

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO PARA ANÁLISE DA  
VULNERABILIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUB-SUPERFICIAIS  
À POLUIÇÃO, ÁREA URBANA E SEU ENTORNO, MUNICÍPIO DE  
SÃO CARLOS – SP.**

**THIAGO YAMADA**

**São Carlos**

**2007**

**FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO PARA ANÁLISE DA  
VULNERABILIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUB-SUPERFICIAIS  
À POLUIÇÃO, ÁREA URBANA E SEU ENTORNO, MUNICÍPIO DE  
SÃO CARLOS – SP.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO PARA ANÁLISE DA  
VULNERABILIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUB-SUPERFICIAIS  
À POLUIÇÃO, ÁREA URBANA E SEU ENTORNO, MUNICÍPIO DE  
SÃO CARLOS – SP.**

**THIAGO YAMADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Adail Ricardo Leister Gonçalves

**São Carlos**

**2007**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

Y19fg

Yamada, Thiago.

Ferramentas de geoprocessamento para análise da vulnerabilidade natural das águas sub-superficiais à poluição, área urbana e seu entorno, município de São Carlos - SP / Thiago Yamada. -- São Carlos : UFSCar, 2007. 67 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Água - poluição. 2. Método GOD. 3. Vulnerabilidade natural. 4. Aquíferos. 5. Software SPRING. I. Título.

CDD: 628.168 (20<sup>a</sup>)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

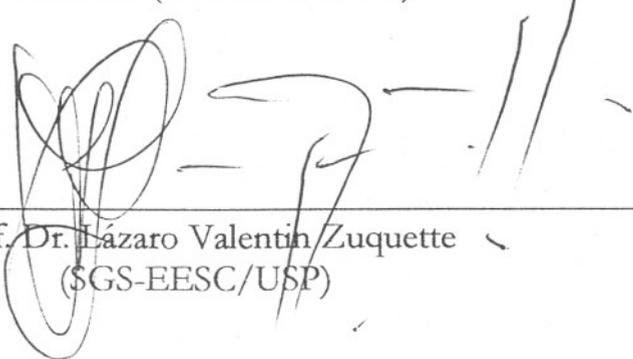
THIAGO YAMADA

Dissertação defendida e aprovada em 08/08/2007  
pela Comissão Julgadora



---

Prof. Dr. Adail Ricardo Leister Gonçalves  
Orientador (DECiv/UFSCar)



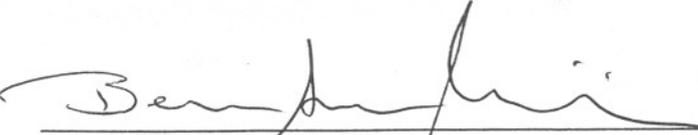
---

Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette  
(SGS-EESC/USP)



---

Prof. Dr. Reinaldo Lorandi  
(DECiv/UFSCar)



---

Prof. Dr. Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira  
Presidente da CPG-EU

## DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, meus pais Fátima e Romeu,  
irmãos Fábio e Rafael, a Virginia minha  
companheira, Carmen e Maria que sempre me  
incentivaram e auxiliaram no decorrer desta  
pesquisa

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de São Carlos - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU), pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa e a todos que diretamente e indiretamente contribuíram para esta pesquisa.

A CAPES, pela bolsa concedida;

Ao Professor orientador Adail Ricardo Leister Gonçalves; A Professora Suely da Penha Sanches; Ao Professor Sergio Antonio Röhms; Ao Professor Reinaldo Lorandi; Ao Professor José Augusto de Lollo; Ao Pessoal do Laboratório de Geociências (Marcão, Vitor); Laboratório de Geoprocessamento (Júnior); Ao Professor Edson Augusto Melanda; Ao Professor Lázaro Valentin Zuquette.

À nossa querida Sônia Guimarães, secretária do PPGEU;

Ao DAEE – Araraquara (Carlinhos);

À Professora Andréa Aparecida Zacharias, UNESP –Ourinhos;

A todos amigos e colegas do PPGEU;

A todos meus familiares;

Ao pessoal do Mountain Bike – São Carlos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>4</b>
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>4</b>
<b>4. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO.....</b>	<b>5</b>
4.1 Aspectos Geomorfológicos e pedológicos.....	6
4.2 Hidrografia.....	6
4.3 Geologia regional.....	7
4.3.1 Geologia local.....	14
4.4 Hidrogeologia local.....	15
4.5 Clima.....	19
4.6 Vegetação.....	19
<b>5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>20</b>
5.1 Vulnerabilidade natural à poluição de águas subterrâneas.....	20
5.1.1 Apresentação das metodologias de avaliação da vulnerabilidade.....	20
5.1.2 Método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos.....	21
5.2 Geoprocessamento.....	25

5.3 Sistema de Informações Geográficas.....	25
5.4 Sistema de Informação Geográfica e vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos.....	27
5.5 Geoestatística.....	30
5.6 Síntese da situação dos Recursos Hídricos: Panorama Global e a Área de Estudo.....	32
5.6.1 Disponibilidade Hídrica.....	32
5.6.2 Síntese da legislação e programas estaduais de Recursos Hídricos.....	34
5.6.3 Características da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tiête/Jacaré (UHGRHI-13).....	36
5.6.4 O ciclo hidrológico e a disponibilidade do Recurso Hídrico Subterrâneo.....	37
<b>6. MATERIAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>7. METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
<b>8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
8.1 Mapa Documentação dos Poços.....	43
8.2 Mapa Profundidade do nível d`água sub-superficial.....	45
8.2.1 Geoestatística.....	45
8.3 Mapa Substrato Rochoso.....	51
8.4 Mapa do Tipo de Ocorrência das águas sub-superficiais.....	54
8.5 Mapa de Vulnerabilidade Natural à poluição das águas sub-superficiais.....	56
<b>9. CONCLUSÕES.....</b>	<b>59</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>60</b>

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1 – Localizações do estado de São Paulo, município de São Carlos e área de estudo.....	5
FIGURA 2 – Diagrama espaço-tempo para os ciclos sedimentares e erosivos no flanco nordeste (Bacia do Paraná).....	8
FIGURA 3 – Perfil geológico da região.....	13
FIGURA 4 - Descrição esquemática do método GOD.....	23
FIGURA 5 – Componentes do SIG.....	26
FIGURA 6 – Distribuição das águas no planeta.....	33
FIGURA 7: Ciclo hidrológico.....	38
FIGURA 8: Fluxograma das etapas desenvolvidas nesta pesquisa.....	40
FIGURA 9: Descrição esquemática do método GOD.....	42
FIGURA 10: Mapa Documentação dos Poços.....	44
FIGURA 11: Mapa Profundidade do nível d'água sub-superficial.....	50
FIGURA 12: Mapa Substrato Rochoso.....	53
FIGURA 13: Mapa Tipo de Ocorrência água sub-superficiais.....	55
FIGURA 14: Mapa de Vulnerabilidade Natural à poluição das águas sub-superficiais....	58

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – Poços da área de estudo.....	16
TABELA 2 - Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade à poluição do aquífero.....	24
TABELA 3 - Estratos geológicos e suas características na área de estudo.....	51
TABELA 4 - Aquífero, grau de confinamento e estratos geológicos na área de estudo...	54
TABELA 5 - Classes de vulnerabilidade natural de aquíferos e suas respectivas definições.....	57

**LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

ANA – Agência Nacional das Águas

APP – Área de Preservação Permanente

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

DRASTIC - Depth to groundwater; Recharge; Aquifer media; Soil media; Topography; Impact of the vadose zone; Conductivity hydraulic

EMPRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GOD – Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth groundwater table

GPS – Sistema de Posicionamento Global por Satélite

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MCT - Convenção sobre Mudanças Climáticas

N.A. – Nível d'água

N.D. – Nível Dinâmico

N.E. – Nível Estático

PDC-4 - Programa de Duração Continuada número 04

PI – Plano de Informação

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAAE – Serviço Autônomo de Águas e Esgotos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SPRING – Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

UEPAE São Carlos – Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de São Carlos

UHGRHI-13 - Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tiête/Jacaré

UTM – Projeção Universal Transversa de Mercator

## RESUMO

Mais ou menos 97% da água doce disponível para uso da humanidade encontra-se no subsolo, na forma de água subterrânea. Isso fez com que a preocupação com a contaminação das águas subterrâneas tenha aumentado no meio científico. Importantes estudos desenvolvidos em várias regiões do mundo têm mostrado que os recursos hídricos estão sendo atingidos por fontes potencialmente poluentes, oriundas principalmente de produtos utilizados na agricultura, na indústria e na disposição dos resíduos. A Organização das Nações Unidas já alertou: em 2025, cerca de 2,7 bilhões de pessoas, em todo o mundo, enfrentarão a falta d'água potável. Esse fato implica em especial preocupação com a proteção das águas subterrâneas devido à dificuldade e a impraticabilidade de se promover à remoção de poluentes de fontes pontuais de captação (poços) e devido ao fato de que a reabilitação de um aquífero poluído requer custos muitos elevados. Neste sentido, esta pesquisa tem por objetivo elaborar um documento cartográfico temático preventivo que enfoque qualitativamente a vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais da área urbana e peri-urbana de São Carlos-SP, com a utilização do método GOD e geoprocessamento com o software SPRING 4.2 – Inpe. Que possa futuramente subsidiar o poder público municipal no planejamento e desenvolvimento de políticas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos do município de São Carlos - SP.

**Palavras – chave:** GOD, Vulnerabilidade Natural, Poluição, Aquífero, Geoprocessamento, SPRING.

## ABSTRACT

Nearly 97% of all fresh water available to humankind lies beneath the soil, as underground water, which makes scientists increasingly worried about its pollution. Important studies carried out in several regions of the world show that many fresh water resources have already been impacted by potentially pollution sources, especially by residues of agricultural, industrial and/or domestic origin. As a result, the UN has warned that by 2025 approximately 2.7 billion people worldwide will face serious shortage. What is more, protection of groundwater cannot be postponed since it is difficult and impractical to remove pollutants from local sources (wells) and very costly to decontaminate vast reservoirs. In consideration of this, the objective of this study was to elaborate a thematic, guiding cartographic document that qualitatively focused on natural vulnerability to pollutants of groundwater within the perimeter and urban areas of São Carlos, SP, Brazil, by means of GOD methodology and SPRING 4.2 - Inpe geoprocessing software. This document was also intended to assist the city administration in future planning and establishment of public policies aimed at protecting its groundwater resources.

**Key-words:** GOD, Natural vulnerability, Pollution, Groundwater, Geoprocessing, Spring.

# 1. INTRODUÇÃO

A princípio, os ambientes naturais mostravam-se em estado de equilíbrio dinâmico. No entanto, as sociedades humanas passaram progressivamente a intervir cada vez de forma mais intensa na apropriação dos recursos naturais.

De acordo com as colocações de Grigoriev (1968), “O Estrato Geográfico da Terra é composto pela crosta terrestre, hidrosfera, troposfera, cobertura vegetal e reino animal, que em conjunto, definem os ambientes onde vivem os homens”. Com a revolução industrial, as técnicas de produção implantadas e o consumo predatório provocaram um grande impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente. Acredita-se que a interferência humana no equilíbrio da natureza, provavelmente tem sua origem na Idade dos Metais, na Era Paleolítica, mas “... os abusos, num problema de escala, começaram com a Revolução Industrial, no século XVIII, acentuando-se nos séculos XIX e particularmente no XX, devendo-se considerar o aumento populacional e o conseqüente consumo desenfreado de bens básicos e supérfluos como fatores complicadores”. (PELLEGRINI, 1993).

A industrialização é percebida como resultado da pressão exercida pelo crescimento da população sobre os recursos limitados do planeta. Por outro lado, é interpretada como o efeito da acumulação de capital e da maximização da taxa de lucro em curto prazo, que induzem os padrões tecnológicos de uso e ritmos de exploração da natureza, bem como formas de consumo, que vêm esgotando as reservas de recursos naturais, degradando a fertilidade dos solos, poluindo as águas e afetando as condições de regeneração dos ecossistemas naturais (LEFF, 2001).

Com os complexos avanços tecnológicos, científicos e econômicos houve uma rápida modificação nos sistemas de produção. Este novo cenário proporcionou uma pressão muito grande sobre os recursos naturais, muitas vezes, alterando de modo irreversível estes recursos.

Diante dessa revolução tecnológica e, conseqüentemente, das práticas econômicas predatórias, a atuação dos homens tem causado progressivas alterações nos diferentes componentes da natureza, acarretando o comprometimento da funcionalidade do sistema e causando graves processos degenerativos no ambiente natural.

Dada à completa inter-relação dos componentes da natureza (relevo, solo, vegetação, clima e recursos hídricos), qualquer interferência num destes elementos reflete sobre os demais componentes do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico. Segundo Ross (1990), “Todas as modificações inseridas pelo homem no ambiente natural alteram o equilíbrio de uma natureza que não é estática, mas que apresenta quase sempre um dinamismo harmonioso em evolução estável e contínua, quando não afetada pelos homens”. Quando este equilíbrio é alterado, gera-se então, estados de desequilíbrios temporários ou permanentes.

Hoje existe uma conscientização bem maior por parte da comunidade da necessidade de preservação dos recursos naturais, especialmente a partir da reunião de cúpula no Rio de Janeiro em 1992, onde foi assinada a Convenção sobre Mudanças Climáticas (MCT, 2002), seguida da instituição do Protocolo de Quioto 2002, sobre a redução da emissão de gases de efeito estufa e o crescimento da atuação das ONG’s ambientalistas.

A grande extensão geográfica do Brasil, associada à complexidade dos ecossistemas que o compõe, requer o uso de geotecnologias no levantamento e monitoramento dos recursos naturais existentes, para promover a racionalização de sua utilização e assegurando seu desenvolvimento sustentável.

