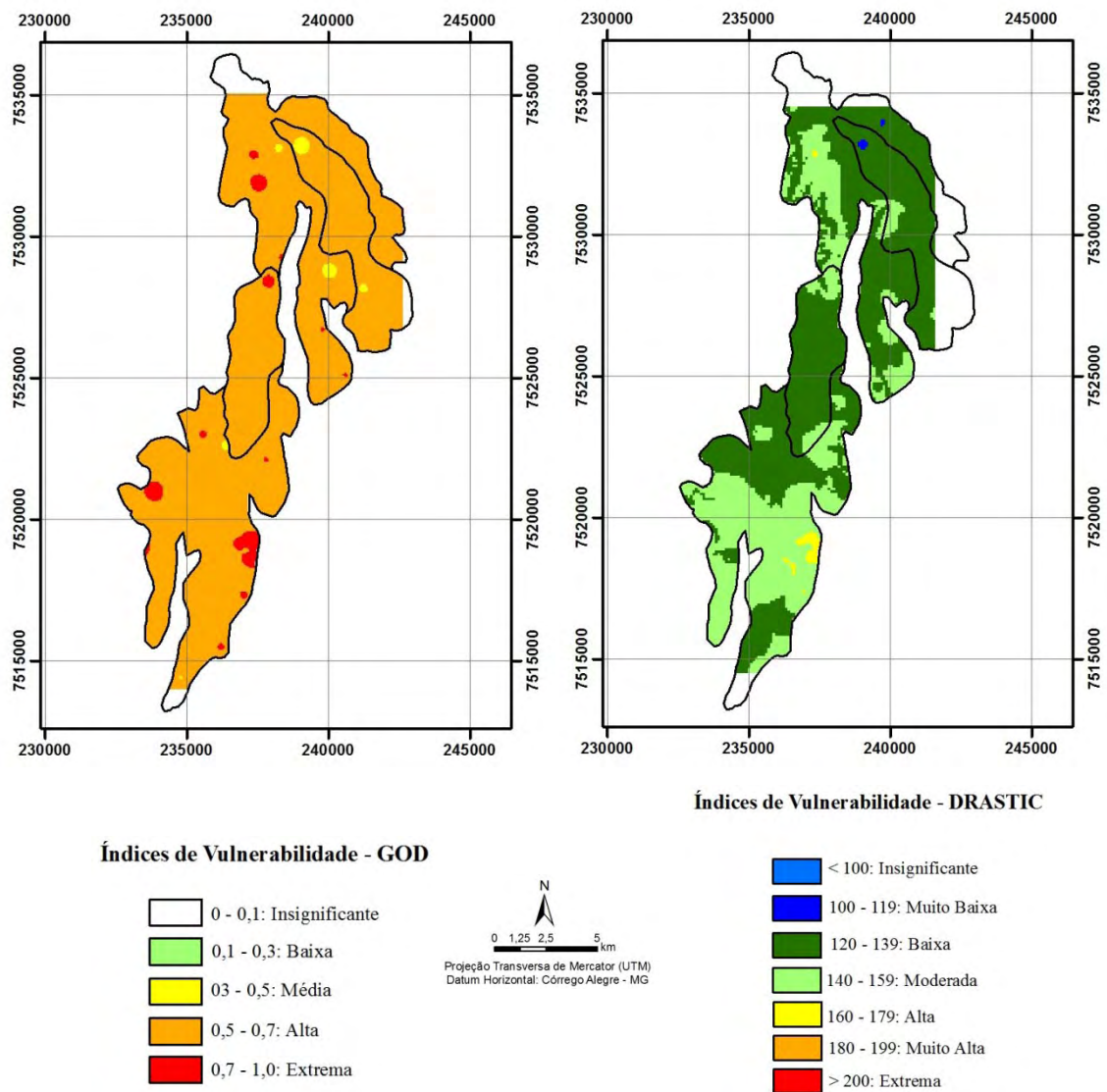


Figura 30. Mapas de vulnerabilidade do aquífero livre na Formação Rio Claro resultantes da aplicação dos métodos GOD e DRASTIC.

5.5. MODELO DE INFILTRAÇÃO

A condutividade hidráulica (k) calculada pelo algoritmo nos períodos selecionados convergiu para valores muito parecidos, sendo a média, $4,98.10^{-5}$ m/s, muito próxima do resultado das análises *in situ* de Oliva (2006) obtidas com o método Guelph nas proximidades do poço de monitoramento, onde prevaleceram valores entre $1,96.10^{-3}$ e $3,9.10^{-3}$ cm/s.

Os resultados obtidos por meio da utilização do programa de resolução do problema inverso usando o método de minimização global Simulated Annealing são listados na tabela 9.

Tabela 9 - Dados de saída gerados pelo programa de resolução do problema inverso.

Período	Tempo (h)	Elevação Observada (m)	Elevação Calculada (m)	Condutividade hidráulica calculada (m/s)	Erro Calculado (%)
01 a 03 de agosto de 2002	2592	0	0,0476	$5,78.10^{-5}$	$5,23.10^{-2}$
	2832	0,0725	0,0945		
	3072	0,2283	0,1432		
	3312	0,4703	-		
08 a 12 de outubro de 2003	2208	0	0,1064	$4,74.10^{-5}$	$6,77.10^{-2}$
	2448	0,2018	0,2231		
	2688	0,4306	0,3552		
	2928	0,6966	-		
27 de setembro a 26 de outubro de 2004	2136	0	0,0582	$4,44.10^{-5}$	$5,31.10^{-2}$
	2376	0,0454	0,1176		
	2616	0,1760	0,1765		
	2856	0,3163	0,2354		
	3096	1,0171	-		

A análise dos dados quantitativos provenientes do monitoramento da coluna d'água dos poços IGCE-3 e IGCE-6 e da precipitação obtidos por meio da resolução do problema inverso permitem avaliar a vulnerabilidade local de uma maneira mais exata em relação aos métodos qualitativos ou mesmo complementar análises realizadas *in situ*, tal como utilizando-se o método de Guelph, que avalia a condutividade hidráulica considerando as condições da parte mais superficial do terreno. No caso desse cálculo, foi considerada toda a espessura da zona não saturada, obtida por intermédio das SEVs.

A condutividade hidráulica de um meio representa as condições de circulação de fluídos que ocorrem na área, que está diretamente relacionado à vulnerabilidade aos processos de contaminação. Assim, solos que tendem a ser condutivos e permeáveis estão tecnicamente mais vulneráveis a esses processos.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

As análises propostas pelos métodos GOD e DRASTIC são eficientes na determinação das zonas mais e menos vulneráveis à contaminação das águas subterrâneas. No entanto, são limitados por seu aspecto qualitativo e pela subjetividade.

Ainda assim, são importantes ferramentas a serem utilizadas principalmente pela administração pública, a fim de auxiliar na decisão dos tipos de empreendimentos ou atividades a serem implantadas em cada zona de um município, ou ainda direcionar onde preferencialmente certas atividades podem ser desenvolvidas.

A aplicação do método GOD resultou num mapa muito homogêneo, com a maior parte da área com índice 0,56, que caracteriza a área pela alta vulnerabilidade. Este resultado corresponde com o que define a Resolução SMA 014 de 2010 (SMA, 2010).

A aplicação do método DRASTIC resultou num mapa qualitativo que define a área de estudo especialmente como de vulnerabilidade moderada e baixa, sendo que as zonas de maior vulnerabilidade estão localizadas onde ocorrem menores espessuras da zona não saturada no terreno.

A comparação dos produtos obtidos pelos métodos GOD e DRASTIC permite distinguir claramente o grau de detalhe tomado para cada uma delas. Enquanto o primeiro considera em sua avaliação somente 3 parâmetros, o método DRASTIC engloba 7, o que torna a análise mais detalhada, visto que quanto maior o conhecimento da área estudada, melhor a previsão do comportamento do subsolo frente a possíveis fontes contaminantes.

Apesar das duas metodologias apresentarem classificações distintas para a área, suas escalas de avaliação são diferentes, e após a normalização da escala DRASTIC para uma escala de 0 a 1, como nos índices GOD, os dois mapas-síntese ofereceram a mesma resposta de avaliação: alta vulnerabilidade para a praticamente toda a área.

Neste sentido, é possível afirmar que o método GOD promove uma análise preliminar na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Representa uma análise mais simples e sistemática, que pode fornecer resultados satisfatórios quando na ausência de dados disponíveis, embora haja possíveis margens de erro por desconsiderar importantes parâmetros em sua avaliação. Contudo é indicada a aplicação do método DRASTIC na existência de dados suficientes, devido à possibilidade de modelos mais precisos a partir de informações mais detalhadas do meio avaliado.

Em posse desta avaliação inicial é preciso partir para uma análise mais específica e quantitativa quando se pretende iniciar uma obra ou definir especificamente a locação de uma indústria ou qualquer atividade que possa oferecer risco de contaminação ao subsolo. Nesse momento, os modelos matemáticos oferecem uma avaliação eficaz do comportamento de fluidos entre a zona não saturada do solo e o aquífero.

O monitoramento temporal do nível freático é de extrema importância para estudos de preservação da qualidade e quantidade das águas subterrâneas, pois fornece uma avaliação que deve preceder a tomada de decisões em nível de gestão da quantidade (outorgas), e ainda possibilita a produção de dados como a modelagem matemática pela resolução do problema inverso. Esse procedimento resulta em dados confiáveis de condutividade hidráulica, cuja comparação com resultados pré-existentes possibilitam a avaliação direta da vulnerabilidade de um aquífero.

A utilização de dados de resistividade elétrica resultantes de SEV's podem apresentar algumas vantagens como os custos relativamente baixos, possibilidade de avaliar grandes áreas de maneira rápida e com precisão satisfatória, além da flexibilidade de investigações rasas ou profundas sem alterar as condições dos materiais envolvidos. Essas qualidades, aliadas ao baixo custo e precisão dos modelos matemáticos utilizados, fornecem uma solução viável para a avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos.

Contudo, a ambiguidade associada ao processamento de dados de SEV deve ser minimizada, a partir da consideração de dados geológicos, hidrogeológicos e pedológicos, sejam precedentes de informações disponíveis em trabalhos anteriores ou adquiridos a partir de reconhecimentos de campo ou perfis descritivos em poços.

CAPÍTULO 7 – BIBLIOGRAFIAS REFERENCIADAS E CONSULTADAS

- ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Educação – Águas Subterrâneas, o que são?** Disponível em: <<http://http://www.abas.org/educacao.php#ind21>>. Acesso em: 29 dez 2011.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14724/2011 – Informação e Documentação – Trabalhos Acadêmicos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2011.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6023/2000 – Informação e Documentação - Elaboração de Referências**. Rio de Janeiro, ABNT, 2000.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 6502/1995 – Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1995.
- ALLER L.; BENNET T.; LEHR J. H.; PETTY R. J.; **DRASTIC: a Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. U.S. EPA Report 600/2-85/018. 1987.
- ALVES, M. G.; RAMOS, I. S.; CORIDOLA, R. **Metodologia DRASTIC na Análise da Vulnerabilidade dos Aquíferos Livres de Campos dos Goytacazes**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal/Rio Grande do Norte. 2009. P. 3433-3438.
- ARCHIE, G. E. **The Electrical Resistivity as an AID in Determining some Reservoir Characteristics**. Petroleum Transactions of AIME. 1942. P 54-62.
- BAKER, D. L. **A Limited Tutorial on Using Finite Differences in Soil Physics Problems**. Disponível em: < <http://www.aquarien.com/findif/Findifa4.html>>. Acesso em: 31 jan 2012.
- BARBOSA, C. **Planejamento Urbano Sustentável: Diretrizes de Urbanização Embasadas nas Características Geomorfológicas/ Pedológicas de Vertentes**. Dissertação de Mestrado. IGCE – Unesp. Rio Claro, 2010. 122 p.
- BASHA, H. A. **Multidimensional linearized nonsteady infiltration with prescribed boundary conditions ate the soil surface**. Water Resources Research, 1999. V 35(1). p.75-83.
- BEAR, J. **Dynamics os Fluids in Porous Midia**. American Elsevier Publishing Company Inc. New York. Second Printing. 1972. 764 p.
- BENEDINI, M. **The Aquifers and Their Hydraulic Charecteristics**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976. Pág 157 a 178.
- BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; FILHO, E. F. R. **Aquífero Guarani – A verdadeira Integração dos Países do Mercosul**. Curitiba, 2004.

- BRACHO, J. J. C.; MORENO, L. S.; NIETO, A. M.; MÉNDEZ, A. L. **Vulnerabilidad de Acuíferos a la contaminación**. 2004. Disponível em <www.uaaan.mx/DirInv/Resul_PI-04/ (índice por autor programa: ingeniería agrícola _ J. J. Cortés Bracho (2)). Acesso em 13 fev.
- BRAGA, A. C. O. **Estimativa da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos: Uma Contribuição a Partir da Resistividade e Condutância Longitudinal**. Revista Brasileira de Geofísica, 2008. Pág 61 a 69.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos Geoeletricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, Município de Rio Claro-SP**. Tese de Doutorado. IGCE, Unesp, Rio Claro. 1997.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos da Eletroresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática**. Tese de Livre-Docência na Disciplina Métodos Geoeletricos Aplicados à Hidrogeologia. Programa de Pós-Graduação de Geociências e Meio Ambiente. IGCE – Unesp. 2006. 121 p.
- BRAGA, A. C. O *et al.* **Resistivity (DC) Method Applied to Aquifer Protection Studies**. Revista Brasileira de Geofísica, 2006. Pág 573 a 581.
- BRASIL. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.
- BRASIL. **Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
- BRITO, N. M.; JUNIOR, O. P. A.; POLESE, L.; RIBEIRO, M. L. **Validação de Métodos Analíticos: Estratégia e Discussão**. Pesticidas: R.Ecotoxicol. e Meio Ambiente. Curitiba, V. 13, p 129 a 146, jan/dez 2003.
- BUCKMAN, H.O; BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1968. 594 p.
- CABRAL, J. P. **Movimento das Águas Subterrâneas**. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.) Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza:CPRM, LABHID-UFPE. Capítulo 3. 1997.
- CABRAL, J.S.P. Movimento das Águas Subterrâneas. In: MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J.G.A (org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 121-151.
- CARDOSO, L. V. R. Q. **Estudo Comparativo entre os Métodos DRASTIC e GOD na Avaliação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas à Poluição da Bacia Hidrográfica do Rio Cabril – Vila Real**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Portugal. 2010. 90 p.

CASTANY, G. **Tratado Prático de lãs Aguas Subterrâneas**. Edicione Omega S.A. Barcelona, 1971. 672 p.

Centro de Análise e Planejamento Ambiental – CEAPLA. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. UNESP, Rio Claro. Disponível em:

<<http://ceapla.rc.unesp.br/atlas/atlas.html>> Acesso em: 01 mar 2011.

Centro de Análise e Planejamento Ambiental – CEAPLA. **Biblioteca Virtual do CEAPLA**. UNESP, Rio Claro. Disponível em:

<<http://http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/biblioteca/mapas.php>> Acesso em: 26 jan 2012.

CETESB. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo**.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2011. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/relacoes-de-areas-contaminadas/15-publicacoes>>. Acesso em: 6 dez 2011.

CLEARY, R.M. **Águas Subterrâneas**. Princeton Groundwater, Inc. Clean Environment Brasil, Produtos e Tecnologias para o Meio Ambiente. Disponível em:

<<http://www.clean.com.br>>. Acesso em: 10 de maio de 2011.

CNRH. **Lei nº 107 de 13 de abril de 2010**. Estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para planejamento, implantação e operação de Rede Nacional de Minitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas.

Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Relatório da Situação dos Recursos Hídricos 2010**. Disponível em:

<<http://www.comitepcj.sp.gov.br>>. Acesso em: 21 de maio de 2011.

CONAMA. **Resolução nº 357 de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Conselho Nacional de Meio Ambiente. 2005.

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Planejamento Urbano de Rio Claro - SP**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 1983. 171 p.

CRH. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos. **Relatório de situação dos recursos hídricos do Estado de São Paulo**. Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos, 1999. 128 p.

DAVIS, L. **Genetic Algorithms and Simulated Annealing**. Cambridge-Massachusetts: Morgan Kaufman, 1987.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W.; **Physical and Chemical Hydrogeology**. Wiley Press, p. 324. 1990.

DRISCOLL, F.G. **Groundwater and Wells**. Johnson Screens. Estados Unidos. 1986.

- DRUMMOND, A. A. R. **Química de Fluidos de Perfuração para Poços de Petróleo – Perfilagem**. Instituto de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 20 p.
- DuCHATEAU, P.; ZACHMANN, D. **Applied Partial Differential Equations**. Harper and Row, New York, ISBN 0-06-041772-2. 1989. 620 p.
- ESCADA, D. C. S. **Mapeamento da vulnerabilidade e perigo à contaminação das águas subterrâneas do município de Cajamar – SP**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, SP. 2009. 110p.
- ESRI. **Environmental Systems Research Institute**, ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 9.2. Software. 2006.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 1997. 389 p.
- FERREIRA, S. R. **Análise pedoestratigráfica das formações Rio Claro e Piraçununga no centro-leste do estado de São Paulo**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp - Rio Claro. 2005. 157 p.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. Merrill Publishing Company, Upper Saddle River. New Jersey. 1994. 691 p.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater Pollution Risk: Assessment: a Methodology using Available data**. Lima. World Health Organization. Pan American Health Organization. Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences. 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. Edição brasileira: Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, 2002. Banco Mundial. 104 p.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- GOMES, C. C.; CASTRO, M. A. H. **Análise Comparativa entre a Modelagem de Aquíferos Regionais Utilizando o Método de Elementos Analíticos (SPLIT) e o Método de Diferenças Finitas (MODFLOW)**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis-SC. 2002.
- GRIFFITHS, D.H. **Application of electrical resistivity measurements for the determination of porosity and permeability in sandstones**. *Geos exploration*, v.14 n° 3/4. 1976. p. 207-213.
- GUARDA, A. **Inteligência Artificial**. Apostila. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Computação. 2006. 51p.
- HENRIET, J. P. **Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys**. *Geophysical Prospecting*, 24: 344-353. 1975.

HORTON, R. E. **The Role of Infiltration in the Hydrological Cycle**. Trans. Amer. Geophys. Un. 14: 446-460. 1933.

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo – IAG-USP. **Geofísica Ambiental**. Disponível em:

<<http://www.iag.usp.br/siae98/geofisica/geofambiental.htm>>. Acesso em: 30 dez 2011.

IG, CETESB, DAEE. **Mapeamento da Vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. Instituto Geológico, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo Secretaria de Estado do Meio Ambiente; coordenado por Ricardo Cesar Aoki Hirata, Caraí Ribeiro de Assis Bastos, Gerôncio Albuquerque Rocha. São Paulo. 1997.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Cadernos de Educação Ambiental: As Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. São Paulo, 2008. 104 p.

MURADÁS, K.; WOJAN, D.; COELHO, O. G. W. **Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC**. Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science. Vol 5, num 3. 2010. P. 172-194.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. **Optimization by Simulated Annealing**. Science. Vol 220, Number 4598. 13 Mai 1983.

KUMAYAMA, D. M. **Calibração de um Reflectômetro (TDR) para o Estudo da Variação do Teor de Umidade num Perfil de Solo não Saturado**. Trabalho de Formatura para o Curso de Geologia. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004. 74p.