A utilização dos SIG’s (Sistemas de Informações Geográficas) é bastante ampla e diversificada, com exemplos nas áreas de cartografia, geologia, geotecnia, geomorfologia, pedologia, planejamento de recursos agropecuários e florestais, ecologia e recursos naturais, planejamento urbano e planejamento de transportes (ROSALEN, 2002).

Em todas estas áreas os SIG's podem ser empregados, facilitando o trabalho da comunidade científica e dos órgãos e entidades ambientais, trazendo benefícios à população (TEXEIRA *et. al.*, 1992).

As informações do meio físico pré-existentes e as informações produzidas foram integradas e representadas no Sistema de Informações Geográficas (Spring 4.2), associado a um banco de dados (access). Possibilitando assim agilizar as sobreposições das informações (álgebra de mapas), análises e integração, melhorando o aproveitamento das informações hidrogeológicas pré-existentes.

## **2. OBJETIVO**

Esta pesquisa tem por objetivo elaborar um documento cartográfico temático que enfoque qualitativamente a vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais da área urbana e de expansão do município de São Carlos – SP.

## **3. JUSTIFICATIVA**

A cidade vive um intenso processo de expansão e, com isso, um aumento considerável de ocupações (muitas vezes desordenadas) e de atividades agressoras ao meio físico, as quais podem vir a gerar ou acelerar o processo de poluição dos aquíferos (PONS, 2006).

Diante de tais fatos, a determinação do grau de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais da área urbana e de expansão do município de São Carlos – SP, possa subsidiar o poder público municipal no planejamento e desenvolvimento de políticas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos da área de São Carlos - SP.

## 4. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O município de São Carlos está localizado na região central do estado de São Paulo, entre as coordenadas 47° 30' e 48° 30' Longitude Oeste e 21° 30' e 22° 30' Latitude Sul (Figura 1). As principais cidades circunvizinhas de São Carlos correspondem a: Analândia, Itirapina, Brotas, Ribeirão Bonito, Ibaté, Araraquara, Américo Brasiliense, Santa Lúcia, Rincão, Luis Antônio, Santa Rita do Passa Quatro e Descalvado. A área ocupada pelo município é de 1.140, 90 Km<sup>2</sup> (OLIVEIRA, 1996). A área adotada para este estudo compreende 193,0 Km<sup>2</sup>, determinada em função dos poços existentes dentro e próximas à área urbanizada.

Segundo IBGE (2006), o município possui uma população total de 218.702 habitantes.

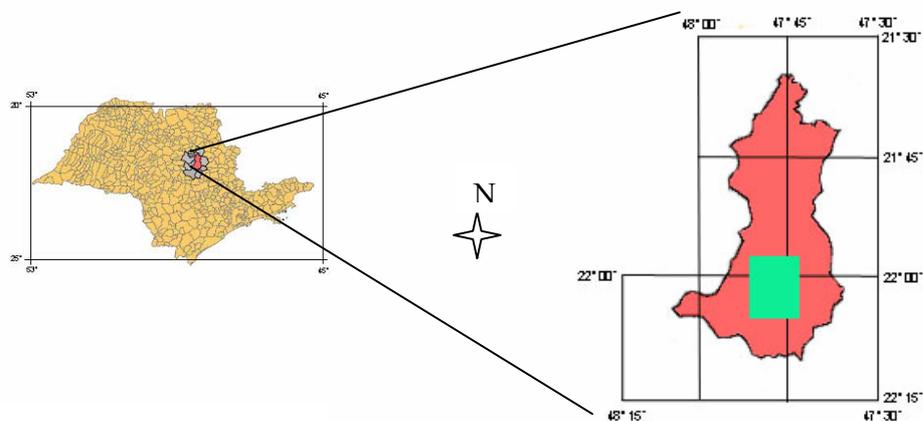


Figura 1: Estado de São Paulo, a localização do município de São Carlos e a área de estudo (verde). Fonte: Plano Diretor, 2003.

#### **4.1 Aspectos Geomorfológicos e Pedológicos**

Segundo Almeida (1964), essa área do estado de São Paulo pertence à Província Geomorfológica das “Cuestas Basálticas” que representam a borda dos derrames basálticos. O município de São Carlos abrange três unidades morfoesculturais: o Planalto Ocidental Paulista, a Depressão Periférica Paulista e as Planícies Fluviais (ROSS & MOROZ, 1997).

De acordo com Gonçalves (1986), o planalto de São Carlos é representado pelas Formações geológicas BOTUCATU (Grupo São Bento), contendo a parte abaixo das cuestas; SERRA GERAL (Grupo São Bento), na estreita região das cuestas, onde ocorre a quebra do relevo (encostas); ITAQUERI (Grupo Bauru), no reverso das cuestas, onde se localiza a maior parcela do núcleo urbano; além de formações superficiais.

Os solos podem ser divididos em dois grandes grupos: Latossolo vermelho – amarelo, na parte alta da área de estudo, e areias quartzosas profundas, abaixo das cuestas (GONÇALVES, 1986).

#### **4.2 Hidrografia**

Bacia do Monjolinho: onde estão localizados os principais córregos que drenam a área urbana são eles: os córregos do Monjolinho; Mineirinho; Gregório; Tijuco; Medeiros; Lazarini; Água quente e Água fria, que flui preferencialmente no sentido leste – oeste. A jusante recebe todo o esgoto da cidade, ainda sem tratamento e, a montante, oferece um importante ponto de captação para o abastecimento de água da cidade no manancial do Espriado;

Bacia do Feijão: situada na APA Corumbataí, é responsável por 40% do abastecimento da água de São Carlos. A Bacia do Feijão é área de recarga do Aquífero Botucatu (PLANO DIRETOR, 2003).

A urbanização está se expandindo na direção das bacias do Monjolinho e do Feijão, necessitando de controle e regulamentação para que tais ocupações não comprometam suas características ambientais (PLANO DIRETOR, 2003).

### **4.3 Geologia Regional**

São Carlos está situada no complexo geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, que abrange boa parte dos estados de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.

Do ponto de vista geológico encontramos representantes que vão desde o Paleozóico até o Cenozóico. Dentro do Paleozóico encontramos o Carbonífero, representado pelo grupo Tubarão e o Permiano, representado pelo grupo Estrada Nova e Formação Corumbataí e Irati. Já no Mesozóico, o Jurássico é representado pelas Formações Botucatu e Pirambóia, o Cretáceo Inferior, pela Formação Serra Geral e o Cretáceo Superior, pelo Grupo Bauru. Finalmente, o Cenozóico é representado, no Pleistoceno, por arenitos, cascalhos, argilas e vegetais fósseis. O Holoceno aparece representado por areias, cascalhos e argilas (GONÇALVES, 1986). Estão representados na Figura 2.

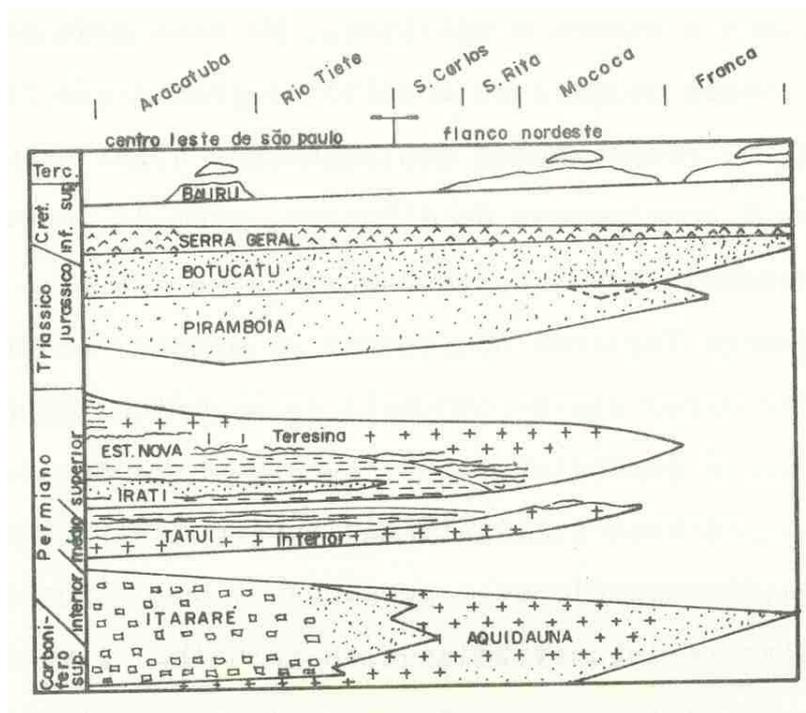


Figura 2: Diagrama espaço-tempo para os ciclos sedimentares e erosivos no flanco nordeste (Bacia do Paraná), Fonte: DAEE, 1974.

- Formação Corumbataí

Segundo Gonçalves (1986), esta formação se apresenta com espessura geralmente inferior a 150 metros, que se reduz para o norte até se anular próximo ao limite de Minas Gerais, recobrendo-se em discordância pela Formação Pirambóia. Na sua parte inferior, apresenta siltitos, argilitos e folhetos cinzentos a roxo acinzentado nos afloramentos, podendo possuir cimentação calcárea. Segue-se uma sucessão de camadas siltosas, ritmicamente alternadas com lâminas, ou delgadas camadas cuja litologia varia entre argilosa e arenosa fina, tanto vertical quanto horizontalmente. As cores vermelhas e arroxeadas passam a predominar nas partes média a superior da formação, onde também se apresentam lestes e bancos calcáreos, com até cerca de meio metro de espessura, contudo bem mais escassos que as ocorrências semelhantes da Formação Terezina, na região de Fartura. Como estruturas sedimentares observa-se estratificação

plano-paralela, cruzada em baixo ângulo, estrutura flaser, estratificação rítmica, marcas onduladas, fraturas de ressecamento e brechas intraformacionais.

- Formação Pirambóia

Segundo Gonçalves (1986), esta formação está exposta ao longo de toda a faixa de ocorrência dos sedimentos mesozóicos, na Depressão Periférica, porém inexistente no Vale do Rio Grande. No mapeamento realizado pela Petrobrás, no centro-sul de São Paulo, as Formações Pirambóia e Botucatu foram representadas indistintamente, sob a convenção desta última. Sabe-se que ela continua no estado do Paraná, perdendo espessura.

No topo, a formação Pirambóia pode passar à Formação Botucatu, por mudança litológica, mais ou menos gradual, ou manifesta discordância erosiva, quando a formação superior se inicia por arenito conglomerático ou conglomerado basal. Por vezes, observa-se que os depósitos da fácies de planícies aluviais, da formação inferior, passam para os da fácies de canais anastomosado, ou ainda eólica, da formação superior.

Litologicamente, a formação caracteriza-se por uma sucessão de camadas arenosas mais comumente vermelhas, os arenitos são geralmente de granulação média à fina, possuindo fração argilosa maior na parte inferior que na superfície da formação, onde localmente ocorrem arenitos grossos, conglomeráticos. Predomina a estratificação plano-paralela, destacada pela alternância de lâminas mais ou menos ricas em argila e silte, ou ainda mostra estratificação cruzada, de dimensões média a grande, do tipo tangencial. Não são raras as marcas de onda ou corrente.

- Formação Botucatu

Segundo Gonçalves (1986), a Formação Botucatu, em São Paulo, está exposta numa faixa contínua, nas fraldas das serras basálticas e em suas escarpas. Cobre área mais extensa entre os rios Piracicaba e Mogi-Guaçu.

O contato inferior, no Vale do Rio Grande, na região Nordeste do Estado, faz-se localmente com rochas pré-cambrianas, porém, na Depressão Periférica, ela recobre a Formação Pirambóia. Nesse caso, o contato pode ser concordante, com modificação gradual na litologia. Noutros locais, a mudança litológica é brusca, podendo ocorrer localmente, na base da Formação Botucatu, camadas ou lentes de arenito conglomerático com estratificação cruzada. É comum os arenitos eólicos ou hidroclásticos assentarem-se sobre fácies de transbordamento da Formação Pirambóia. Em alguns locais, os pacotes superiores de arenitos de fácies de canal, da Formação Pirambóia, apresentam características de retrabalhamento de areia eólicas, tornando-se difícil, texturalmente, situar o contato. Idêntica dificuldade se apresenta quando arenitos conglomeráticos, atribuíveis a cada uma das formações, se acham sobrepostos.

O contato superior, com a Formação Serra Geral, faz-se por interdigitação, recobrimo-se os arenitos pelos derrames basálticos. Porém, entre estes, continuam a se mostrar intercalações, de arenitos, essencialmente da mesma natureza que os da Formação Botucatu.

É constituída quase que inteiramente de arenitos de granulação fina à média, uniforme, com boa seleção de grãos foscos, com alta esfericidade. São avermelhados e exibem estratificação cruzada tangencial, de médio e grande porte, características das dunas caminantes.

Em suas partes baixas, intercalam-se arenitos de deposição subaquosa. Constituem corpos lenticulares de arenitos heterogêneos, de granulação média à grossa, passando a arenitos conglomeráticos, cujos seixos são na sua maior parte, de quartzito e quartzo.

Várias ocorrências desses sedimentos de fácies torrencial têm sido descritas. Típicos ventifactos podem nelas existir, denotando intensa eolização de seixos fluviais.

- Formação Serra Geral e intrusivas básicas associadas

Segundo Gonçalves (1986), a formação Serra Geral, compreende um conjunto de derrames de basalto toleíticos, entre os quais se intercalam arenitos com as mesmas características dos pertencentes à Formação Botucatu. Estão associados corpos intrusivos de mesma composição, constituindo sobre tudo diques e sills.

Os derrames afloram em São Paulo, na parte superior das escarpas das cuestas basálticas e de morros testemunhos, delas isoladas pela erosão. Podem cobrir grandes extensões, nos planaltos de rebordo dessas cuestas, como no nordeste do estado. Penetram pelos vales que drenam o Planalto Ocidental, expondo-se principalmente nos rios Paranapanema, Tietê, Mogi-Guaçu e Grande. Os corpos intrusivos tabulares concordantes são muito freqüentes na Depressão Periférica, na região nordeste do estado, aonde chega a suportar cuestas locais /diques de diabásio existem por toda parte, penetrando nas rochas sedimentares da bacia ou nas cristalinas pré-cambrianas, alcançando a região litorânea.

Os arenitos da Formação Botucatu interdigitam-se, em grande escala, com os derrames da Formação Serra Geral, tornando uma questão complexa à delimitação de ambas, em âmbito regional.

A Formação Serra Geral é recoberta em discordância angular, geralmente muito disfarçada pelas várias formações que constituem o Grupo Bauru, ou depósito cenozóicos. Localmente, a discordância se observa em afloramento, podendo ser bem acentuada, tendo mesmo levado à total erosão dos basaltos, quando aquele grupo repousa sobre rochas paleozóicas, como é o caso da região próxima a Bauru.

Os derrames são formados por rochas de cor cinza escura negra, afaníticas. Têm espessura individual variável, desde poucos metros a 50 ou mesmo 100 metros. Sua extensão horizontal pode ultrapassar 10 quilômetros.

- Grupo Bauru

Grupo Bauru, de origem fluvio lacustre, está representado na área por arenitos de granulação média a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspato, minerais pesados, minerais instáveis e raramente apresentando estratificação cruzada (SOARES *et. al.*, 1980).

Seu contato basal é feito, em discordância erosiva, com a Formação Serra Geral e, algumas vezes, repousa sobre a Formação Botucatu, também em discordância erosiva. Superiormente, está em contato, em discordância erosiva, com os sedimentos Cenozóicos ou afloram em alguns poucos locais.

A estratigrafia do Bauru, na região, se inicia com um conglomerado basal rico em seixos de basalto, arenito, argilito e quartzo, em matriz variável. Essas fácies não possuem continuidade horizontal e deve estar relacionada somente com vales deposicionais de grande competência e transporte do Cretáceo.

O Grupo Bauru está mais bem representado, na região, através de um arenito médio bem graduado, grãos angulosos, com cerca de 45% de areia, e 35% de argila e de cor vermelha a rosada, com pontos brancos constituídos de feldspatos, parcialmente alterados.

- Sedimentos Cenozóicos

Originados a partir do retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu, através de um pequeno transporte, em meio aquoso, de razoável competência, aparecem capeando os sedimentos Cenozóicos.

Estes sedimentos possuem granulometria predominantemente de areia, sendo encontrados em depósitos do tipo aluvionar e coluvionar. Normalmente são encontrados seixos de quartzo, de quartzito, às vezes imonitizados. Além disso, possuem como características, a ausência de material cimentante.

A Figura 3 mostra parte do perfil que vai de São Carlos a Catanduva. Nela podemos perceber a localização da cidade de São Carlos, sobre o Grupo Bauru. Estão presentes a Formação Pirambóia (arenito) e Formação Botucatu (arenito) que são entremeadas por um corpo intrusivo magmático (provável sills), basalto da Formação Serra Geral e arenito da Formação Botucatu.

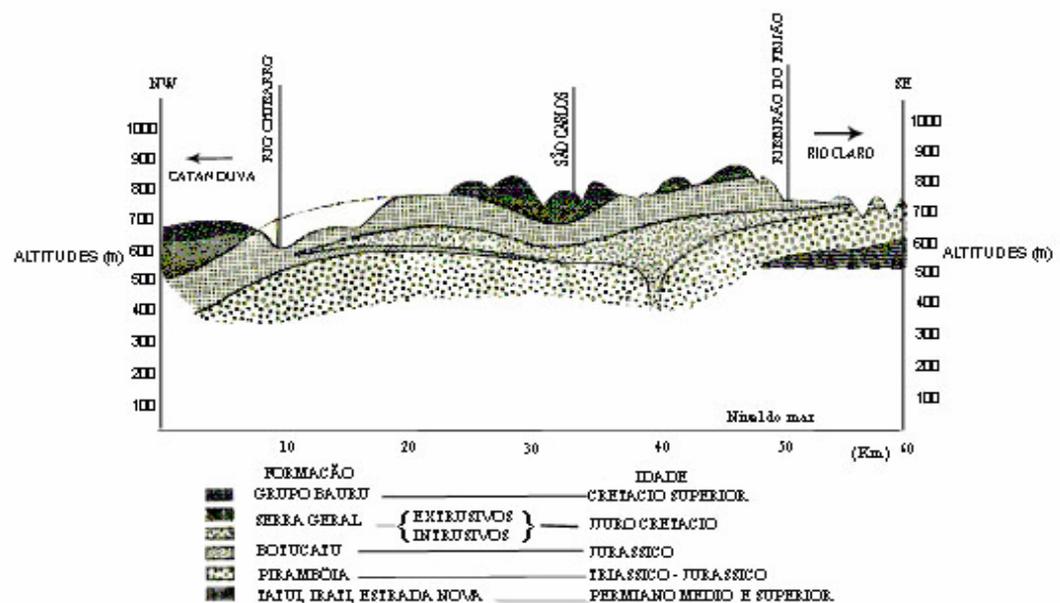


Figura 3: Parte do perfil geológico que vai de São Carlos a Catanduva. Fonte: Modificado DAEE, 1974.

### 4.3.1 Geologia local

Segundo IPT (2004), na área da cidade de São Carlos ocorrem, em superfície, sedimentos clásticos, predominantemente arenosos (Formação Botucatu), e rochas ígneas basálticas (Formação Serra Geral) do Grupo São Bento (Mesozóico da bacia do Paraná), rochas sedimentares do Grupo Bauru (Cretáceo Superior da Bacia de Bauru), sedimentos Cenozóico, Formação Itaqueri e depósitos correlatos (das serras de São Carlos e Santana), depósitos aluvionares associados à rede de drenagem, coluviões e eluviões. Publicações mais recentes, em IPT (2004), apresentam propostas de subdivisões na estratigrafia do Grupo Bauru, no entanto nesta pesquisa foi utilizada como Formação Itaqueri.

As unidades litoestratigráficas segundo BTA Engenharia (1998), são:

- **Formação Itaqueri:** é composta predominantemente por arenitos finos a conglomeráticos, imaturos, com espessura que raramente ultrapassa os 30 metros na região;
- **Formação Serra Geral:** rochas efusivas do tipo basalto, com ocorrência nas cotas intermediárias e nos fundos de vale, apresenta espessuras de até 250 metros, podendo apresentar camadas de arenito interderrame, similar ao da Formação subjacente (Botucatu);
- **Formação Botucatu:** arenitos finos a muito finos, muito bem selecionados, constituídos de grãos arredondados de quartzo fosco, com ocorrência nas porções mais baixas da área e espessura máxima de 200 metros. A Formação Botucatu apresenta uma grande área de afloramento com cerca de 53 Km<sup>2</sup>, dominando o setor sul e uma faixa do extremo noroeste. A sua área de ocorrência é predominantemente plana, porém ocorre também e escarpas abruptas e morros testemunho. Em alguns locais apresenta forte silificação e

recristalização, constituindo quartzitos maciços, explorados nos arredores da cidade de São Carlos, para construção civil e pavimentação de passeios públicos;

- **Formação Pirambóia:** sem afloramento na área, mas com grandes áreas de exposição a alguns quilometro a leste do limite do mapa, porém ocorre em sub-superfície, sendo representada por arenitos finos a grosseiros e até mesmo conglomeráticos, constituídos de grãos sub-arredondados, hialinos e esbranquiçados, com matriz argilosa. Apresenta em alguns locais, com maior incidência junto ao contato basal, a presença de rochas básicas intrusivas, formando Diques e Sills de Diabásio;
- **Formações Paleozóicas e embasamentos:** as perfurações já realizadas na área não atravessaram integralmente a seqüência sedimentar, devendo existir, em sub-superfície, diversas centenas de metros de rochas sedimentares das formações paleozóicas da Bacia do Paraná, antes de se atingir o embasamento cristalino de idade pré – cambriana.

#### 4.4 Hidrogeologia local

O município de São Carlos encontra-se sobre mananciais sub-superficiais rasos e profundos. Os aquíferos da região são três: Botucatu (Botucatu/ Pirambóia), Itaqueri e Serra Geral (Tabela 1).

Os aquíferos na área podem ser definidos como sendo:

**Aquífero Botucatu:** aquífero majoritariamente intergranular, constituídos pelas formações Botucatu e Pirambóia, na área pode se apresentar como livre e confinado.

**Aquífero Serra Geral:** aquífero fissural com forte anisotropia, decorrente na grande variação dos parâmetros hidráulicos da rocha basáltica. Esse aquífero tem sido bastante explorado na área, em geral de forma conjunta com o aquífero subjacente (Guarani), em poços parcialmente

revestidos, de baixa produção, com grande vulnerabilidade as contaminações bacteriológicas, causadas por fossas sépticas e vazamentos da rede coletora de esgotos.

**Aqüífero Itaqueri:** aquífero livre, com área de ocorrência, espessura e capacidade restritas, seu potencial de aproveitamento constitui em poços rasos e de baixa produção. O contato inferior, dos sedimentos com as rochas basálticas, propicia a ocorrência de diversas nascentes, na área urbana de São Carlos, as quais são alimentadas por esse aquífero.

Tabela 1: Poços, Fonte: DAEE (2006) e Muro (2000).

Nº	COORDENADAS		NE (m)	Aqüífero (Livre)
	EW	NS		
1	204700	7557750	42	Botucatu
2	200230	7557530	64	Botucatu
3	209650	7558400	150	Botucatu
4	209440	7552570	2	Botucatu
5	207940	7553860	0	Botucatu
6	197650	7559400	33	Botucatu
7	208090	7552660	2	Botucatu
8	207380	7555290	2	Botucatu
9	199640	7554720	0	Botucatu
10	201200	7553530	128	Botucatu
11	201120	7552540	140	Botucatu
12	208600	7553140	0	Botucatu
13	207600	7555330	10	Botucatu
14	196190	7557360	55	Botucatu
15	207970	7555260	8	Botucatu
16	209490	7557350	146	Botucatu
17	207420	7555290	4	Botucatu
18	197400	7557680	16	Botucatu
19	202790	7557340	23	Botucatu
20	200850	7565650	7	Serra Geral
21	200030	7565290	12	Serra Geral
22	199850	7565130	8	Serra Geral
23	197870	7566680	10	Serra Geral
24	199050	7562210	82	Serra Geral
25	200350	7566430	0	Itaqueri
26	197390	7566310	6	Itaqueri
27	208770	7565040	22	Itaqueri

28	199960	7561590	20	Itaqueri
29	204830	7562550	36	Itaqueri
30	206450	7559950	35	Itaqueri
31	206150	7560000	18	Itaqueri
32	207150	7560000	28	Itaqueri
33	208700	7553150	0	Botucatu
34	208000	7553800	10	Botucatu
35	207760	7554190	5	Botucatu
36	207850	7554210	6	Botucatu
37	202750	7555600	38	Botucatu
38	202860	7556210	43	Botucatu
39	202780	7556580	40	Botucatu
40	202980	7556650	23	Botucatu
41	206170	7556720	8	Botucatu
42	206200	7556740	10	Botucatu
43	206400	7556830	28	Botucatu
44	197680	7557680	16	Botucatu
45	202300	7559080	80	Botucatu
46	203620	7559550	85	Botucatu
47	203420	7560220	90	Botucatu
48	203540	7560390	88	Botucatu
49	202090	7560480	80	Itaqueri
50	201770	7560570	70	Itaqueri
51	204920	7562500	23	Itaqueri
52	197000	7567000	12	Itaqueri
53	201660	7567370	3	Itaqueri
54	201660	7567380	10	Itaqueri
55	201650	7567430	6	Itaqueri
56	205300	7567800	31	Itaqueri
57	205750	7568350	11	Itaqueri
58	195500	7557450	15	Botucatu
59	200180	7560830	100	Itaqueri
60	201750	7561320	16	Serra Geral
61	200150	7562400	69	Serra Geral
62	202810	7565130	26	Itaqueri
63	199300	7565350	11	Itaqueri
64	202280	7565970	2	Itaqueri
65	204500	7557990	9	Botucatu
66	202480	7563220	13	Itaqueri
67	201300	7563250	12	Itaqueri
68	198640	7564180	65	Itaqueri
69	196440	7566430	3	Itaqueri
70	196370	7566110	3	Itaqueri
71	196250	7566080	2	Itaqueri
72	196140	7566130	2	Itaqueri

73	196140	7565990	2	Itaqueri
74	209590	7567430	14	Itaqueri
75	203270	7564590	0	Itaqueri
76	203330	7564560	0	Itaqueri
77	203340	7564590	2	Itaqueri
78	203340	7564950	0	Itaqueri
79	203350	7565020	2	Itaqueri
80	207000	7564550	0	Itaqueri
81	208090	7560560	4	Itaqueri
82	207110	7559160	0	Itaqueri
83	207040	7564210	0	Itaqueri

#### 4.5 Clima

Segundo Tolentino (1967) apud Gonçalves (1986), usando a sistemática de Koeppen, o clima do planalto de São Carlos pode ser classificado como de transição entre Cwa.i e Aw.i. entre um clima quente de inverno seco, que localmente vai de abril a setembro, e um tropical com verão úmido e inverno seco.

A precipitação média anual é de 1.440 mm, predominando nos meses mais quentes. A temperatura média compensada anual é de 26,82 °C e a média das mínimas, 15,63 °C. A umidade relativa média anual do ar é de 75,6%.

#### 4.6 Vegetação

O estado de São Paulo conforme citou Coimbra – Filho (1996) possui menos que 4% da sua vegetação original, a qual é composta predominantemente por cerrado e porções descontínuas de Mata Mesófila. O Cerrado existente na região é uma vegetação composta predominantemente por indivíduos perenifólios, nitidamente distribuídos nos estratos rasteiro, arbustivo e arbóreo, esse último podendo atingir 3 a 5 metros de altura (RIZZINI, 1977).