LNEG. **Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal**. Água Subterrânea: Conhecer para Proteger e Preservar. 2001. Disponível em: <http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/texto>. Acesso em: 01 fev 2012.

LOBO-FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M.; CIABATTI, P. **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**. 1º Volume, LNEG, Departamento de Hidráulica, Grupo de Investigação de Águas subterrâneas. 1995.

LOBO-FERREIRA, J. P. **Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrânea: Fundamentos e Conceitos para uma Melhor Gestão e Protecção dos Aquíferos de Portugal**. Lisboa, 4º Congresso da Água da APRH. 1998.

LVIVITCH, M. I. World Water Balance: general report. **Proc. Symposium World Water Balance**. International Assoc. Sci. Hydrol. 2, 1970. P 401-415.

MANNICH, M. **Desenvolvimento de Soluções Analíticas e Numéricas da Equação de Richards**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2008. 115p.

- MAZAC, O.; LANDA, L.; KELLY, W. E. **Surface geoelectrics for the study of ground water pollution; survey design**. Journal of Hydrology. 111:163-176. 1989.
- MELLO, C. E. F. **Água Subterrânea**. Material didático. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~carlosetduardo/1Agua%20Subterranea.pdf>>. Acesso em: 13 fev 2012.
- METROPOLIS, A.; ROSENBLUTH, M.; ROSENBLUTH, A.; TELLER, E. **Equations of state calculations by fast computing machines**. J. Chem. Phys. 1953. 1091 P.
- MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Office Excel**. Estados Unidos. Software. 2007.
- MIDOES, C.; FERNANDES, J. (Coord). **Água Subterrânea – Conhecer para Proteger e Preservar**. Publicação sob Projeto nº P-IV-1052 do Programa Ciência Viva. IGM, Departamento de Hidrologia. Lisboa, 2001. 24 p.
- MOLE, V. L.; MARTIND, J. G.; MAZZUCCO, J. **Caixeiro Viajante – Uma Abordagem Baseada no Algoritmo Simulated Annealing**. IV Congresso Brasileiro de Computação – CBComp. Itajaí-SC. 2004. p 18-21.
- MONTEIRO, A. B.; FREIRE, P. K. C.; BARBOSA, G. F.; CABRAL, J. S. P.; SILVA, S. R. **Drastic: Vulnerabilidade do Aquífero Barreiras nos Bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco**. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – Natal, RN. 2008. 20 p.
- MORETTI, L. R. **Importância da Bacia do Corumbataí para a Produção de Água**. III Simpósio sobre Recuperação Florestal na Bacia do Rio Corumbataí, 2001.
- NASA: **Shuttle Radar Topographic Mission SRTM**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov.srtm/>> Acesso em: 10 fev 2011.
- NETO, D. C. **Análise das Séries Temporais de Monitoramento de Nível d'Água em Poços no Aquífero Rio Claro**. Dissertação de Mestrado. IGCE – Unesp. Rio Claro, 2006. 61 p.
- OLIVA, A. **Estudo Hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro – SP**. Dissertação de Mestrado. IGCE – Unesp. Rio Claro, 2002. 71 p.
- OLIVA, A. CHANG, H. K. CAETANO-CHANG, M.R. **Determinação da Condutividade Hidráulica da Formação Rio Claro: Análise Comparativa Através de Análise Granulométrica e Ensaio com Permeâmetro Guelph e Testes de Slug**. Águas Subterrâneas, v. 19, n. 2 2, p. 1-18, 2005.
- OLIVA, A. **Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro – SP**. Tese de Doutorado. IGCE – Unesp. Rio Claro, 2006. 196 p.
- OLIVEIRA, A. S.; BRITO, S. N. A. **Métodos de Investigação**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE. 1998. Páginas 163-174.
- OLIVEIRA, M. J.; SOUTO, F. A. F.; ROSÁRIO, J. M. L.; SACASA, R. J. V.; MOURA, H. P. **Vulnerabilidade natural e sazonal do aquífero livre no loteamento Marabaixo III – Macapá – AP**. Universidade Federal do Amapá, 2003.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips. 1972. 523 p.

PALMA-SILVA, G. M.; TAUKE-TORNISIELO, S. M.; PIÃO, A. C. **Capacidade de Autodepuração de um Trecho do Rio Corumbataí, SP, Brasil**. Holos Environment, V7, n2, 2007. P 139.

PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. **Geologia, recursos minerais e passivos ambientais**. Disponível em: <<http://ceapla.rc.unesp.br/atlas/atlas.html>> Acesso em: 16 fev. 2012.

PUERARI, E. M.; COSTA, C. T.; CASTRO, M. A. H. **Utilização do Método DRASTIC na Análise de Vulnerabilidade Natural do Complexo Industrial e Portuário do Pecém – Fortaleza/Ceará**. I Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. XIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. 2003. p 363 – 373.

REBOUÇAS, A. C. **Proteção ou remediação do solo e água subterrânea**. CIPA, São Paulo, v. 17, n 202, p. 100-110, set. 1996.

REPRESAS, P. M. M. F. **Inversão Conjunta de Dados de Gravimetria e Resistividade**. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa. 2009. 204p.

RIO CLARO. **Plano Diretor de Rio Claro e Normas Complementares**. Projeto de Lei de Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo: PL146/2008. Rio Claro, SP. 2008.

SANTOS, F. M. **Prospecção Geofísica I – Capítulo 2. Propriedades Eléctricas das Rochas**. 2006. Disponível em: <<http://194.117.7.100/FMSantos/PG1-Capitulo2.pdf>>. Acesso em: 15 fev 2012.

São Paulo. **Resolução SMA nº 14 de 05 de março de 2010**. Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea. Secretaria de Meio Ambiente do estado de São Paulo.

SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. **Perfil Municipal de Rio Claro**. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfil.php>>. Acesso em: 21 de maio de 2011.

SHEVNIN, V.; RODRÍGUEZ, O. D.; MOUSATOV, A.; RYJOV, A. **Estimation of hydraulic conductivity on Clay content in soil determined from resistivity data**. Geofísica Internacional, 45(3): 195-207. 2006.

SILVA, F.; SILVA, J. L. S. **Estudo de Vulnerabilidade Natural das Águas Subterrâneas no Município de Bento Gonçalves – RS**. Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. 2007. Disponível em: <<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx>>. Acesso em 30 dez 2011.

SILVA, J. S. V. **Análise Multivariada em Zoneamento para Planejamento Ambiental. Estudo de caso: Bacia Hidrográfica do Alto Rio Taquari MS/MT**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. 2003. 307 p.

- SOUPIOS, P.M.; KOULI, M., VALLIANATOS, F., VAFIDIA, A.; STAVROULKIS, G. **Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: A case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece).** Journal of Hydrology 338, 122–131, 646 doi:10.1016/j.jhydrol. 2007.
- SOUZA, M. J. F.; **Inteligência Computacional para Otimização.** Departamento de Computação. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <<http://www.iceb.ufop.br/prof/marcone>>. Acesso em: 19 mar 2012.
- TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA, F. J. B. **Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil.** Rev. Esc. Minas. Vol.62, n° 2. Ouro Preto. Abril/Junho 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Água no Meio Urbano.** Capítulo 14 do Livro: Água Doce. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997. 40 p.
- TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. **Infiltração e armazenamento no solo. In: Tucci, C.E.M. Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 2ª Ed. Porto Alegre. Rio Grande do Sul (RS). Editora Universidade, p.335-372, 2000.
- URSULINO, D.M.A. **Caracterização da qualidade das águas subterrâneas – Município de Rio Claro/SP.** Dissertação de Mestrado. IGCE-UNESP. 1998. 119 p.
- VASCONCELLOS, C. A. B.; AMORIM, J. C. C. **Simulação Numérica da Infiltração da Água em Meios Porosos Não-Saturados Homogêneos.** XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju-SE. 2001.
- WARD, S.H. **Geotechnical and Environmental Geophysics Series: Investigations in Geophysics.** Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA. Vol 5. 1990.
- ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro – SP.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Unesp - Rio Claro, 1994. 90 p.
- ZAINE, J. E. **Mapeamento Geológico-Geotécnico por meio do Método do Detalhamento Progressivo: Ensaio de Aplicação na Área Urbana do Município de Rio Claro (SP).** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Unesp - Rio Claro, 2000. 149 p.