Conforme Soares *et. al* (2003), os poucos fragmentos da vegetação original estão extremamente esgotados devido ao corte seletivo das espécies, mas também pelos fogos acidentais constantes que ocorrem durante a preparação da cana-de-açúcar antes do corte ou na renovação do pasto, ou mesmo por aqueles causados criminalmente para diminuir o valor ambiental das áreas nativas.

## 5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 VULNERABILIDADE NATURAL À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Em amplitude mundial os países europeus vêm produzindo mapas de vulnerabilidade natural desde a década de 70 e 80. Já no Brasil esses mapas começaram a serem produzidos na década de 90, quando se havia uma maior preocupação com questões relacionadas ao meio ambiente (ANDERSEN e GOSK, 1989).

No âmbito do estudo de hidrogeologia o termo vulnerabilidade começou a ser usado nos anos 70 na França (ALBINET e MARGAT, 1970) e mais amplamente nos anos 80 (HAERTTE, 1983; ALLER *et. al*, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988; FOSTER *et. al*, 2002).

Na vulnerabilidade natural a poluição de águas subterrâneas segundo Foster e Hirata (1988); Foster *et. al* (2002), deve-se observar as características intrínsecas dos materiais naturais. Assim, ao invés de se utilizar o uso e ocupação do solo e descarte de efluentes para controlar a potencialidade à poluição, sugere-se avaliar o risco de poluição para cada tipo de fonte potencial (fossas negras, disposição de resíduos sólidos e líquidos, entre outras) (MEAULO, 2004). Devido às diversas e complexas condições hidrogeológicas e as várias atividades potencialmente poluidoras, o método de vulnerabilidade natural à poluição não incluem todas as variáveis, tornando-se então um instrumento preventivo para auxiliar no planejamento e uso e ocupação do solo (MEAULO, 2004).

#### 5.1.1 Apresentação das metodologias de avaliação da vulnerabilidade

Segundo Vrba e Zaporozec (1994), existem na literatura outros métodos e esquemas de avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos. Eles podem ser divididos em três:

- Ambientes hidrogeológicos: baseado na avaliação na vulnerabilidade de grandes ambientes hidrogeológicos, em termos qualitativos, através da superposição de mapas temáticos (ALBINET e MARGAT, 1970).
- Modelos analógicos: utiliza parâmetros chave, aplicando expressões matemáticas que resultam nos índices de vulnerabilidade (MONKHOUSE, 1983).
- Sistema paramétrico: utiliza parâmetros indicativos de vulnerabilidade natural, atribuindo valores numéricos e integrando-os para gerar o índice de vulnerabilidade. Utilizam esse sistema os métodos: de Haertle (1983); DRASTIC de Aller *et. al.*, (1987); GOD de Foster e Hirata (1988) e atualmente Foster *et. al.*, (2002).

### 5.1.2 Método de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos

Nesta pesquisa, optou-se pela aplicação do método **GOD** (FOSTER *et. al.*, 2002), em função dos seguintes fatores:

- Número reduzido de classes de análise, o que proporciona simplicidade na utilização do documento final;
- Baixo custo operacional para realizar os estudos;
- Exemplos de aplicação do método GOD (ROCHA *et. al.*, 2003; MEAULO, 2004; CORIDOLA *et. al.*, 2005).

O método de vulnerabilidade natural de águas subterrâneas à poluição utilizado nesta pesquisa é o proposto por Foster *et. al.* (2002), que se fundamenta em três aspectos: grau de confinamento da água subterrânea, estratos geológicos e profundidades do nível d'água subterrânea.

O Método de vulnerabilidade natural de águas subterrâneas à poluição possui a denominação da língua inglesa de **GOD** (groundwater hydraulic confinement = **G**; Overlaying strata = **O**; Depth groundwater table = **D**). Na língua portuguesa pode se entender por: **G** = grau de confinamento hidráulico da água subterrânea; **O** = ocorrência de estratos geológicos; **D** = profundidade do nível d'água subterrâneo.

A estimativa do índice de vulnerabilidade GOD envolve as seguintes etapas:

- **1º FASE** grau de confinamento hidráulico da água subterrânea, nesta fase deve-se determinar se existe aquífero ou não, caso exista deve-se classificá-lo em confinado artesanal, confinado, semi confinado, não confinado (coberto) e não confinado, sendo que cada tipo de aquífero é representado por um valor que varia de zero a 1,0 (Figura 4).
- **2º FASE** ocorrência dos estratos geológicos da zona não saturada, nesta fase deve-se determinar os tipos de materiais geológicos presente na área de estudo, sendo que para cada material geológico a um valor associado, que varia de zero a 1,0 (Figura 4).
- **3º FASE** profundidade do nível d'água subterrânea, nesta fase deve-se determinar a profundidade em que se encontra a água subterrânea, sendo que para cada intervalo de profundidade há um valor associado, que varia de zero a 1,0 (Figura 4).

Uma vez determinado os valores para cada uma das três fases de uma área amostrada, deve-se multiplicá-los para finalmente obter um outro valor, o índice GOD, que varia em intervalos de 0-0,1(desprezível), 0,1-0,3 (baixa), 0,3-0,5 (moderada), 0,5-0,7 (alta) e 0,7-1 (extrema), obtendo assim o grau de vulnerabilidade natural à poluição de aquífero da área amostrada.

A Figura 4 ilustra a espacialização dos atributos mencionados que compõe o método GOD.

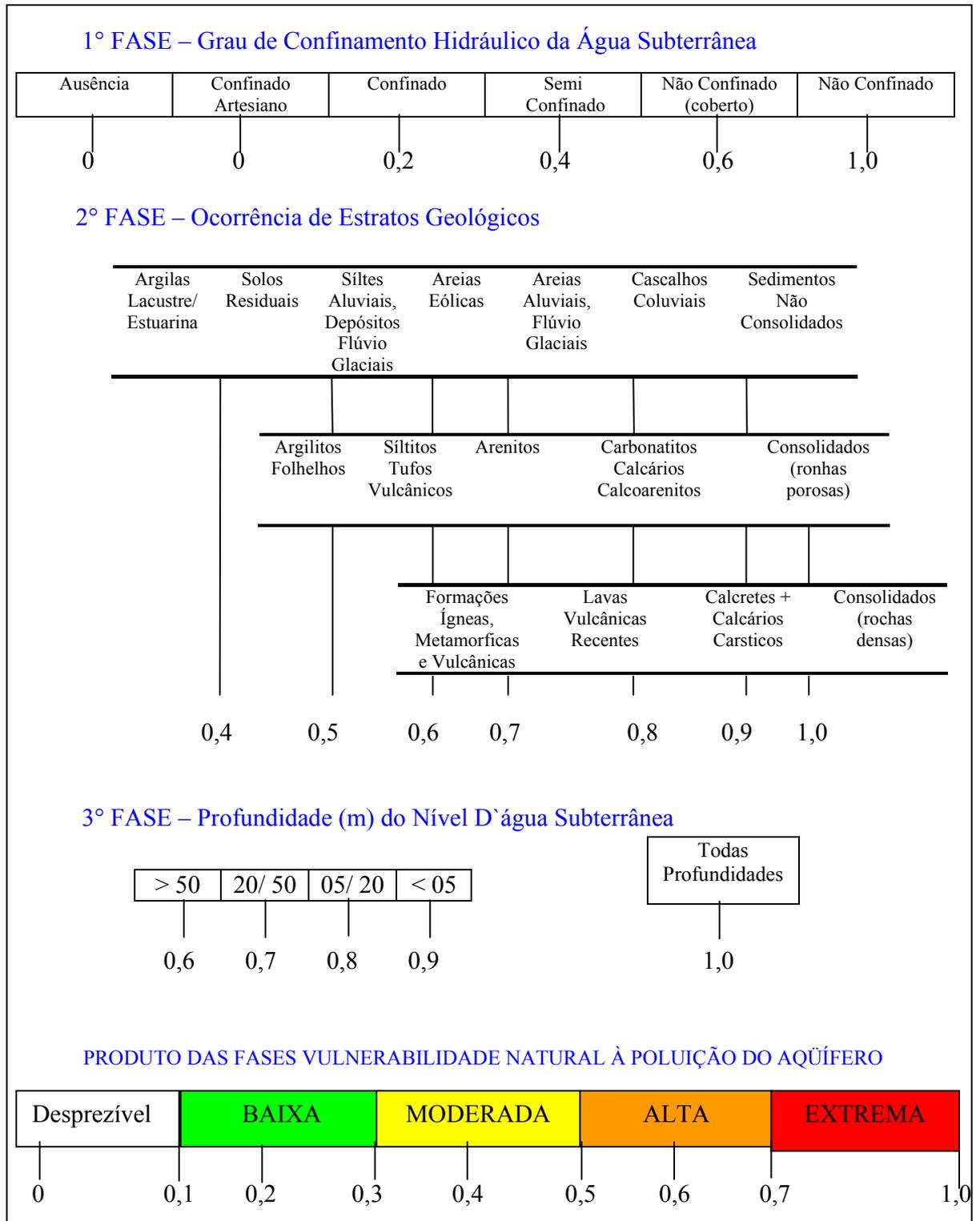


Figura 4: Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero. Fonte: modificado de Foster *et. al*, 2002.

Quando se trabalha com mapas ou cartas deve-se sempre estar atento a escala de interesse. Pois, escalas pequenas 1: 1.000.000 possui menor detalhe e maior recobrimento de uma área, já escalas grandes 1: 20.000 possui maior detalhe e menor recobrimento de uma área.

Portanto, neste presente trabalho adotou-se a escala 1: 20.000, o que leva a contribuir para o planejamento municipal.

A Tabela 2 descreve os componentes da vulnerabilidade, e informações hidrogeológicas ideais requeridas, normalmente disponíveis na presente pesquisa.

Tabela 2: Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade à poluição do aquífero. Fonte: modificado de Foster *et. al*, 2002.

Componentes da vulnerabilidade	Dados hidrogeológicos		
	Informações ideais requeridas	Informações normalmente disponíveis	Informações disponíveis na presente pesquisa
Inacessibilidade hidráulica da zona não saturada, para a penetração de poluentes	Grau de confinamento do aquífero	Tipo de confinamento da água	Tipo de confinamento dos aquíferos
	Profundidade do N.A. ou superfície freática	Profundidade do N. A. ou topo do aquífero confinado	Profundidade do NE, livre
	Umidade da zona não saturada e condutividade hidráulica vertical do estrato na zona não saturada ou camadas confinadas		
Capacidade de atenuação da zona não saturada, resultando na retenção e/ ou reação físico-química dos poluentes	Granulometria e distribuição das fissuras no estrato da zona não saturada ou camadas confinadas	Grau de consolidação/ fissuras no estrato	Mapeamento do substrato geológico
	Mineralogia do estrato da zona não saturada ou camada confinantes	Características litológicas deste estrato	

## **5.2 GEOPROCESSAMENTO**

Geoprocessamento é um conjunto de conhecimentos associados de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica.

Geoprocessamento segundo Rodrigues (1988) é definido como “a tecnologia de coleta e tratamento de informações espacial e de desenvolvimento de sistemas que o utilizam”.

O objetivo do geoprocessamento segundo Câmara e Medeiros (1996), é o de fornecer ferramentas computacionais para o tratamento de informação geográfica, permitindo a manipulação de dados como mapas, imagens e cadastros, numa única base de dados cartográficos.

## **5.3 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Sistemas de informações geográficas (SIG's) são conjuntos de aplicativos computacionais desenvolvidos para tratar informações relacionadas a superfície da Terra, sendo este apenas um dos instrumentos entre as diversas tecnologias de geoprocessamento.

Segundo Aronoff (1989), um SIG pode ser definido como “um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georeferenciados”.

Dangermond (1992) conceitua esses sistemas como um conjunto de hardware, software e dados geográficos projetados eficientemente para adquirir, armazenar, atualizar, manipular, analisar e visualizar todas as formas de informações geograficamente referenciadas.

O Sistema de Informações Geográficas possui funções de integrar, numa única base, informações espaciais de dados cartográficos, censitários e de cadastramento, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; cruzar informações através de algoritmos de manipulação

para gerar mapeamentos derivados e consultar, recuperar, visualizar e permitir saídas gráficas para o conteúdo da base de dados geocodificados, (CÂMARA 1994).

A utilização dos SIG's é bastante ampla e diversificada, com exemplos nas áreas de cartografia, geologia, geotecnia, geomorfologia, pedologia, planejamento de recursos agropecuários e florestais, ecologia e recursos naturais, planejamento urbano e planejamento de transportes (ROSALEN, 2002).

Segundo Câmara (1995), um SIG possui os seguintes componentes: interface com o usuário, entrada e integração dos dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de banco de dados geográficos) Figura 5.

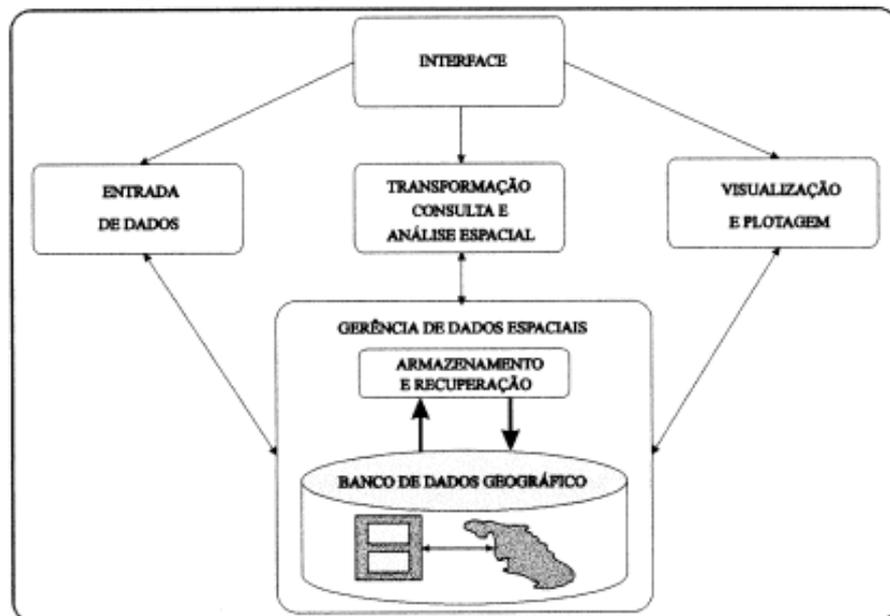


Figura 5: Componentes do SIG. Fonte: Câmara, 1995.

Dadas essas características, os SIG's se constituem em uma ferramenta de grande auxílio ao mapeamento, monitoramento e manipulação de dados em recursos naturais.

Para entrada das entidades do mundo real para o ambiente computacional deve-se pensar no paradigma dos quatro universos (GOMES e VELHO, 1995). Assim temos o **universo do mundo real**, onde são escolhidas as entidades da realidade a serem modeladas no sistema (água subterrânea, vegetação, clima, solos, entre outros), o **universo conceitual**, que inclui uma definição matemática (formal) das entidades a serem representadas, **universo de representação**, onde as diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas e alfanuméricas no computador, e **universo de implementação**, onde as estruturas de dados e algoritmos são escolhidos baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados (nível da codificação) (INPE, 2006). Assim segundo esta visão no Spring, deve-se escolher o tipo de dado utilizado para representar os fenômenos do mundo real, que podem ser: **Temático, Numérico, Cadastral, Imagem e Rede**, no universo conceitual o tipo de modelo deve ser escolhido: **Geo-campos** ou **Geo-objetos**, no universo de representação deve-se escolher as representações geométricas: **Matricial** ou **Vetorial**, e por último o universo de implementação onde serão indicadas quais as estruturas de dados a serem utilizadas para construir um sistema de geoprocessamento (INPE, 2006).

#### **5.4 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS E VULNERABILIDADE NATURAL À POLUIÇÃO DE AQUÍFEROS**

O geoprocessamento não deve ser entendido apenas como uma técnica de produção de mapas temáticos – áreas de “buffers”, medidas de distâncias e outros artifícios específicos de análise ambiental.

A análise ambiental é uma ação complexa e envolvem diversas especialidades relativas aos problemas urbanos, rurais, florestais, marítimos, poluição a aquíferos, entre outros.

Em todas estas áreas os SIG's podem ser empregados, facilitando o trabalho da comunidade científica e dos órgãos e entidades ambientais, trazendo benefícios à população (TEXEIRA *et. al*, 1992).

Rocha (1991) apud Rodrigues (1997) ressalta que o reconhecimento das formas de utilização da terra é fundamental para o planejamento, podendo direcionar a uma política de ocupação do espaço com a intenção de manter e melhorar as condições de vida atual e futura. Os dados sobre o uso da terra são imprescindíveis na análise de processos e problemas ambientais.

O conhecimento das unidades aquíferas, associado às formas de uso e ocupação do meio, e a importância que as águas subterrâneas representam para o desenvolvimento, fazem com que exista uma maior preocupação com a segurança dos mananciais subterrâneos. Com esta preocupação, temos o estudo da vulnerabilidade das águas subterrâneas, que determina a maior ou menor facilidade de um aquífero vir a ser afetado por uma carga contaminante, tendo a vulnerabilidade como sendo a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero. Isso a distingue de risco de poluição que é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, mas também pela existência de atividades poluentes. Assim sendo algumas áreas apresentam-se mais vulneráveis a contaminações que outras.

Daly *et. al* (2002), propõe a necessidade de estabelecer critérios de consenso para o estabelecimento da quantificação de categorias variáveis, para sua ponderação e para obtenção de 5 classes finais de vulnerabilidade que são válidas para distintas condições ambientais.

O mapeamento de vulnerabilidade contém informações objetivas e claras em relação aos recursos vulneráveis além de utilizar meios de representação e organização em que usuários de diferentes áreas possam imediatamente reconhecer e entender as informações cartográficas representadas.

Leite *et. al* (1998), objetivando estimar a vulnerabilidade natural dos aquíferos porosos da região norte da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú, no litoral oeste do Estado do Ceará, foi empregada a metodologia baseada no índice DRASTIC (**D**ePTH to groundwater, **R**echarge, **A**quifer media, **S**oil media, **T**opography, **I**mpact of the vadose zone, **C**onduTivity hydraulic) com algumas modificações em função dos conhecimentos de campo. Para tal, foram considerados os seguintes parâmetros: profundidade do nível d'água (lençol freático), o meio aquífero, a altimetria, o impacto na zona vadosa e a cobertura vegetal. Para cada uma das variáveis foram aplicadas cargas e pesos distintos e gerados planos de informações (PI's) que posteriormente foram integrados com uso do IDRISI para obtenção do mapa final de vulnerabilidade. O software SURFER também foi utilizado para processamentos de interpolação de dados pontuais através de krigagem.

Rocha *et. al* (2003), com o objetivo de produzir um mapa de vulnerabilidade do aquífero dentro do distrito municipal de Campos dos Goytacazes, localizado na costa norte fluminense. Foi utilizado a metodologia GOD (Groundwater hydraulic confinement), que pretende demonstrar regiões de maior ou menor contaminação do aquífero. Estas informações são aplicadas pelo uso de sistemas de informação geográfica (SIG), resultando no mapa de vulnerabilidade do aquífero.

Meaulo (2004), com o objetivo de propor um mapa de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara – SP foi utilizado o método GOD (Groundwater hydraulic confinement), proposto por Foster *et. al* (2002), que consiste na hierarquização de índices relativos à maior ou menor sensibilidade a poluir a zona não saturada (zona vadosa ou de aeração) do perfil pedológico. O que contribui de forma significativa para o planejamento urbano, auxiliando e disciplinando as diversas formas de intervenção antrópica no

meio físico (instalação de indústrias de porte, aterros sanitários, sistemas de saneamento, entre outros).

Coridola, *et. al* (2005) com o objetivo de elaborar o mapa preliminar da vulnerabilidade dos aquíferos do município de Campos de Goytacazes, RJ. Utilizaram a metodologia GOD, analisando características dos solos, dos aquíferos, e do uso de técnicas de geoprocessamento. Foram criados três planos de informação: o Mapa de Ocorrência da água subterrânea, o Mapa de litologia da zona não saturada e o Mapa de profundidade do lençol freático, que foram cruzados gerando o mapa preliminar de Vulnerabilidade do município de Campos de Goytacazes, RJ. Este trabalho faz parte de um projeto de gerenciamento dos recursos hídricos do município de Campos dos Goytacazes, no qual Rocha *et al* (2003) apresentou o estudo da vulnerabilidade em parte da baixada Campista, citado anteriormente.

## **5.5 GEOESTATÍSTICA**

Atualmente, para o conjunto de técnicas utilizadas para analisar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço ou tempo, é dado o nome de Geoestatística (CÂMARA *et. al*, 2000). A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que tem comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas (LANDIM, 1998).

Segundo Yamamoto (1998), “os dados dispostos espacialmente podem ser submetidos a processos determinísticos de interpolação (triangulação linear, curvatura mínima, inverso ponderado da distância, etc.) ou probabilísticos (estimadores krigagem)”.

Para esta pesquisa optou-se pelo método inferencial Krigagem, pois somente ele estima uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado, além de também fornece estimadores com propriedades de não tendenciosas e eficiência (CAMARGO, 1997). Mais especificamente krigagem ordinária, pois esta não requer o conhecimento da média estacionária das amostras, mas a soma dos pesos tem que ser igual a 1, é um estimador exato, os valores preditos irão coincidir com os valores dos pontos amostrais.

Landim (1998) descreve a Krigagem como “uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço”.

A krigagem considera os atributos ambientais como variáveis aleatórias, o que possibilita a modelagem das incertezas associadas às inferências. Essas técnicas têm sido utilizadas, com frequência, para espacialização de atributos ambientais amostrados pontualmente (OLIVER, 1990 apud CAMARGO, 1997).

A krigagem é um método de malhas muito flexível o que melhora a qualidade dos dados. Uma vez que aceita o ajuste do semivariograma teórico ao semivariograma experimental, se mudando o modelo, efeito pepita, soleira e alcance para o arranjo de dados com variações específicas.

No caso desta pesquisa foram utilizados os softwares VARIOWIN® 2.21 (Institute of Mineralogy), GEO-EAS1.2.1. (EPA - U.S. Environmental Protection Agency) e Spring 4.2

(Inpe), para análise geostatística dos dados amostrados do nível estático (NE) dos aquíferos livre, obtendo o mapa de isovalores do NE.

## **5.6 SÍNTESE DA SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: PANORAMA GLOBAL E A ÁREA DE ESTUDO**

Muitos pesquisadores biólogos, geólogos, engenheiros, entre outros, de todo o mundo vem enfatizando a necessidade e importância da gestão dos recursos hídricos. Entretanto, poucos são os esforços realizados pelas autoridades competentes em reverter esta situação caótica mundial.

A população mundial está aumentando mais que 86 milhões de pessoas a cada ano. Esse rápido crescimento traz enormes pressões aos recursos naturais, infra-estrutura urbana e serviços e ao governo, especialmente nos países mais pobres, onde o crescimento é mais rápido (WORLD RESOURCES, 1996-97).

As mudanças e tendência recentes da rede de cidades no Brasil, conforme GEOBRASIL (2002), apontam para um conjunto de problemas ambientais urbanos comuns, que pressionam a base de recursos naturais.

### **5.6.1 Disponibilidade hídrica**

No Planeta Terra 99,4 % da água encontram-se indisponíveis para consumo humano existindo apenas 0,6 % de água doce líquida, das quais 97,5% são as águas subterrâneas. A Figura 6 apresenta a distribuição das águas no planeta, mostrando a pequena porcentagem de água disponível para abastecimento e a importância das águas subterrâneas.

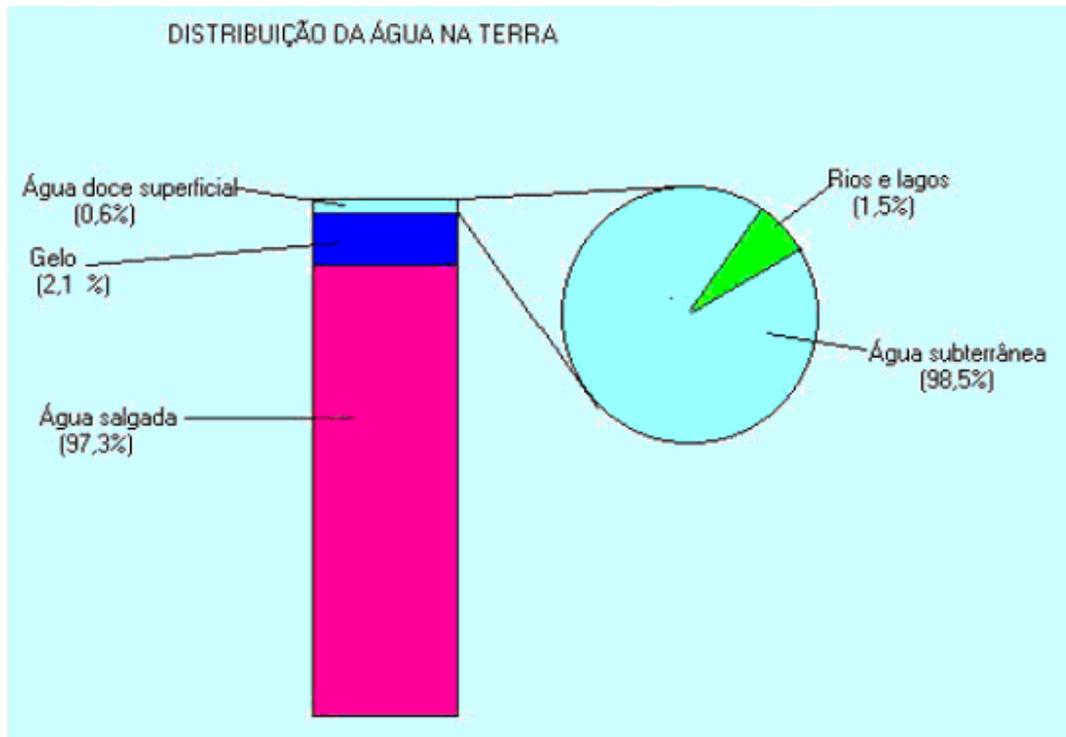


Figura 6: Distribuição das águas no planeta.

Fonte : [www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm](http://www.meioambiente.pro.br/agua/guia/ociclo.htm), 2004.

O Brasil é um país privilegiado porque possui 12% das reservas mundiais de água doce apresentando disponibilidade hídrica de 40.732 m<sup>3</sup>/hab/ano (ANA, 2002). Aproximadamente 80% das águas brasileiras estão na Bacia Amazônica, e 1,6% no Estado de São Paulo (SABESP, 2004).

Mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provem das reservas subterrâneas (ANA, 2002). De acordo com o levantamento realizado pela CETESB, 72% dos municípios do Estado de São Paulo (462), eram total ou parcialmente abastecidos por água subterrânea.

Atualmente, considerando-se o aumento do número de poços outorgados pelo DAEE, estima-se que essa porcentagem de uso seja muito maior (CETESB, 2004).

Segundo IPT, entre os 34 municípios inseridos na Bacia Hidrográfica Tiête – Jacaré, 18 utilizam água de superfície, mas apenas três deles são abastecidos exclusivamente com água superficial, ao passo que 16 utilizam apenas água subterrânea e, no total, a água subterrânea representa 60,2 % da água utilizada para abastecimento público.

Segundo Perroni (2005), o sistema de abastecimento público de água de São Carlos utiliza atualmente 2.248 mil m<sup>3</sup> mês de água, dos quais 46% (1.036 mil m<sup>3</sup> mês), provem de 21 poços tubulares. A estimativa de disponibilidade anual de água de recarga por infiltração profunda de água meteórica nos sistemas aquíferos da área de São Carlos equivale a 1.836 m<sup>3</sup> hora, insuficiente para atender a demanda atual estimada de 3.273 m<sup>3</sup> hora, entre poços de abastecimento público e particulares. Como consequência os aquíferos já apresentam rebaixamento do nível d'água, estimado em 32 metros para o período de exploração de 35 anos.