ANEXO A – Localização das SEV's selecionadas para o cálculo de K

SEV	UTM E (m)	UTM N (m)
O-04	236900	7523600
O-15	237800	7522100
O-29	230100	7515700
O-36	237600	7526900
O-41	236200	7518100
O-50	236900	7521700
O-72	237300	7521000
O-76	237100	7520400
O-97	237400	7532900
O-101	236870	7519150
O-103	240657	7531442
O-116	239396	7529485
O-123	241615	7527199
O-124	240104	7530295
O-245	237880	7521500
O-246	237870	7521480
O-255	237900	7521410
O-261	237920	7521500
O-271	237940	7521450
O-283	237780	7521360
B-01	237055,00	7524270,00
B-02	237005,00	7524270,00
B-03	236935,00	7524280,00
B-04	237675,00	7521145,00
B-05	237650,00	7521140,00
B-06	237595,00	7521009,00
B-07	237670,00	7521010,00
B-08	237630,00	7521015,00
B-15	236130,00	7522160,00
B-16	236160,00	7522155,00

ANEXO B - Monitoramento de Coluna d'Água e Pluviometria

Data	Pluviometria (mm)	Coluna d'água (cm)			
01/01/2002	0,00	109,53	12/02/2002	0	255,78
02/01/2002	22,70	112,67	13/02/2002	0,3	262,26
03/01/2002	3,60	115,81	14/02/2002	11,1	268,94
04/01/2002	0,00	118,95	15/02/2002	10,8	275,7
05/01/2002	0,00	122,09	16/02/2002	1	282,43
06/01/2002	0,00	125,23	17/02/2002	1,3	288,95
07/01/2002	14,70	128,37	18/02/2002	0	295,07
08/01/2002	26,80	131,51	19/02/2002	0	300,63
09/01/2002	37,10	134,65	20/02/2002	0	305,58
10/01/2002	5,80	140,46	21/02/2002	11,2	309,92
11/01/2002	0,00	142,79	22/02/2002	24,2	313,73
12/01/2002	0,90	145,32	23/02/2002	10,2	317,09
13/01/2002	55,20	148,08	24/02/2002	15,2	320,08
14/01/2002	15,2	151,06	25/02/2002	0	322,73
15/01/2002	1	154,22	26/02/2002	0	325,1
16/01/2002	3	157,52	27/02/2002	0	327,22
17/01/2002	0	160,92	28/02/2002	0	329,12
18/01/2002	0	164,38	01/03/2002	0	330,83
19/01/2002	0	167,93	02/03/2002	0	332,37
20/01/2002	13,4	171,57	03/03/2002	2,2	333,77
21/01/2002	6,5	175,33	04/03/2002	4,2	335,06
22/01/2002	0	179,21	05/03/2002	0	336,24
23/01/2002	0	183,16	06/03/2002	17,6	337,33
24/01/2002	1,8	187,12	07/03/2002	0	338,3
25/01/2002	0,3	191,04	08/03/2002	0	339,17
26/01/2002	33,5	194,85	09/03/2002	0	339,91
27/01/2002	0,6	198,51	10/03/2002	0	340,54
28/01/2002	0,3	201,99	11/03/2002	0	341,06
29/01/2002	32,4	205,27	12/03/2002	0	341,52
30/01/2002	8,9	208,36	13/03/2002	0	341,93
31/01/2002	2,2	211,31	14/03/2002	34,4	342,29
01/02/2002	0,6	214,17	15/03/2002	4,7	342,58
02/02/2002	41,7	216,95	16/03/2002	0	342,78
03/02/2002	0	219,69	17/03/2002	0	342,86
04/02/2002	0	222,39	18/03/2002	0,7	342,8
05/02/2002	0	225,07	19/03/2002	0	342,6
06/02/2002	0	227,86	20/03/2002	0	342,26
07/02/2002	26,4	230,95	21/03/2002	0,9	341,81
08/02/2002	22	234,58	22/03/2002	0,4	341,28
09/02/2002	33	238,9	23/03/2002	0	340,71
10/02/2002	50,6	243,95	24/03/2002	4,5	340,1
11/02/2002	17,1	249,62	25/03/2002	15,3	339,47
			26/03/2002	10	338,83
			27/03/2002	0	338,16

28/03/2002		337,46	13/05/2002	0	279,06
29/03/2002	0	336,73	14/05/2002	0	277,73
30/03/2002	0	335,95	15/05/2002	0	276,4
31/03/2002	0	335,12	16/05/2002	0	275,07
01/04/2002	0	334,22	17/05/2002	0,2	273,73
02/04/2002	0,3	333,26	18/05/2002	0	272,4
03/04/2002	0	332,24	19/05/2002	0,4	271,09
04/04/2002	3,8	331,17	20/05/2002	12,8	269,82
05/04/2002	0	330,08	21/05/2002	20,4	268,6
06/04/2002	0	328,95	22/05/2002	38,6	267,44
07/04/2002	0	327,79	23/05/2002	0,5	266,32
08/04/2002	0	326,6	24/05/2002	0	265,23
09/04/2002	0	325,37	25/05/2002	0	264,16
10/04/2002	0	324,11	26/05/2002	0	263,08
11/04/2002	0	322,79	27/05/2002	0	261,97
12/04/2002	0	321,44	28/05/2002	0	260,78
13/04/2002	0	320,05	29/05/2002	0	259,5
14/04/2002	0	318,65	30/05/2002	0	258,15
15/04/2002	0	317,24	31/05/2002	0	256,77
16/04/2002	0	315,85	01/06/2002	0	255,44
17/04/2002	0	314,47	02/06/2002	0	254,21
18/04/2002	0	313,11	03/06/2002	0	253,07
19/04/2002	0	311,76	04/06/2002	0	252
20/04/2002	0	310,41	05/06/2002	0	250,92
21/04/2002	0	309,08	06/06/2002	0	249,79
22/04/2002	0	307,75	07/06/2002	0	248,59
23/04/2002	0	306,42	08/06/2002	0	247,36
24/04/2002	0	305,09	09/06/2002	0	246,11
25/04/2002	0	303,76	10/06/2002	0	244,87
26/04/2002	0	302,41	11/06/2002	0	243,63
27/04/2002	0	301,05	12/06/2002	0	242,39
28/04/2002	0	299,68	13/06/2002	0	241,13
29/04/2002	0	298,28	14/06/2002	0	239,89
30/04/2002	0	296,88	15/06/2002	0	238,68
01/05/2002	0,2	295,46	16/06/2002	0	237,57
02/05/2002	0	294,02	17/06/2002	0	236,62
03/05/2002	1,3	292,58	18/06/2002	0	235,89
04/05/2002	0	291,15	19/06/2002	0	235,37
05/05/2002	5	289,74	20/06/2002	0	235,03
06/05/2002	14,5	288,36	21/06/2002	0	234,79
07/05/2002	0	287,02	22/06/2002	0	234,52
08/05/2002	0	285,69	23/06/2002	0	234,13
09/05/2002	0	284,37	24/06/2002	0	233,55
10/05/2002	0	283,05	25/06/2002	0	232,79
11/05/2002	0	281,72	26/06/2002	0	231,87
12/05/2002	0	280,39	27/06/2002	0	230,86

28/06/2002	0	229,78	13/08/2002	0	183,37
29/06/2002	0	228,66	14/08/2002	0	182,48
30/06/2002	0	227,52	15/08/2002	0	181,6
01/07/2002	0	226,36	16/08/2002	0	180,73
02/07/2002	0	225,18	17/08/2002	0	179,87
03/07/2002	0	224	18/08/2002	0	179,02
04/07/2002	0	222,83	19/08/2002	0	178,18
05/07/2002	0	221,65	20/08/2002	0	177,35
06/07/2002	0	220,45	21/08/2002	0	176,53
07/07/2002	0	219,23	22/08/2002	0	175,73
08/07/2002	0	218	23/08/2002	0	174,92
09/07/2002	0	216,77	24/08/2002	0	174,13
10/07/2002	0	215,55	25/08/2002	0	173,34
11/07/2002	0	214,36	26/08/2002	0	172,56
12/07/2002	3,9	213,19	27/08/2002	0	171,8
13/07/2002	0,9	212,04	28/08/2002	0	171,04
14/07/2002	0,2	210,9	29/08/2002	0	170,29
15/07/2002	0	209,77	30/08/2002	13,5	169,55
16/07/2002	0	208,66	31/08/2002	0	168,8
17/07/2002	0	207,59	01/09/2002	4,4	168,06
18/07/2002	0	206,56	02/09/2002	0	167,33
19/07/2002	0	205,58	03/09/2002	0	166,61
20/07/2002	0	204,62	04/09/2002	0	165,89
21/07/2002	0	203,67	05/09/2002	0	165,17
22/07/2002	0,2	202,7	06/09/2002	0	164,44
23/07/2002	0,4	201,72	07/09/2002	10,9	163,69
24/07/2002	0	200,73	08/09/2002	0	162,93
25/07/2002	0	199,73	09/09/2002	0	162,18
26/07/2002	0	198,74	10/09/2002	0	161,43
27/07/2002	0	197,75	11/09/2002	0	160,69
28/07/2002	0	196,77	12/09/2002	0	159,97
29/07/2002	0	195,8	13/09/2002	0	159,25
30/07/2002	0	194,87	14/09/2002	0	158,54
31/07/2002	0	194,01	15/09/2002	0,3	157,84
01/08/2002	13,2	193,22	16/09/2002	0	157,15
02/08/2002	46,2	192,51	17/09/2002	1,4	156,47
03/08/2002	45	191,86	18/09/2002	0	155,8
04/08/2002	0,1	191,2	19/09/2002	0	155,15
05/08/2002	0	190,51	20/09/2002	2,5	154,52
06/08/2002	0	189,74	21/09/2002	16,2	153,91
07/08/2002	7,8	188,9	22/09/2002	0	153,32
08/08/2002	0	188	23/09/2002	1,3	152,76
09/08/2002	0	187,07	24/09/2002	1,7	152,22
10/08/2002	0	186,14	25/09/2002	0	151,68
11/08/2002	0	185,2	26/09/2002	0	151,13
12/08/2002	0	184,28	27/09/2002	0	150,56