### **5.6.2 Síntese da legislação e programas estaduais de recursos hídricos**

O estado de São Paulo possui uma legislação específica que trata da gestão e diretrizes dos recursos hídricos:

- Lei 7.663 de 30/12/91 estabelece diretrizes e instituem a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (superficial e subterrânea), que dividiu o estado em 22 unidades de gerenciamento;
- Lei 9.034 de 27/12/94 estabelece as 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI's) e os Programas de Duração Continuada (PDC). Destaca-se o PDC-4, que trata do desenvolvimento e proteção das águas subterrâneas.

Na UGRHI 13 (Tiête-Jacarê) o PDC-4 estabelece o desenvolvimento das seguintes atividades de gerenciamento:

- Desenvolvimento do sistema de cadastramento de poços tubulares, considerando os diversos usos;
- Identificação de áreas críticas de superexploração ou poluição dos aquíferos e desenvolvimento de um sistema específico gestão;
- Implantação de sistema de monitoramento da qualidade da água subterrânea;
- Implantação de sistema de automonitoramento por parte dos usuários mais significativos das águas subterrâneas;
- Implantação do programa de proteção do aquífero subterrâneo considerando o mapa de vulnerabilidade.

Na esfera municipal, também existe uma legislação específica que trata dos recursos hídricos:

- Lei nº 11.682 de 1998 que dispõe sobre perfuração de poços para captação de águas subterrâneas no Município de São Carlos;
- Lei nº 10.731 de 1993 que dispõe sobre convênios prefeitura municipal e estado de São Paulo, através da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras, com interferência da SABESP, objetivando a execução pelo Município, de obras e serviços, destinados à melhoria dos sistemas de água e esgoto;
- Lei nº 12.203 de 1999 Autoriza o Executivo Municipal a celebrar convênio com o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, órgão vinculado a Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo.
- Lei nº 12.881 de 2001 Autoriza o Poder Executivo a celebrar convênio com o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, Órgão vinculado à Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do Estado de São Paulo.

### **5.6.3 Características da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tiête – Jacaré (UHGRHI-13)**

O "Primeiro Plano Estadual de Recursos Hídricos - 1990" propôs a divisão do Estado em 21 unidades de gerenciamento. Posteriormente, essa proposta de divisão hidrográfica foi reavaliada e sugeridas algumas alterações, culminando com a indicação de 22 unidades de gerenciamento, que constaram dos subseqüentes Planos Estaduais de Recursos Hídricos de 1994/95 e 1966/99, e que constitui a atual divisão hidrográfica do Estado.

A Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tiête-Jacaré (UGRHI – 13), onde está inserida a área de estudo, é constituída pelos municípios de São Carlos, Ibaté, Américo, Brasiliense, Araraquara; Sendo que outra parte do município de São Carlos (norte) se encontra na UGRHI - 09 Moji-Guaçu.

Segundo o diagnostico do relatório da situação dos recursos hídricos do estado de São Paulo (2000):

- Crítica em termos de disponibilidade hídrica superficial, a UGRHI apresenta demandas elevadas, devido à irrigação e ao setor sucro-alcooleiro, notadamente nas bacias do médio Jacaré-Guaçu e Ribeirão dos Lençóis;
- A bacia possui 19 dos 34 municípios com índice de perdas no sistema de abastecimento acima de 30%;
- Há riscos de rebaixamento acentuado da superfície do lençol subterrâneo nas áreas urbanas de Bauru e Araraquara. Área crítica com relação ao risco de poluição das águas subterrâneas, na região de Bauru, Araraquara, Brotas e arredores;
- Na UGRHI encontra-se trecho de 140 Km da Hidrovia Tietê-Paraná, entre as barragens de Barra Bonita e Ibitinga;

- Em 1998, 22% dos resíduos sólidos domiciliares gerados apresentavam condições inadequadas, 12% condições controladas e 66% condições adequadas;
- A bacia apresenta baixo índice de tratamento de esgoto doméstico, 8%, com lançamentos "in natura" nos corpos d'água. Verifica-se alto potencial de carga orgânica industrial, devido essencialmente ao setor sucro-alcooleiro;
- A UGRHI é objeto de estudos visando a orientar medidas corretivas e preventivas de controle de erosão e assoreamento;
- Apresenta média a alta suscetibilidade a inundações nas sub-bacias dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, com agravamento junto a áreas urbanizadas.

#### **5.6.4 O ciclo hidrológico e a disponibilidade do Recurso Hídrico Subterrâneo.**

Segundo Tundisi (2003), “o crescimento da população no Brasil promoveu aumento considerável nas demandas hídricas, associado a expansão urbana, à degradação dos mananciais e à contaminação e poluição”.

Alterações no ciclo hidrológico, produzidas pela inadequada ocupação do espaço, geram enchentes urbanas freqüentes, problemas na coleta e disposição do lixo urbano, que resultam em contaminação dos aquíferos e águas superficiais, e perdas na distribuição (TUCCI e MARQUES, 2000).

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, superficialmente ou subterraneamente ao Oceano (CPRM, 2000).

A Figura 7 apresenta um esquema do ciclo hidrológico.

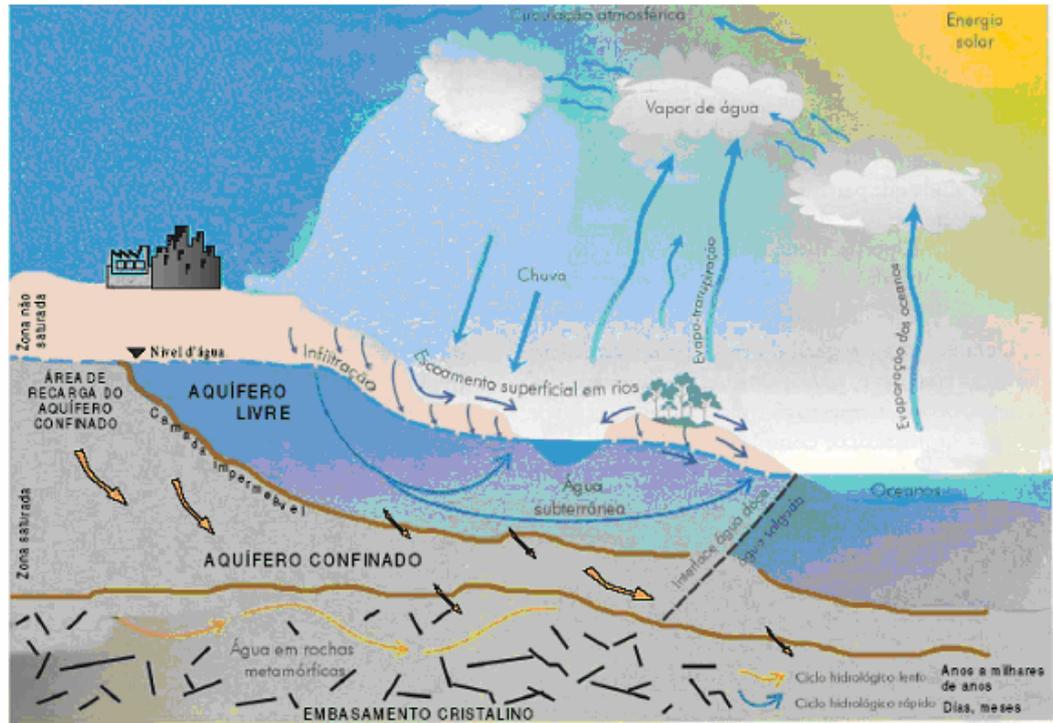


Figura 7: Ciclo hidrológico. Fonte: Adaptado de Teixeira *et. al*, 2000.

## 6. MATERIAIS

Os mapas, softwares e equipamentos utilizados para realização desta pesquisa estão listados abaixo:

- Documentos Cartográficos:
  - Mapa Documentação (PONS, 2006);
  - Mapa dos substratos geológicos (BORTOLUCCI, 1983; AGUIAR, 1989; MURO, 2000; PONS, 2006).
- Principais Softwares:
  - Spring 4.2 - Inpe (banco de dados associado a planos de informação);
  - VARIOWIN 2.2.1 (análise semivariográfica);
  - GEO-EAS 1.2.1 (interpolador Krigagem ordinária);
- Equipamentos utilizados:
  - Computador AMD Athlon (TM) XP 1800, 1.53 GHz e 512 MB de RAM.

## 7. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida com o objetivo de se produzir o mapa de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais da área urbana e periurbana do município de São Carlos – SP. Para isso, foi elaborado um fluxograma do plano de trabalho (Figura 8), adotado nesta pesquisa.

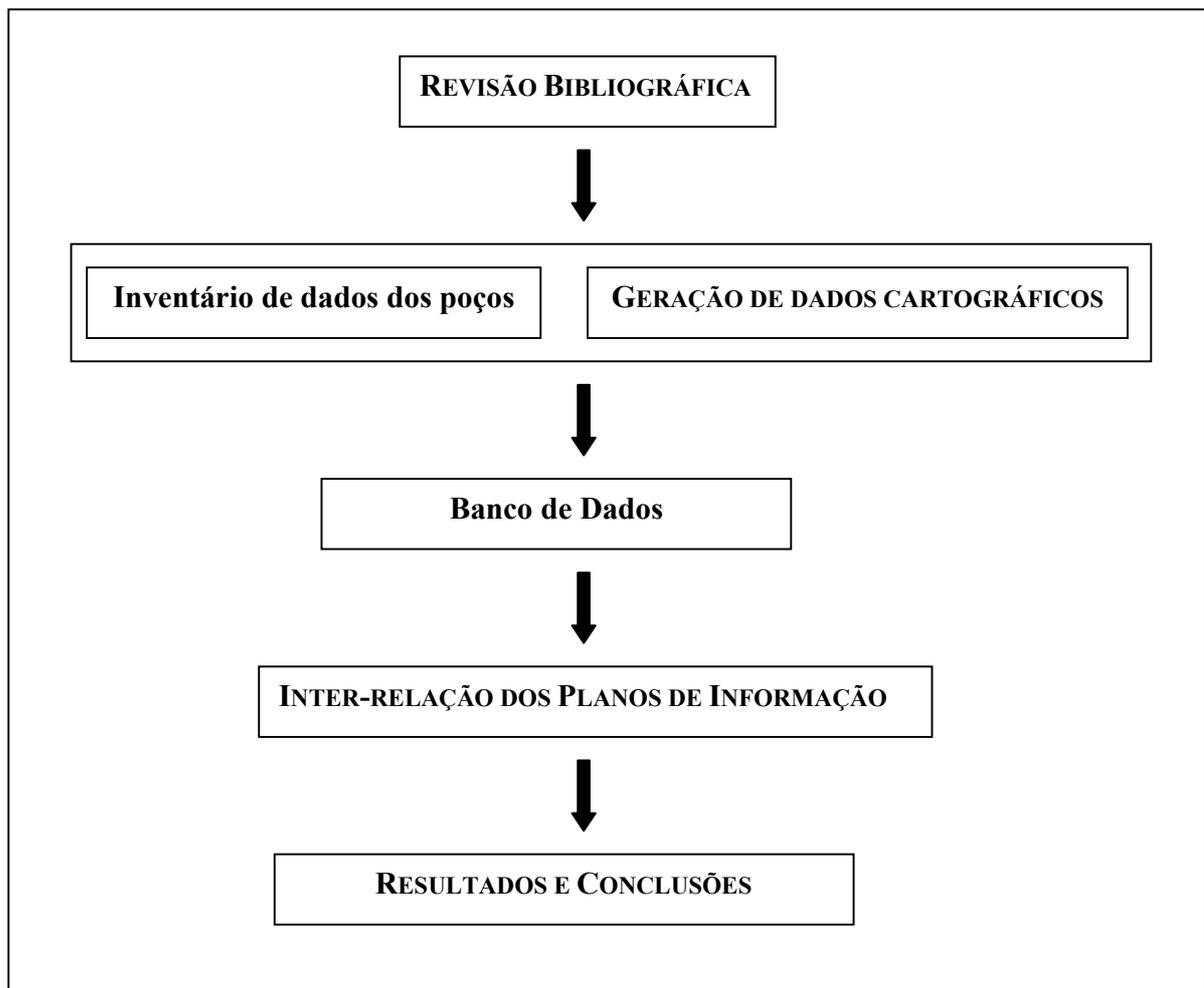


Figura 8: Fluxograma do plano de trabalho desta pesquisa.

A revisão bibliográfica se constituiu na primeira etapa de trabalho, na qual buscou consultar publicações, dados pré-existentes relevantes ao método e a área pesquisada, o que inclui informações geológicas, hidrogeológicas, geoprocessamento, além do panorama estadual sobre o tema, disponibilidade hídrica, legislação recursos hídricos e características da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tiête/Jacaré (UHGRHI-13).

A segunda etapa contou com a coleta de dados para a obtenção do índice GOD, relativos ao grau de confinamento hidráulico da água subterrânea (primeira fase), ocorrência de estratos geológicos (segunda fase) e profundidade do nível d'água subterrâneo (terceira fase).

Os dados da 1° FASE, grau de confinamento hidráulico da água subterrânea, foi obtido pelo perfil geológico (estratigráfico) dos poços escavados no cadastro do DAEE – Araraquara e Muro (2000), os da 2° FASE, ocorrência dos estratos geológicos, foi obtido pelo mapa temático do substrato rochoso baseado em (BORTOLUCCI, 1983; AGUIAR, 1989; MURO, 2000; PONS, 2006) e da 3° FASE, profundidade do nível d'água subterrâneo, foi obtido por dados de profundidade do nível d'água subterrâneo N.E (nível estático) dos cadastros do DAEE – Araraquara e Muro (2000).

Os dados dos poços foram organizados em uma tabela, com informações relativas as coordenadas NS e EW (UTM), nível estático (N.E) e água sub-superficial. As coordenadas X, Y e o NE foram salvos em arquivos com extensão .dat (Surfer), para posterior análise geoestatística no VARIOWIN, GEO-EAS e Spring, gerando um mapa de grades, onde se pode gerar curvas de isovalores da profundidade das águas sub-superficiais.

Já os dados cartográficos temáticos (1° e 2° Fase), foram criados utilizando o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (Spring) versão 4.2.

Na terceira etapa banco de dados (ambiente Spring), foram criadas:

- A categoria Temática “geologia” com Plano de Informação (PI) cont\_geo, contendo os estratos geológicos (bau, bot, srg, sil);

- A categoria Temática “tipo” com PI aquifero\_livre, contendo os tipos de confinamento das águas sub-superficiais (livre e fissurado);

- A categoria Numérica “profundidade” com PI nível\_aquífero\_fat\_ponderado, contendo a grade do NE, obtida pela krigagem ordinária.

A escala utilizada foi 1:20000, as Projeções utilizadas foram o sistema UTM, modelo da terra Horizontal Córrego Alegre, Vertical Indaiatuba (SC), origem Long 45° e zona 23.

Na quarta etapa inter-relação dos planos de informação foi realizada o processamento e a sobreposição dos planos de informação (Figura 9), importantes para a avaliação e geração do mapa de vulnerabilidade natural a poluição das águas sub-superficiais, utilizando a linguagem de programação LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico).

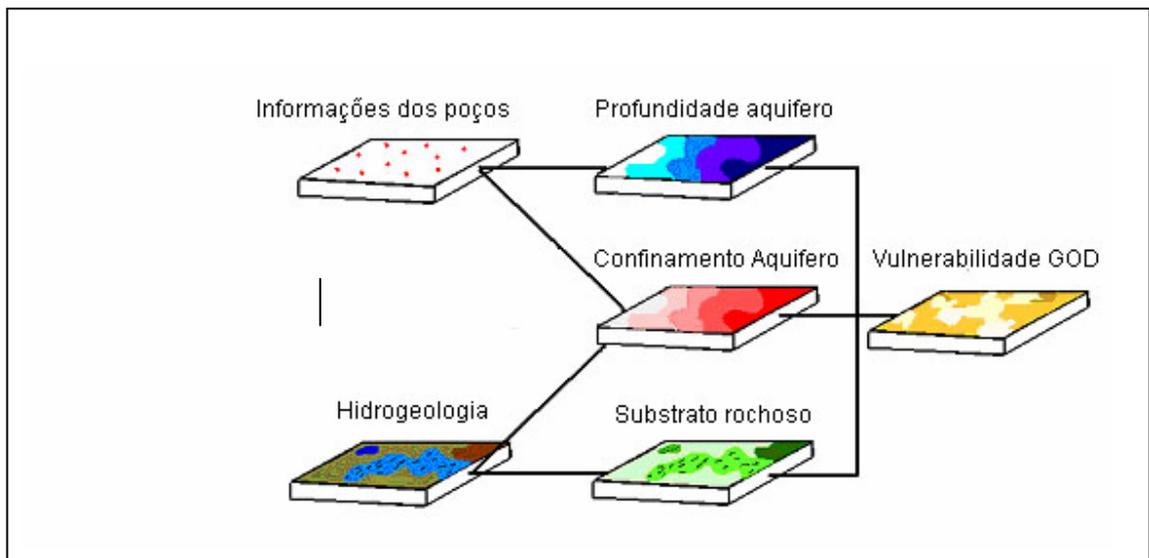


Figura 9: Descrição esquemática do método GOD. Fonte: modificado Valverde & Mesalles, 2006.

Na discussão dos resultados e conclusões, quinta e última etapa desta pesquisa, foram realizadas a integração das informações armazenadas no banco de dados e a edição dos mapas finais realizada nos aplicativos computacionais Scarta e Iplot que fazem parte do Spring. O que promoveu a reflexão crítica dos resultados obtidos, comparado-os com outros resultados de outros trabalhos realizados na área de estudo.

## **8. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Os Resultados obtidos na modelagem dos dados e na álgebra de mapas são apresentados em 5 temas descritos a seguir:

### **8.1 Mapa Documentação dos Poços**

A criação do Mapa Documentação dos Poços foi realizada pela união do Mapa Documentação (PONS, 2006), com o cadastro dos poços cedidos pelo DAEE – Araraquara e Muro (2000), somando 83 poços numa área total de 193 Km<sup>2</sup> (Figura 10).

No ambiente Spring criou –se a categoria Temática (Nome = documentação), com classes (per\_urb, rodv, poços), no PI (poços), que contem as estradas, limite da área urbana e poços, sendo a inserção dos poços feita pela importação das coordenadas planas.

É importante observar a irregularidade da localização dos poços, fator este, preocupante para a geração do mapa de profundidade do nível estático, descrito a seguir.

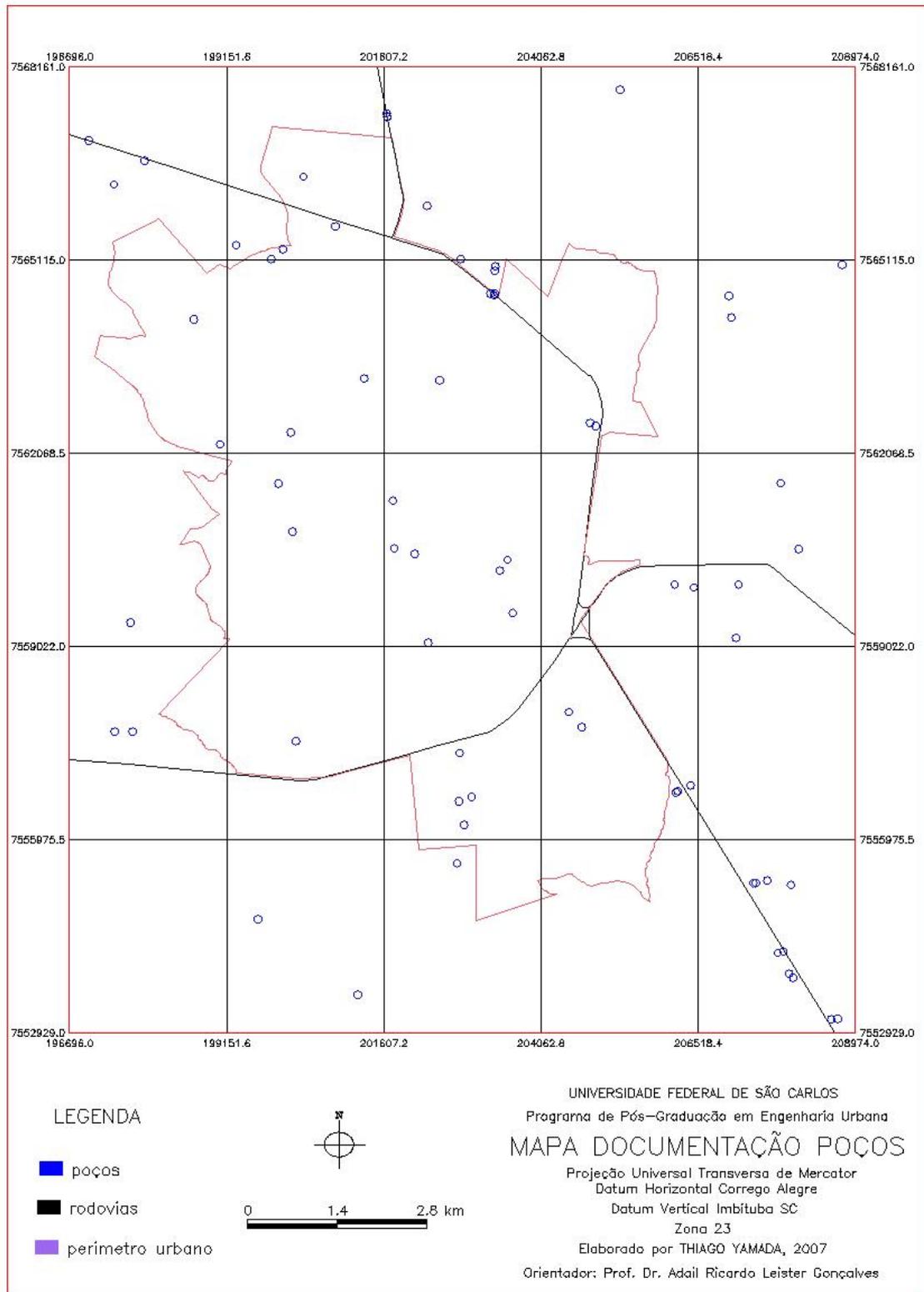


Figura 10: Mapa Documentação dos poços (especialização dos poços da área de estudo).

## **8.2 Mapa Profundidade do nível d`água sub-superficial**

O Mapa profundidade do nível d`água sub-superficial foi elaborado a partir do mapa documentação dos poços citado anteriormente, sendo X, Y (coordenadas) e Z nível estático (N.E.), lembrando que se trabalhou apenas com as águas sub-superficiais, devido a sua maior vulnerabilidade em relação as águas subterrâneas confinadas. O nível estático obtido através de dados pré-existentes, revelou valores que variam de 0 (jorrante) a 150 metros. Vale ressaltar que devido às características físicas da área de estudo, este mapa foi o mais relevante na aplicação do método GOD (vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos).

Devido à irregularidade dos dados amostrados, estes foram tratados com a Geoestatística, descrita a seguir.

### **8.2.1 Geoestatística**

Para análise Geoestatística dos dados amostrados do nível estático (NE) das águas sub-superficiais, optou-se pelos softwares VARIOWIN, GEO-EAS, Spring e Surfer.

Primeiramente no Surfer, criou-se um arquivo com extensão .dat (nivel.dat) contendo as coordenadas X , Y e NE dos poços. Em seguida utilizou-se o VARIOWIN para uma análise variográfica dos dados amostrados.

Segundo Landim (2004), para se usar o VARIOWIN deve-se utilizar três de seus aplicativos. São eles: Prevar2D, Vario2D e Model.

O arquivo nivel.dat foi aberto no utilitário Prevar2D, onde foram eliminados os poços com mesma coordenadas X / Y, foi criado um arquivo contendo uma matriz de distâncias para todos os possíveis pares de dados existentes (no caso nivel.pcf) e um mapa de pontos no sistema de coordenadas X / Y. Obtendo assim o número de poços (number of data = 83), number of variables = 3 e número de pares (number of pairs = 3403).

Agora no aplicativo Vario2D, o arquivo nivel.pcf, obtido anteriormente, foi utilizado para a variografia exploratória. Calculando:

- O semivariograma direcional (“**Directional Variogram**”), com parâmetros do Lag (Lag spacing = 690, Lag tolerance = default e number of Lags = 5) e parâmetros de direção (Direction = 0, Angular tolerance = 90 e Maximum bandwidth = no limits). Neste caso o NE teve um comportamento com isotrópico representando uma situação onde em todas as direções possíveis a mesma variabilidade. Sendo em seguida gravado um arquivo, neste caso, ne.var.

- O “**Variogram Cloud**”, com parâmetros de distância (Minimum distance = 0, Maximum distance = 5000) e parâmetros de direção (Direction = 0, Angular tolerance = 90 e Maximum bandwidth = no limits). Para se obter uma nuvem de pontos que mostram a relação entre a magnitude do vetor de separação entre pares de pontos e o valor no semivariograma desse par.

Segundo Landim (2004), “o variograma direcional pode ser considerado como o resultado das medias móveis de uma nuvem variográfica, este substitui a distância euclidiana “h” pela distância “ $\gamma(h)$ ”, atributo específico do local em estudo, e a distância dada pelo variograma mede o grau médio de similaridade entre um valor não amostrado e um valor conhecido vizinho”.

- O mapa “**Variogram Surface**”, com parâmetros na direção X (Lag spacing = 1500 e número de Lags = 5), com parâmetros na direção Y (Lag spacing = 1700 e número de Lags = 5), mostra na forma de “pixels”, o resultado das medias móveis de uma nuvem variográfica nas possíveis direções. O VARIOWIN, assim como o GEO-EAS, considera 0° como sendo E-W e as demais direções aumentando no sentido anti-horário, ou seja, NE- SW = 45°, NS = 90° e NW- SE = 135°. Deve-se observar se a variável sob estudo apresenta um comportamento isotrópico ou anisotrópico, neste caso como visto anteriormente isotrópico com variações iguais nas direções

0°, 45°, 90° e 135°, selecionando qualquer ponto do mapa com o botão esquerdo do mouse pode-se visualizar na forma de tabela o mapa variográfico.

A próxima etapa foi a utilização do Model, utilitário que executa, de modo interativo, o ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental obtido pelo Vario2D (arquivo nível.var). Inicialmente deve-se escolher o melhor modelo (esférico, exponencial, gaussiano e potência), com o menor fator de ajuste IGF “Indicative Goodness Of Fit”. Foi escolhido fator de ajuste ( $4.1163.10^{-1}$ ), modelo gaussiano, valores para, nugget (14), ranger (3500), sill (1157.43).

Escolhido o modelo mais indicado com menor IGF, os seus parâmetros podem ser gravados na extensão .grd, para serem posteriormente utilizados para interpolação no GEO-EAS e Spring.

Depois de decidir os melhores parâmetros do modelo de semivariograma teórico no VARIWIN, passa-se para o GEO-EAS onde se faz a entrada desses parâmetros pré-determinados anteriormente e aplicação do interpolador krigagem ordinária, etapas descritas a seguir:

#### 1) Análise Exploratória

Primeiramente se observou a distribuição dos pontos de amostragem, no caso, as coordenadas dos poços, efetuando uma análise exploratória dos dados com o aplicativo SCATTER, sobre o arquivo nível.dat.

Na coordenada X estão os valores no sentido E-W, na coordenada Y os valores no sentido N-S e NE os valores do nível estático.