28/09/2002	0	149,96	13/11/2002	49,1	120,14
29/09/2002	0	149,33	14/11/2002	8,5	119,78
30/09/2002	0	148,68	15/11/2002	27,6	119,51
01/10/2002	0,2	148,01	16/11/2002	1,6	119,36
02/10/2002	2,1	147,34	17/11/2002	0	119,36
03/10/2002	0	146,65	18/11/2002	16,8	119,55
04/10/2002	0	145,96	19/11/2002	43,4	119,97
05/10/2002	0	145,25	20/11/2002	0	120,63
06/10/2002	0	144,54	21/11/2002	0	121,5
07/10/2002	0	143,84	22/11/2002	12,5	122,51
08/10/2002	0	143,15	23/11/2002	0	123,59
09/10/2002	0	142,47	24/11/2002	0	124,65
10/10/2002	0	141,81	25/11/2002	0	125,65
11/10/2002	0	141,16	26/11/2002	23,8	126,61
12/10/2002	0	140,51	27/11/2002	2,1	127,56
13/10/2002	0	139,86	28/11/2002	7,9	128,57
14/10/2002	0	139,21	29/11/2002	36,9	129,7
15/10/2002	0	138,56	30/11/2002	19,8	131
16/10/2002	0	137,9	01/12/2002	0	132,5
17/10/2002	0	137,24	02/12/2002	11	134,17
18/10/2002	0	136,56	03/12/2002	0	136,01
19/10/2002	0	135,85	04/12/2002	0	137,98
20/10/2002	0	135,12	05/12/2002	43	140,04
21/10/2002	0	134,36	06/12/2002	0	142,19
22/10/2002	1,4	133,59	07/12/2002	1,2	144,42
23/10/2002	0	132,8	08/12/2002	1,9	146,74
24/10/2002	0	132,02	09/12/2002	39,4	149,15
25/10/2002	0	131,24	10/12/2002	0,2	151,61
26/10/2002	13,7	130,47	11/12/2002	8,2	154,06
27/10/2002	0,4	129,72	12/12/2002	1,9	156,47
28/10/2002	0	128,99	13/12/2002	0	158,82
29/10/2002	0	128,29	14/12/2002	0,8	161,15
30/10/2002	26,2	127,62	15/12/2002	14,5	163,62
31/10/2002	18,4	126,98	16/12/2002	45,6	166,39
01/11/2002	0	126,38	17/12/2002	55,6	169,58
02/11/2002	0	125,81	18/12/2002	0	173,2
03/11/2002	0	125,25	19/12/2002	0	177,18
04/11/2002	0	124,71	20/12/2002	0	181,38
05/11/2002	28,7	124,18	21/12/2002	8	185,65
06/11/2002	0	123,66	22/12/2002	17,5	189,92
07/11/2002	0	123,16	23/12/2002	0	194,16
08/11/2002	0	122,65	24/12/2002	0	198,37
09/11/2002	0	122,13	25/12/2002	0,7	202,55
10/11/2002	0	121,6	26/12/2002	5,1	206,66
11/11/2002	6,7	121,07	27/12/2002	0	210,62
12/11/2002	2,8	120,58	28/12/2002	0	214,38

29/12/2002	0	217,87	13/02/2003	4,6	380,47
30/12/2002	0	221,04	14/02/2003	33	381,66
31/12/2002	1,6	223,87	15/02/2003	12,1	382,67
01/01/2003	0	226,41	16/02/2003	6,8	383,54
02/01/2003	1,8	228,77	17/02/2003	3,5	384,34
03/01/2003	0	231,11	18/02/2003	6,1	385,08
04/01/2003	83,4	233,56	19/02/2003	34,4	385,79
05/01/2003	15,4	236,21	20/02/2003	0	386,46
06/01/2003	27,3	239,04	21/02/2003	9,3	387,08
07/01/2003	0	241,97	22/02/2003	2,5	387,63
08/01/2003	0	244,91	23/02/2003	0	388,1
09/01/2003	0	247,79	24/02/2003	0	388,49
10/01/2003	0	250,63	25/02/2003	0	388,8
11/01/2003	0,4	253,5	26/02/2003	0	389,06
12/01/2003	43	256,46	27/02/2003	0	389,28
13/01/2003	6,3	259,53	28/02/2003	0	389,47
14/01/2003	0,4	262,68	01/03/2003	0	389,63
15/01/2003	0	265,84	02/03/2003	0	389,75
16/01/2003	0	268,94	03/03/2003	0	389,83
17/01/2003	4,8	271,94	04/03/2003	31,4	389,86
18/01/2003	35,1	274,84	05/03/2003	0	389,8
19/01/2003	1	277,73	06/03/2003	0,9	389,66
20/01/2003	4	280,7	07/03/2003	0,6	389,44
21/01/2003	0	283,87	08/03/2003	7,3	389,13
22/01/2003	82,3	287,27	09/03/2003	8,9	388,75
23/01/2003	11,1	290,9	10/03/2003	0,3	388,3
24/01/2003	16,6	294,74	11/03/2003	2,8	387,79
25/01/2003	9,3	298,77	12/03/2003	2,3	387,2
26/01/2003	2	302,97	13/03/2003	0	386,52
27/01/2003	1,6	307,44	14/03/2003	0	385,74
28/01/2003	23,4	312,35	15/03/2003	0	384,89
29/01/2003	20,2	317,89	16/03/2003	0	383,96
30/01/2003	6,1	324,16	17/03/2003	27,1	382,99
31/01/2003	15,7	331,01	18/03/2003	0	381,98
01/02/2003	0,4	338,06	19/03/2003	0	380,94
02/02/2003	0	344,83	20/03/2003	0,5	379,87
03/02/2003	0	350,89	21/03/2003	9,1	378,76
04/02/2003	0	356,01	22/03/2003	2,7	377,63
05/02/2003	0,4	360,24	23/03/2003	0	376,47
06/02/2003	0,2	363,81	24/03/2003	0	375,29
07/02/2003	0	366,99	25/03/2003	0	374,07
08/02/2003	0	369,95	26/03/2003	0	372,84
09/02/2003	0	372,7	27/03/2003	0	371,59
10/02/2003	0	375,15	28/03/2003	3	370,32
11/02/2003	0	377,27	29/03/2003	0	369,04
12/02/2003	0	379,03	30/03/2003	0	367,72

31/03/2003	0	366,36	16/05/2003	0	304,74
01/04/2003	0	364,97	17/05/2003	0	303,8
02/04/2003	0	363,56	18/05/2003	0	302,95
03/04/2003	0	362,17	19/05/2003	0	302,23
04/04/2003	0	360,81	20/05/2003	0	301,63
05/04/2003	13,2	359,49	21/05/2003	0	301,15
06/04/2003	0	358,19	22/05/2003	0	300,75
07/04/2003	2,9	356,88	23/05/2003	0	300,42
08/04/2003	0	355,52	24/05/2003	10,6	300,13
09/04/2003	0	354,09	25/05/2003	0	299,88
10/04/2003	0	352,61	26/05/2003	0	299,66
11/04/2003	2,5	351,08	27/05/2003	0	299,5
12/04/2003	0,9	349,53	28/05/2003	0	299,38
13/04/2003	0	347,98	29/05/2003	0	299,27
14/04/2003	0	346,45	30/05/2003	0	299,11
15/04/2003	0	344,94	31/05/2003	0	298,84
16/04/2003	0	343,44	01/06/2003	0	298,4
17/04/2003	0	341,95	02/06/2003	0	297,76
18/04/2003	0	340,47	03/06/2003	0	296,94
19/04/2003	0	338,98	04/06/2003	5,3	295,98
20/04/2003	13,6	337,49	05/06/2003	0	294,93
21/04/2003	6	336,03	06/06/2003	4	293,82
22/04/2003	3,2	334,58	07/06/2003	5,6	292,68
23/04/2003	0	333,16	08/06/2003	0	291,51
24/04/2003	0	331,75	09/06/2003	0,7	290,32
25/04/2003	0	330,35	10/06/2003	0	289,1
26/04/2003	0	328,95	11/06/2003	0	287,86
27/04/2003	0	327,55	12/06/2003	0	286,59
28/04/2003	0	326,15	13/06/2003	0	285,31
29/04/2003	0	324,76	14/06/2003	0	284,02
30/04/2003	0	323,39	15/06/2003	0	282,74
01/05/2003	0	322,05	16/06/2003	0	281,46
02/05/2003	0,2	320,74	17/06/2003	0	280,2
03/05/2003	15,4	319,46	18/06/2003	0	278,93
04/05/2003	0	318,23	19/06/2003	0	277,67
05/05/2003	0	317,02	20/06/2003	0	276,42
06/05/2003	19,6	315,83	21/06/2003	0	275,17
07/05/2003	0	314,65	22/06/2003	0	273,94
08/05/2003	0	313,49	23/06/2003	0	272,73
09/05/2003	0	312,34	24/06/2003	0	271,53
10/05/2003	0	311,21	25/06/2003	0	270,34
11/05/2003	0	310,09	26/06/2003	0	269,15
12/05/2003	0	308,98	27/06/2003	0	267,93
13/05/2003	0	307,89	28/06/2003	0	266,71
14/05/2003	0	306,8	29/06/2003	0	265,47
15/05/2003	0	305,75	30/06/2003	0	264,25

01/07/2003	0	263,05	16/08/2003	0	211,63
02/07/2003	0	261,86	17/08/2003	0	210,54
03/07/2003	0	260,7	18/08/2003	0	209,46
04/07/2003	0	259,55	19/08/2003	0	208,37
05/07/2003	0	258,4	20/08/2003	0	207,29
06/07/2003	0	257,26	21/08/2003	0	206,2
07/07/2003	0	256,1	22/08/2003	0	205,1
08/07/2003	0	254,92	23/08/2003	0	204,02
09/07/2003	0	253,73	24/08/2003	0	203,06
10/07/2003	0	252,52	25/08/2003	0	202,3
11/07/2003	3,5	251,32	26/08/2003	5,2	201,8
12/07/2003	0	250,12	27/08/2003	0	201,53
13/07/2003	0	248,95	28/08/2003	0	201,37
14/07/2003	0	247,8	29/08/2003	0,2	201,2
15/07/2003	0	246,67	30/08/2003	0	200,87
16/07/2003	0	245,55	31/08/2003	0	200,35
17/07/2003	0	244,42	01/09/2003	0	199,66
18/07/2003	0	243,29	02/09/2003	0	198,87
19/07/2003	0	242,16	03/09/2003	0	198,05
20/07/2003	0	241,03	04/09/2003	0	197,23
21/07/2003	0	239,9	05/09/2003	0	196,41
22/07/2003	0	238,78	06/09/2003	0	195,59
23/07/2003	0	237,67	07/09/2003	0	194,77
24/07/2003	0	236,56	08/09/2003	0	193,96
25/07/2003	0	235,47	09/09/2003	0	193,14
26/07/2003	0	234,39	10/09/2003	0	192,32
27/07/2003	0	233,3	11/09/2003	2,3	191,51
28/07/2003	0	232,22	12/09/2003	0	190,69
29/07/2003	0	231,14	13/09/2003	0,2	189,88
30/07/2003	0	230,05	14/09/2003	0,2	189,06
31/07/2003	0	228,97	15/09/2003	0	188,24
01/08/2003	0	227,88	16/09/2003	0	187,43
02/08/2003	0	226,8	17/09/2003	19,3	186,61
03/08/2003	0	225,72	18/09/2003	0	185,79
04/08/2003	0	224,63	19/09/2003	0	184,98
05/08/2003	0	223,55	20/09/2003	0	184,16
06/08/2003	0	222,46	21/09/2003	0	183,34
07/08/2003	2,8	221,38	22/09/2003	0	182,53
08/08/2003	3,2	220,3	23/09/2003	0	181,71
09/08/2003	3,1	219,21	24/09/2003	0	180,91
10/08/2003	1,8	218,13	25/09/2003	0	180,11
11/08/2003	0	217,05	26/09/2003	0	179,34
12/08/2003	0	215,96	27/09/2003	3,6	178,59
13/08/2003	0	214,88	28/09/2003	0	177,87
14/08/2003	0	213,79	29/09/2003	0	177,19
15/08/2003	0	212,71	30/09/2003	0	176,55

01/10/2003	0	175,93	16/11/2003	24,5	154,93
02/10/2003	0	175,32	17/11/2003	66,5	155,8
03/10/2003	0	174,69	18/11/2003	41,5	157,03
04/10/2003	0	174,06	19/11/2003	8,2	158,59
05/10/2003	0	173,41	20/11/2003	0	160,38
06/10/2003	0	172,76	21/11/2003	0	162,25
07/10/2003	0	172,14	22/11/2003	0	164,1
08/10/2003	12,7	171,53	23/11/2003	0	165,82
09/10/2003	0	170,94	24/11/2003	15,5	167,37
10/10/2003	4,3	170,38	25/11/2003	9,4	168,75
11/10/2003	35,5	169,85	26/11/2003	0	169,96
12/10/2003	12,7	169,36	27/11/2003	6,7	171,03
13/10/2003	0	168,91	28/11/2003	0	171,99
14/10/2003	0	168,49	29/11/2003	0	172,95
15/10/2003	0	168,09	30/11/2003	0	174
16/10/2003	0	167,67	01/12/2003	44,5	175,24
17/10/2003	0	167,23	02/12/2003	23,7	176,77
18/10/2003	0	166,76	03/12/2003	24,2	178,6
19/10/2003	0	166,26	04/12/2003	20,9	180,76
20/10/2003	0	165,73	05/12/2003	3,6	183,2
21/10/2003	0	165,2	06/12/2003	34	185,88
22/10/2003	1,5	164,66	07/12/2003	0	188,72
23/10/2003	0,2	164,12	08/12/2003	0,4	191,7
24/10/2003	0	163,59	09/12/2003	15,5	194,74
25/10/2003	0	163,07	10/12/2003	7,4	197,79
26/10/2003	0	162,55	11/12/2003	0	200,8
27/10/2003	15,6	162,02	12/12/2003	0	203,72
28/10/2003	9,9	161,5	13/12/2003	0	206,52
29/10/2003	3,2	160,98	14/12/2003	0	209,18
30/10/2003	13,6	160,47	15/12/2003	2,2	211,7
31/10/2003	0	159,96	16/12/2003	0	214,09
01/11/2003	0	159,46	17/12/2003	10,3	216,35
02/11/2003	26,8	158,97	18/12/2003	0	218,49
03/11/2003	0	158,48	19/12/2003	0	220,51
04/11/2003	0	158	20/12/2003	0	222,4
05/11/2003	0	157,52	21/12/2003	3,8	224,15
06/11/2003	1	157,05	22/12/2003	10,2	225,78
07/11/2003	17,2	156,59	23/12/2003	7,1	227,27
08/11/2003	0,3	156,14	24/12/2003	0	228,66
09/11/2003	0	155,69	25/12/2003	0	229,95
10/11/2003	0	155,26	26/12/2003	0	231,14
11/11/2003	0	154,86	27/12/2003	0	232,23
12/11/2003	0	154,53	28/12/2003	0,2	233,21
13/11/2003	5,7	154,31	29/12/2003	13,9	234,09
14/11/2003	5,7	154,26	30/12/2003	0	234,88
15/11/2003	0	154,44	31/12/2003	5,6	235,64

01/01/2004	27,7	236,38	16/02/2004	1,6	339,41
02/01/2004	28,2	237,11	17/02/2004	0	341,98
03/01/2004	2	237,83	18/02/2004	0	344,87
04/01/2004	0	238,54	19/02/2004	0,5	348,14
05/01/2004	0	239,23	20/02/2004	0	351,82
06/01/2004	0	239,94	21/02/2004	0,7	355,85
07/01/2004	18,2	240,76	22/02/2004	59	360,13
08/01/2004	2,8	241,78	23/02/2004	72,1	364,56
09/01/2004	70	243,08	24/02/2004	7,5	369,02
10/01/2004	29,4	244,69	25/02/2004	31,5	373,48
11/01/2004	0	246,59	26/02/2004	14,5	377,93
12/01/2004	0	248,72	27/02/2004	0	382,41
13/01/2004	1,2	251,02	28/02/2004	7,7	386,99
14/01/2004	0	253,43	29/02/2004	0	391,71
15/01/2004	0,7	255,9	01/03/2004	0	396,54
16/01/2004	8,1	258,41	02/03/2004	0	401,35
17/01/2004	0	260,94	03/03/2004	0	406,01
18/01/2004	0	263,47	04/03/2004	7,3	410,5
19/01/2004	0	265,96	05/03/2004	0	414,93
20/01/2004	0	268,39	06/03/2004	0,2	419,41
21/01/2004	0	270,72	07/03/2004	75,9	423,96
22/01/2004	0	272,93	08/03/2004	0	428,46
23/01/2004	0	275,04	09/03/2004	0	432,68
24/01/2004	24,5	277,11	10/03/2004	0	436,31
25/01/2004	0	279,23	11/03/2004	0	439,13
26/01/2004	73,1	281,46	12/03/2004	0	441,14
27/01/2004	34,1	283,82	13/03/2004	0	442,52
28/01/2004	28,3	286,24	14/03/2004	16	443,45
29/01/2004	3,1	288,65	15/03/2004	9,9	444,06
30/01/2004	0	291	16/03/2004	0	444,46
31/01/2004	0	293,29	17/03/2004	0	444,75
01/02/2004	21,2	295,6	18/03/2004	0,4	445,09
02/02/2004	8	298,05	19/03/2004	0	445,56
03/02/2004	13,1	300,75	20/03/2004	38,2	446,19
04/02/2004	8,5	303,73	21/03/2004	18,9	446,95
05/02/2004	4,9	306,98	22/03/2004	0	447,75
06/02/2004	9,6	310,42	23/03/2004	0	448,46
07/02/2004	6,2	313,95	24/03/2004	0	449,02
08/02/2004	0	317,48	25/03/2004	0	449,41
09/02/2004	0	320,91	26/03/2004	0	449,67
10/02/2004	0	324,14	27/03/2004	27,2	449,81
11/02/2004	0	327,12	28/03/2004	0	449,84
12/02/2004	0	329,84	29/03/2004	5	449,75
13/02/2004	0	332,35	30/03/2004	0	449,56
14/02/2004	0,8	334,72	31/03/2004	0	449,27
15/02/2004	47	337,03	01/04/2004	0	448,91

02/04/2004	0	448,51	18/05/2004	1,9	441,6
03/04/2004	0	448,1	19/05/2004	2,2	440,48
04/04/2004	0	447,77	20/05/2004	1,6	439,38
05/04/2004	1,5	447,62	21/05/2004	0	438,29
06/04/2004	2,4	447,71	22/05/2004	9,2	437,23
07/04/2004	67,4	448,09	23/05/2004	0	436,23
08/04/2004	7,8	448,74	24/05/2004	4,6	435,31
09/04/2004	0	449,59	25/05/2004	14,4	434,47
10/04/2004	0	450,52	26/05/2004	20,5	433,71
11/04/2004	0	451,35	27/05/2004	0	433,02
12/04/2004	0	451,96	28/05/2004	0	432,35
13/04/2004	0	452,26	29/05/2004	0	431,63
14/04/2004	0,8	452,26	30/05/2004	0,6	430,8
15/04/2004	8,6	452,05	31/05/2004	0,2	429,81
16/04/2004	17,7	451,76	01/06/2004	1,3	428,66
17/04/2004	2,4	451,49	02/06/2004	0	427,42
18/04/2004	0	451,34	03/06/2004	7,7	426,19
19/04/2004	0	451,31	04/06/2004	21,9	425,07
20/04/2004	15,6	451,4	05/06/2004	0	424,05
21/04/2004	0	451,56	06/06/2004	0	423,1
22/04/2004	28	451,76	07/06/2004	0	422,15
23/04/2004	0	451,98	08/06/2004	0	421,15
24/04/2004	0	452,19	09/06/2004	0	420,13
25/04/2004	14,5	452,38	10/06/2004	0,2	419,16
26/04/2004	8,6	452,52	11/06/2004	0	418,31
27/04/2004	0	452,62	12/06/2004	0	417,6
28/04/2004	0	452,68	13/06/2004	16,9	417
29/04/2004	0	452,69	14/06/2004	0	416,42
30/04/2004	0	452,64	15/06/2004	0	415,82
01/05/2004	0	452,53	16/06/2004	2,9	415,17
02/05/2004	0	452,36	17/06/2004	0	414,48
03/05/2004	0	452,15	18/06/2004	0	413,76
04/05/2004	0	451,92	19/06/2004	0	413,01
05/05/2004	7,3	451,66	20/06/2004	0	412,27
06/05/2004	7,3	451,38	21/06/2004	0	411,51
07/05/2004	3,4	451,06	22/06/2004	0	410,75
08/05/2004	4,1	450,65	23/06/2004	0	409,98
09/05/2004	0	450,14	24/06/2004	0	409,18
10/05/2004	0	449,5	25/06/2004	0	408,36
11/05/2004	0	448,74	26/06/2004	0	407,5
12/05/2004	0	447,86	27/06/2004	0	406,63
13/05/2004	0	446,91	28/06/2004	0	405,76
14/05/2004	1,4	445,9	29/06/2004	0	404,9
15/05/2004	2,4	444,86	30/06/2004	0	404,05
16/05/2004	13,6	443,79	01/07/2004	0	403,2
17/05/2004	0	442,7	02/07/2004	0	402,33

03/07/2004	0	401,41	18/08/2004	0	357,78
04/07/2004	0	400,43	19/08/2004	0	356,75
05/07/2004	0	399,4	20/08/2004	0	355,7
06/07/2004	0	398,32	21/08/2004	0	354,64
07/07/2004	0	397,24	22/08/2004	0	353,55
08/07/2004	0	396,2	23/08/2004	0	352,44
09/07/2004	1,8	395,22	24/08/2004	0	351,31
10/07/2004	0	394,29	25/08/2004	0	350,17
11/07/2004	48,4	393,39	26/08/2004	0	349,01
12/07/2004	0	392,48	27/08/2004	0	347,87
13/07/2004	0	391,55	28/08/2004	0	346,73
14/07/2004	0	390,56	29/08/2004	0	345,62
15/07/2004	0	389,53	30/08/2004	0	344,52
16/07/2004	0	388,49	31/08/2004	0	343,44
17/07/2004	0	387,49	01/09/2004	0	342,37
18/07/2004	0,4	386,54	02/09/2004	0	341,33
19/07/2004	16,4	385,67	03/09/2004	0	340,31
20/07/2004	30,5	384,88	04/09/2004	0	339,31
21/07/2004	0,4	384,13	05/09/2004	0	338,3
22/07/2004	0	383,39	06/09/2004	0	337,27
23/07/2004	0	382,63	07/09/2004	0	336,23
24/07/2004	0	381,82	08/09/2004	0	335,16
25/07/2004	0	380,97	09/09/2004	0	334,07
26/07/2004	0	380,08	10/09/2004	0	332,97
27/07/2004	0	379,18	11/09/2004	0	331,89
28/07/2004	0	378,26	12/09/2004	0	330,82
29/07/2004	0	377,34	13/09/2004	0	329,77
30/07/2004	0	376,41	14/09/2004	0	328,72
31/07/2004	0	375,47	15/09/2004	0	327,66
01/08/2004	0	374,54	16/09/2004	0	326,61
02/08/2004	0	373,6	17/09/2004	0	325,55
03/08/2004	0	372,65	18/09/2004	0	324,48
04/08/2004	0	371,69	19/09/2004	1,8	323,42
05/08/2004	0	370,72	20/09/2004	0	322,35
06/08/2004	0	369,75	21/09/2004	0	321,26
07/08/2004	0	368,77	22/09/2004	0	320,15
08/08/2004	0	367,79	23/09/2004	0	319,03
09/08/2004	0	366,81	24/09/2004	0	317,9
10/08/2004	0	365,82	25/09/2004	0	316,78
11/08/2004	0	364,83	26/09/2004	0	315,65
12/08/2004	0	363,83	27/09/2004	9,2	314,52
13/08/2004	0	362,83	28/09/2004	0	313,41
14/08/2004	0	361,83	29/09/2004	0	312,32
15/08/2004	0	360,83	30/09/2004	0	311,29
16/08/2004	0	359,83	01/10/2004	1,3	310,32
17/08/2004	0	358,81	02/10/2004	5,5	309,42

03/10/2004	14,8	308,56	18/11/2004	2,8	270,75
04/10/2004	5,8	307,72	19/11/2004	49,1	270,88
05/10/2004	0	306,87	20/11/2004	0	271,17
06/10/2004	0	306	21/11/2004	0	271,54
07/10/2004	0	305,1	22/11/2004	0	271,86
08/10/2004	0	304,17	23/11/2004	0	272,04
09/10/2004	0	303,23	24/11/2004	0	272,06
10/10/2004	0	302,29	25/11/2004	0	271,91
11/10/2004	24,9	301,34	26/11/2004	0	271,64
12/10/2004	0,7	300,39	27/11/2004	0	271,29
13/10/2004	1,6	299,46	28/11/2004	7,4	270,9
14/10/2004	12,5	298,55	29/11/2004	22,6	270,5
15/10/2004	0	297,68	30/11/2004	0	270,11
16/10/2004	11,6	296,84	01/12/2004	0	269,71
17/10/2004	12,5	296,03	02/12/2004	0	269,33
18/10/2004	4,7	295,22	03/12/2004	1	268,97
19/10/2004	3,5	294,41	04/12/2004	6	268,63
20/10/2004	0	293,59	05/12/2004	0	268,3
21/10/2004	0	292,76	06/12/2004	0,4	267,96
22/10/2004	0	291,92	07/12/2004	0	267,6
23/10/2004	0	291,07	08/12/2004	0	267,22
24/10/2004	0	290,21	09/12/2004	4,2	266,82
25/10/2004	0	289,31	10/12/2004	9,6	266,4
26/10/2004	13,8	288,38	11/12/2004	0	265,98
27/10/2004	0	287,44	12/12/2004	0	265,55
28/10/2004	0	286,5	13/12/2004	0	265,12
29/10/2004	0	285,59	14/12/2004	0	264,69
30/10/2004	0	284,71	15/12/2004	0	264,25
31/10/2004	0	283,87	16/12/2004	2,3	263,8
01/11/2004	13,8	283,03	17/12/2004	0	263,34
02/11/2004	0	282,18	18/12/2004	0	262,87
03/11/2004	0	281,31	19/12/2004	0	262,4
04/11/2004	11,7	280,44	20/12/2004	0	261,93
05/11/2004	0,8	279,56	21/12/2004	17,9	261,46
06/11/2004	0	278,69	22/12/2004	3,4	261,02
07/11/2004	2,8	277,83	23/12/2004	3,5	260,65
08/11/2004	0	277	24/12/2004	13,6	260,47
09/11/2004	0	276,18	25/12/2004	0	260,57
10/11/2004	0	275,38	26/12/2004	8,8	260,98
11/11/2004	0,3	274,58	27/12/2004	71,6	261,66
12/11/2004	46	273,81	28/12/2004	0	262,49
13/11/2004	0	273,05	29/12/2004	0	263,32
14/11/2004	0	272,33	30/12/2004	0	263,99
15/11/2004	0	271,68	31/12/2004	0	264,42
16/11/2004	32,3	271,17	01/01/2005	0	264,66
17/11/2004	2,7	270,84	02/01/2005	3,8	264,81

03/01/2005	0,3	265,01	18/02/2005	0	394,16
04/01/2005	22,6	265,38	19/02/2005	16,8	394,02
05/01/2005	50,8	266,03	20/02/2005	0	393,76
06/01/2005	3,2	267,02	21/02/2005	0	393,39
07/01/2005	2,9	268,35	22/02/2005	0	392,9
08/01/2005	17,2	269,93	23/02/2005	0	392,27
09/01/2005	0	271,67	24/02/2005	0	391,51
10/01/2005	0	273,43	25/02/2005	0	390,61
11/01/2005	0	275,13	26/02/2005	7,4	389,57
12/01/2005	3,5	276,68	27/02/2005	0,5	388,4
13/01/2005	0	278,07	28/02/2005	1,3	387,05
14/01/2005	0	279,31	01/03/2005	0	385,5
15/01/2005	0	280,45	02/03/2005	0	383,76
16/01/2005	0	281,56	03/03/2005	0	381,88
17/01/2005	0,4	282,73	04/03/2005	0	379,97
18/01/2005	0	284	05/03/2005	0	378,14
19/01/2005	18	285,41	06/03/2005	0	376,42
20/01/2005	18,6	286,94	07/03/2005	0	374,79
21/01/2005	10,7	288,57	08/03/2005	0	373,2
22/01/2005	0,7	290,29	09/03/2005	0	371,59
23/01/2005	64,7	292,1	10/03/2005	0,7	369,94
24/01/2005	0	293,98	11/03/2005	0	368,3
25/01/2005	0	296,13	12/03/2005	0	366,71
26/01/2005	45,8	299,2	13/03/2005	0	365,19
27/01/2005	2,1	304,17	14/03/2005	43,2	363,77
28/01/2005	20,5	311,77	15/03/2005	33	362,5
29/01/2005	62,8	321,84	16/03/2005	6,9	361,45
30/01/2005	122,6	333,32	17/03/2005	33,1	360,69
31/01/2005	11	344,67	18/03/2005	2,6	360,28
01/02/2005	0	354,53	19/03/2005	5,8	360,16
02/02/2005	16,4	362,18	20/03/2005	1,6	360,21
03/02/2005	3,6	367,82	21/03/2005	0,4	360,28
04/02/2005	3,3	372,25	22/03/2005	5,7	360,21
05/02/2005	20,8	376,29	23/03/2005	4,7	360
06/02/2005	0	380,23	24/03/2005	22,1	359,7
07/02/2005	0	383,9	25/03/2005	7,7	359,34
08/02/2005	0	387,03	26/03/2005	0	358,93
09/02/2005	0	389,5	27/03/2005	0	358,41
10/02/2005	0	391,3	28/03/2005	0	357,72
11/02/2005	0	392,51	29/03/2005	0	356,88
12/02/2005	2,5	393,24	30/03/2005	0	355,98
13/02/2005	0	393,64	31/03/2005	0	355,19
14/02/2005	0	393,86	01/04/2005	0	354,62
15/02/2005	0	394,01	02/04/2005	0	354,33
16/02/2005	0	394,13	03/04/2005	0	354,22
17/02/2005	0	394,19	04/04/2005	0	354,13

05/04/2005	24,4	353,94	21/05/2005	0	324,49
06/04/2005	0,9	353,59	22/05/2005	17,1	323,58
07/04/2005	0	353,12	23/05/2005	1,1	322,83
08/04/2005	0	352,61	24/05/2005	0	322,22
09/04/2005	0	352,14	25/05/2005	72	321,71
10/04/2005	0	351,72	26/05/2005	0,5	321,25
11/04/2005	0	351,33	27/05/2005	0	320,77
12/04/2005	0	350,92	28/05/2005	0	320,23
13/04/2005	0	350,46	29/05/2005	0	319,59
14/04/2005	0	349,96	30/05/2005	0,3	318,87
15/04/2005	0	349,46	31/05/2005	2,6	318,06
16/04/2005	0	348,99	01/06/2005	0	317,16
17/04/2005	0	348,54	02/06/2005	0	316,18
18/04/2005	0	348,09	03/06/2005	0	315,16
19/04/2005	0	347,63	04/06/2005	0	314,12
20/04/2005	0	347,17	05/06/2005	0	313,1
21/04/2005	1,2	346,74	06/06/2005	0	312,13
22/04/2005	0	346,34	07/06/2005	0	311,22
23/04/2005	0	345,94	08/06/2005	0	310,33
24/04/2005	3,4	345,46	09/06/2005	0	309,43
25/04/2005	0	344,84	10/06/2005	0	308,48
26/04/2005	0,8	344,06	11/06/2005	0	307,45
27/04/2005	0	343,15	12/06/2005	0	306,28
28/04/2005	0	342,2	13/06/2005	0	304,97
29/04/2005	0,9	341,29	14/06/2005	0	303,51
30/04/2005	1	340,45	15/06/2005	0	301,97
01/05/2005	0	339,7	16/06/2005	0	300,39
02/05/2005	0	339	17/06/2005	0	298,86
03/05/2005	0	338,34	18/06/2005	0	297,41
04/05/2005	0	337,72	19/06/2005	2,4	296,06
05/05/2005	0	337,15	20/06/2005	11,8	294,76
06/05/2005	0	336,62	21/06/2005	4,2	293,48
07/05/2005	0	336,13	22/06/2005	0,3	292,2
08/05/2005	0	335,63	23/06/2005	0	290,94
09/05/2005	0	335,06	24/06/2005	0	289,74
10/05/2005	0	334,39	25/06/2005	0	288,6
11/05/2005	0	333,62	26/06/2005	0	287,52
12/05/2005	0	332,79	27/06/2005	0	286,43
13/05/2005	0	331,95	28/06/2005	0	285,28
14/05/2005	0	331,13	29/06/2005	29,4	284,04
15/05/2005	0	330,32	30/06/2005	0	282,72
16/05/2005	0	329,49	01/07/2005	0	281,39
17/05/2005	0	328,6	02/07/2005	0	280,11
18/05/2005	0	327,63	03/07/2005	0	278,94
19/05/2005	0	326,58	04/07/2005	0	277,9
20/05/2005	0	325,51	05/07/2005	0	277

06/07/2005	0	276,19	21/08/2005	0	229,59
07/07/2005	0	275,42	22/08/2005	0	228,43
08/07/2005	0	274,66	23/08/2005	0	227,24
09/07/2005	0	273,87	24/08/2005	0	226,05
10/07/2005	0	273,04	25/08/2005	0,3	224,9
11/07/2005	0	272,16	26/08/2005	0	223,85
12/07/2005	0	271,22	27/08/2005	2,9	222,9
13/07/2005	0	270,24	28/08/2005	8,1	222,05
14/07/2005	0	269,21	29/08/2005	0	221,24
15/07/2005	0	268,17	30/08/2005	0	220,42
16/07/2005	0	267,14	31/08/2005	0	219,58
17/07/2005	0	266,13	01/09/2005	0	218,72
18/07/2005	0	265,12	02/09/2005	13,2	217,86
19/07/2005	0	264,1	03/09/2005	0,3	217,04
20/07/2005	0,3	263,02	04/09/2005	0	216,25
21/07/2005	0	261,88	05/09/2005	22,6	215,5
22/07/2005	0,9	260,69	06/09/2005	5,4	214,76
23/07/2005	0	259,48	07/09/2005	0	214,02
24/07/2005	0	258,29	08/09/2005	0	213,28
25/07/2005	1,7	257,15	09/09/2005	0	212,53
26/07/2005	0	256,05	10/09/2005	0	211,79
27/07/2005	0	254,99	11/09/2005	0	211,05
28/07/2005	0,7	253,95	12/09/2005	0	210,3
29/07/2005	0	252,94	13/09/2005	0	209,56
30/07/2005	0	251,93	14/09/2005	0	208,82
31/07/2005	0	250,92	15/09/2005	1,6	208,07
01/08/2005	0	249,89	16/09/2005	1,8	207,33
02/08/2005	0	248,83	17/09/2005	20,5	206,59
03/08/2005	0	247,75	18/09/2005	2,1	205,84
04/08/2005	0	246,68	19/09/2005	0,2	205,1
05/08/2005	0	245,61	20/09/2005	0	204,36
06/08/2005	0	244,57	21/09/2005	0	203,61
07/08/2005	0	243,53	22/09/2005	0	202,87
08/08/2005	0	242,48	23/09/2005	0	202,13
09/08/2005	0	241,43	24/09/2005	0	201,37
10/08/2005	0	240,39	25/09/2005	0,2	200,6
11/08/2005	0	239,38	26/09/2005	4,9	199,79
12/08/2005	0	238,43	27/09/2005	7,9	198,94
13/08/2005	0	237,52	28/09/2005	0,4	198,03
14/08/2005	0	236,65	29/09/2005	0	197,06
15/08/2005	0	235,78	30/09/2005	0	196,02
16/08/2005	8	234,88	01/10/2005	0	194,91
17/08/2005	0	233,92	02/10/2005	5	193,73
18/08/2005	0	232,9	03/10/2005	0	192,49
19/08/2005	0	231,83	04/10/2005	0	191,22
20/08/2005	0	230,72	05/10/2005	0	189,93

06/10/2005	0	188,63	19/11/2005	0	159,15
07/10/2005	0	187,34	20/11/2005	8	158,61
08/10/2005	10,2	186,04	21/11/2005	0	158,06
09/10/2005	0	184,78	22/11/2005	0	157,52
10/10/2005	0	183,58	23/11/2005	2,3	157,01
11/10/2005	0	182,46	24/11/2005	78,4	156,54
12/10/2005	0,2	181,42	25/11/2005	11	156,13
13/10/2005	0	180,42	26/11/2005	15,2	155,79
14/10/2005	0	179,42	27/11/2005	0	155,52
15/10/2005	37,1	178,42	28/11/2005	0	155,27
16/10/2005	0	177,46	29/11/2005	0	155
17/10/2005	0	176,6	30/11/2005	0	154,7
18/10/2005	1	175,9	01/12/2005	7,8	154,38
19/10/2005	0,6	175,4	02/12/2005	5	154,03
20/10/2005	2,3	175,05	03/12/2005	25,2	153,67
21/10/2005	0	174,81	04/12/2005	0	153,3
22/10/2005	3,3	174,57	05/12/2005	0	152,95
23/10/2005	4,8	174,27	06/12/2005	14,9	152,65
24/10/2005	0	173,87	07/12/2005	21,9	152,44
25/10/2005	0	173,36	08/12/2005	0	152,35
26/10/2005	0	172,76	09/12/2005	0	152,43
27/10/2005	4,4	172,1	10/12/2005	8,3	152,65
28/10/2005	0	171,42	11/12/2005	1,3	152,94
29/10/2005	8,3	170,77	12/12/2005	2,5	153,22
30/10/2005	1,9	170,15	13/12/2005	0	153,47
31/10/2005	0,6	169,56	14/12/2005	0	153,73
01/11/2005	0	168,98	15/12/2005	25,4	154,03
02/11/2005	0	168,39	16/12/2005	0	154,43
03/11/2005	0,2	167,8	17/12/2005	24,2	154,92
04/11/2005	0	167,21	18/12/2005	9,4	155,45
05/11/2005	9,3	166,63	19/12/2005	5	155,94
06/11/2005	0	166,09	20/12/2005	0	156,33
07/11/2005	0	165,61	21/12/2005	0	156,62
08/11/2005	0	165,2	22/12/2005	0	156,85
09/11/2005	0	164,8	23/12/2005	0	157,05
10/11/2005	0	164,34	24/12/2005	0	157,99
11/11/2005	0	163,78	25/12/2005	1,7	158,35
12/11/2005	0	163,1	26/12/2005	0	158,72
13/11/2005	0	162,38	27/12/2005	0	159,09
14/11/2005	0	161,69	28/12/2005	0	159,45
15/11/2005	0	161,1	29/12/2005	0	159,82
16/11/2005	0	160,59	30/12/2005	0	160,18
17/11/2005	0,7	160,12	31/12/2005	22,9	160,55
18/11/2005	17,4	159,65			