#### 2) Análise Variográfica

Após a análise exploratória, o próximo passo é a análise variográfica no aplicativo PREVAR, que consiste no pareamento dos dados por valores para formulação do

semivariograma, criando um arquivo .pcf para posterior análise variográfica e informa o número de pares considerados.

Na próxima etapa no aplicativo VARIO foi feito o semivariograma experimental, neste aplicativo foi escolhido a direção = 0, tolerância 90, quantidade de pares = 5 (Lag), espaço dos pares máximo = 5000 e mínimo = 0 e incremento = 690.

Criado o semivariograma experimental é hora de se escolher o melhor modelo teórico de semivariograma que se ajuste ao experimental. No caso deste estudo optou-se pela escolha do gaussiano, devido ao pré-ajuste realizado no VARIOWIN.

Depois de realizado o ajuste, é necessário validar o modelo proposto, “validação cruzada”, no aplicativo XVALID, Neste deve-se escolher o tipo de krigagem neste caso optou-se pela ordinária, os parâmetros da elipse de procura (default) e o modelo do semivariograma (vistos anteriormente). Depois de executado, o resultado é o mapa de valores estimados.

### 3) Estimativa pela Krigagem

Para se suceder a krigagem no aplicativo KRIGE deve-se escolher o tipo de krigagem que neste caso é do tipo ordinária e pontual, os parâmetros da grade (espaço X = 1572, Y = 1756 e número = 10) e parâmetros de busca (tipo de distancia = semivariograma, número máximo = 8 e número mínimo = 1). Ao clicar em executar será mostrado o mapa da estimativa por krigagem.

No final deste processo o arquivo nível.grd foi aberto no software Surfer e salvo como arquivo nível Surfer Worksheet (extensão .dat), em seguida este arquivo nível Surfer Worksheet foi aberto e salvo como outnivel.grd GS ASCII, para ser importada pelo Spring.

No Spring criou-se o Plano de Informação NUMÉRICO (MNT) nivel\_gkfim, em seguida foi importada a grade de valores preditos e amostrados pela krigagem ordinária no GEO-EAS. O próximo passo foi à criação do mapa Temático com Plano de Informação contendo as classes de

profundidade do NE, para isso utilizou-se à ferramenta fatiamento, transformando uma grade Numérica em Temática.

Na Figura 11, pode-se verificar os maiores valores de NE dos poços estão na porção Centroeste, sudoeste e uma pequena mancha a Leste.

Assim, pode-se afirmar que onde o nível estático é maior (mais profundo), a vulnerabilidade natural é menor, pois o nível freático esta mais distante da superfície, o que condiciona uma situação menos favorável a contaminação. Já um nível estático menor esta mais vulnerável naturalmente, pois se encontra mais próximo à superfície, devendo qualquer ocupação antropica ter um maior planejamento.

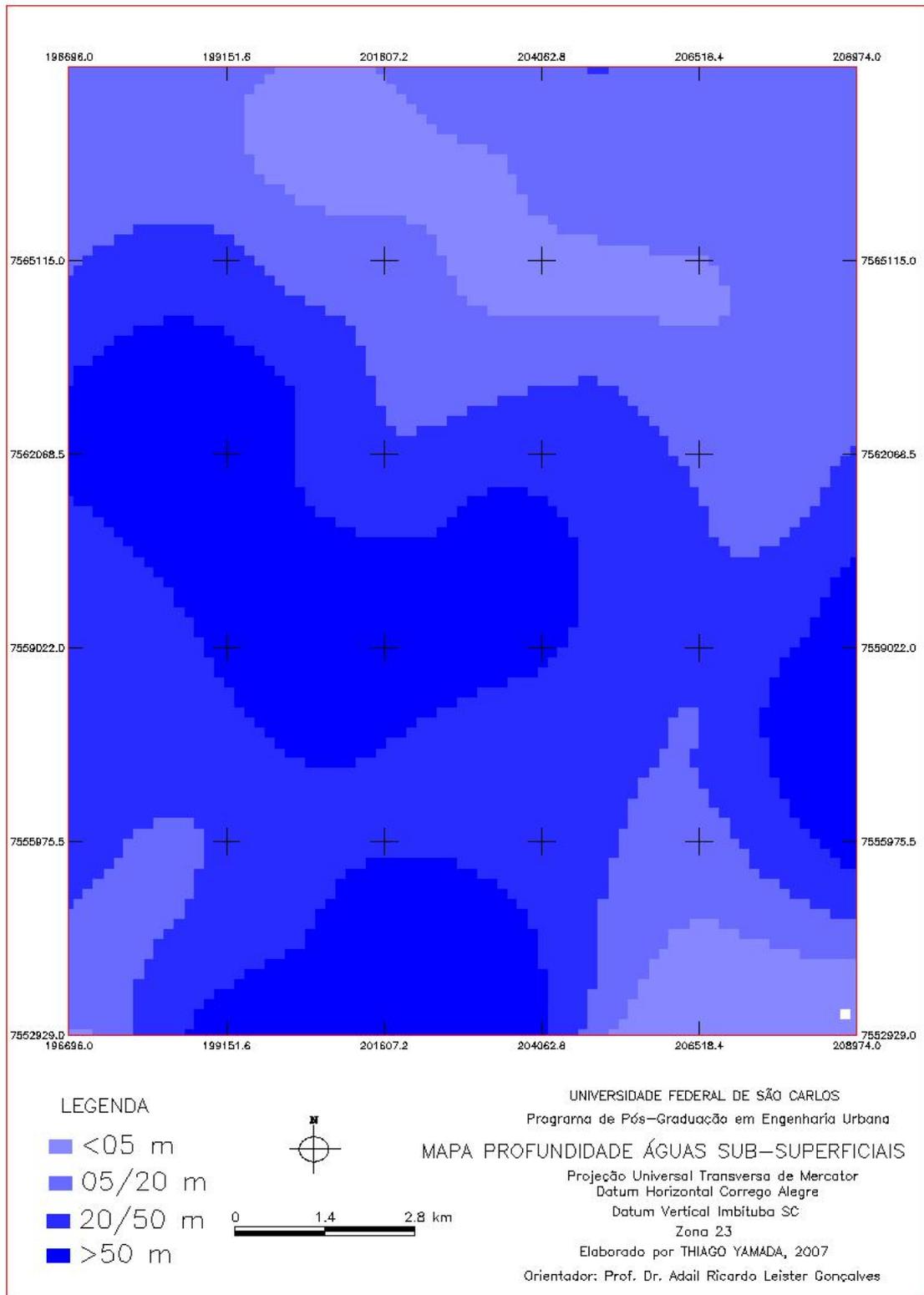


Figura 11: Mapa Profundidade das águas sub-superficiais.

### 8.3 Mapa Substrato Rochoso

O Mapa Substrato Rochoso foi elaborado com base em trabalhos pré-existentes na área (BORTOLUCCI, 1983; AGUIAR, 1989; MURO, 2000; PONS, 2006). Foram identificados três estratos geológicos: Formação Itaqueri, Formação Botucatu, Formação Serra Geral (Figura 12). Este se refere à capacidade de atenuação do aquífero, que é função do material que o constitui, uma vez que a rocha de grãos mais grosseiros ou mais fraturados possui menor capacidade de atenuar os poluentes.

A seguir estão descritos os estratos geológicos da área de estudo e suas características.

Tabela 3: Estratos geológicos e suas características na área de estudo.

<b>ESTRATOS GEOLÓGICOS</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>FORMAÇÃO ITAQUERI</b>	Arenitos finos a conglomeráticos, imaturos
<b>FORMAÇÃO BOTUCATU</b>	Arenitos homogêneos de origem eólica, com estratificações cruzadas de médio a grande porte, na região sudoeste encontra-se silicificado, mais na maior parte se encontra recoberto pelas rochas básicas da Formação serra geral e pelos arenitos do Grupo Bauru
<b>FORMAÇÃO SERRA GERAL</b>	Derrames de Basalto e corpos intrusivos associados, sua ocorrência esta associada a fundo de vales

Podemos afirmar então que a área de estudo possui uma baixa capacidade de atenuação de poluentes, devido às características granulométricas das rochas.

No ambiente Spring, foram importados os vetores do layer (cont\_geo extensão DXF-R12), em seguida foi criada uma categoria Temática (Nome = geologia), com classes (ita, bot, srg e sil), no PI (cont\_geo), os vetores foram ajustados e poligonizados e associados às respectivas Formações geológicas na caixa de edição vetorial. Foram também importados os vetores da hidrografia. Feito isso o PI (cont\_geo) Temático passou pela transformação (Vetor – Matriz), para posterior aplicação da álgebra de mapas.

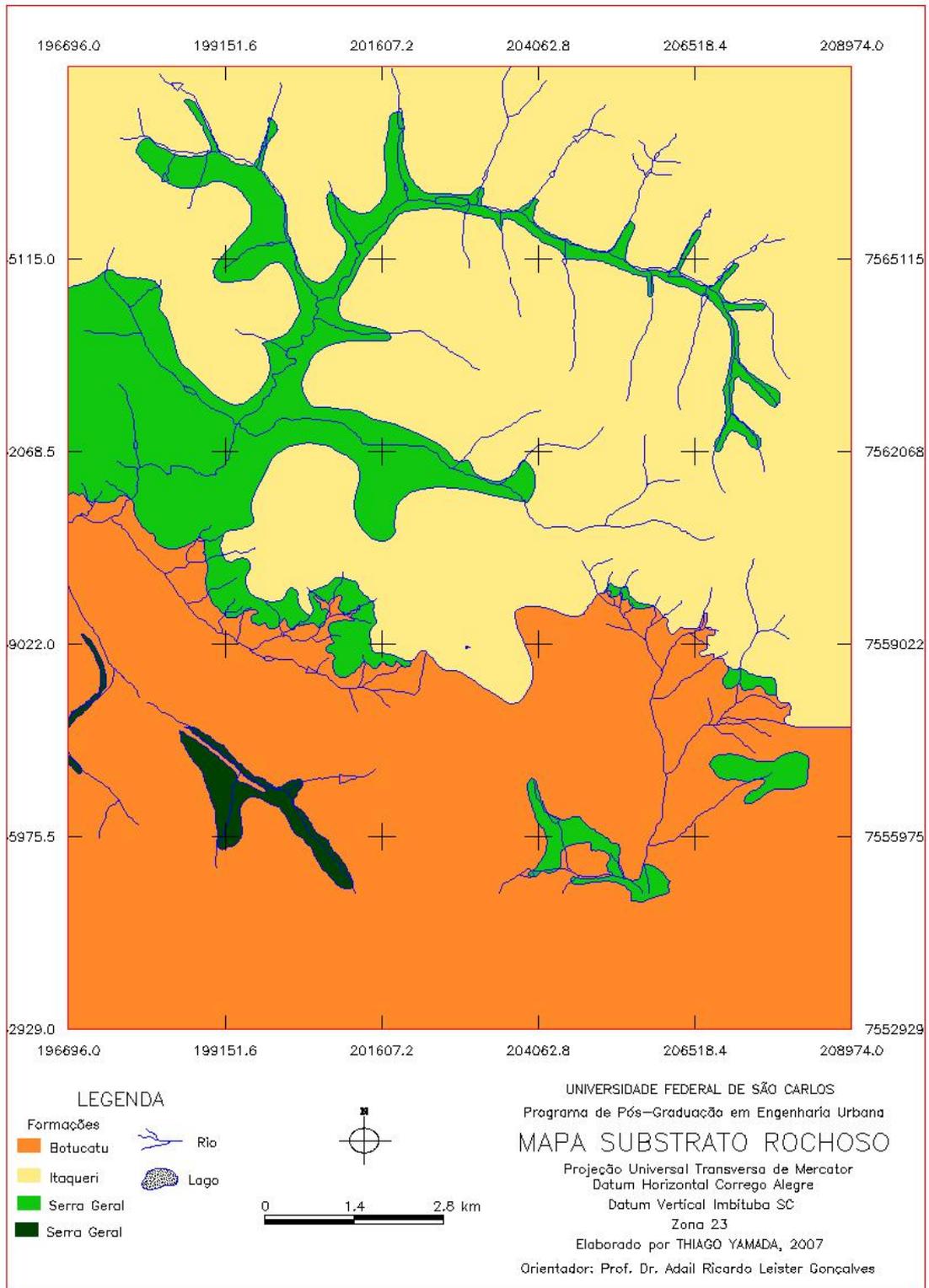


Figura 12: Mapa Substrato Rochoso.

#### 8.4 Mapa Tipo de Ocorrência das águas sub-superficiais

Este mapa foi elaborado a partir da interpretação do mapa substrato rochoso e dos perfis geológicos contidos nos cadastros dos poços DAEE – Araraquara (2006) e MURO (2000) (Figura 13). Lembrando que mesmo ocorrendo aquíferos confinados, esta pesquisa considerou apenas as águas sub-superficiais, uma vez que numa pré-análise de vulnerabilidade natural o aquífero confinado se mostraram com vulnerabilidade desprezível, portanto irrelevantes nesta pesquisa.

No ambiente Spring, foi realizado o mosaico do PI (conta\_geo), modelo Temático da categoria geologia, somente com os vetores, para o PI (aquifero\_livre), modelo Temático da categoria tipo. Devido à análise apenas das águas sub-superficiais, este mapa teve apenas duas classes associadas (livre e fissurado). Feito isso o PI (aquifero\_livre) Temático passou pela transformação (Vetor – Matriz), para posterior aplicação da álgebra de mapas.

Tabela 4: Aquífero, grau de confinamento e estratos geológicos na área de estudo.

<b>AQUIFERO</b>	<b>OCORRÊNCIA (GRAU DE CONFINAMENTO)</b>	<b>ESTRATOS GEOLÓGICOS</b>
ITAQUERI	LIVRE	FORMAÇÃO ITAQUERI
BOTUCATU	LIVRE E CONFINADO	FORMAÇÃO BOTUCATU / PIRAMBÓIA
SERRA GERAL	FISSURADO	FORMAÇÃO SERRA GERAL

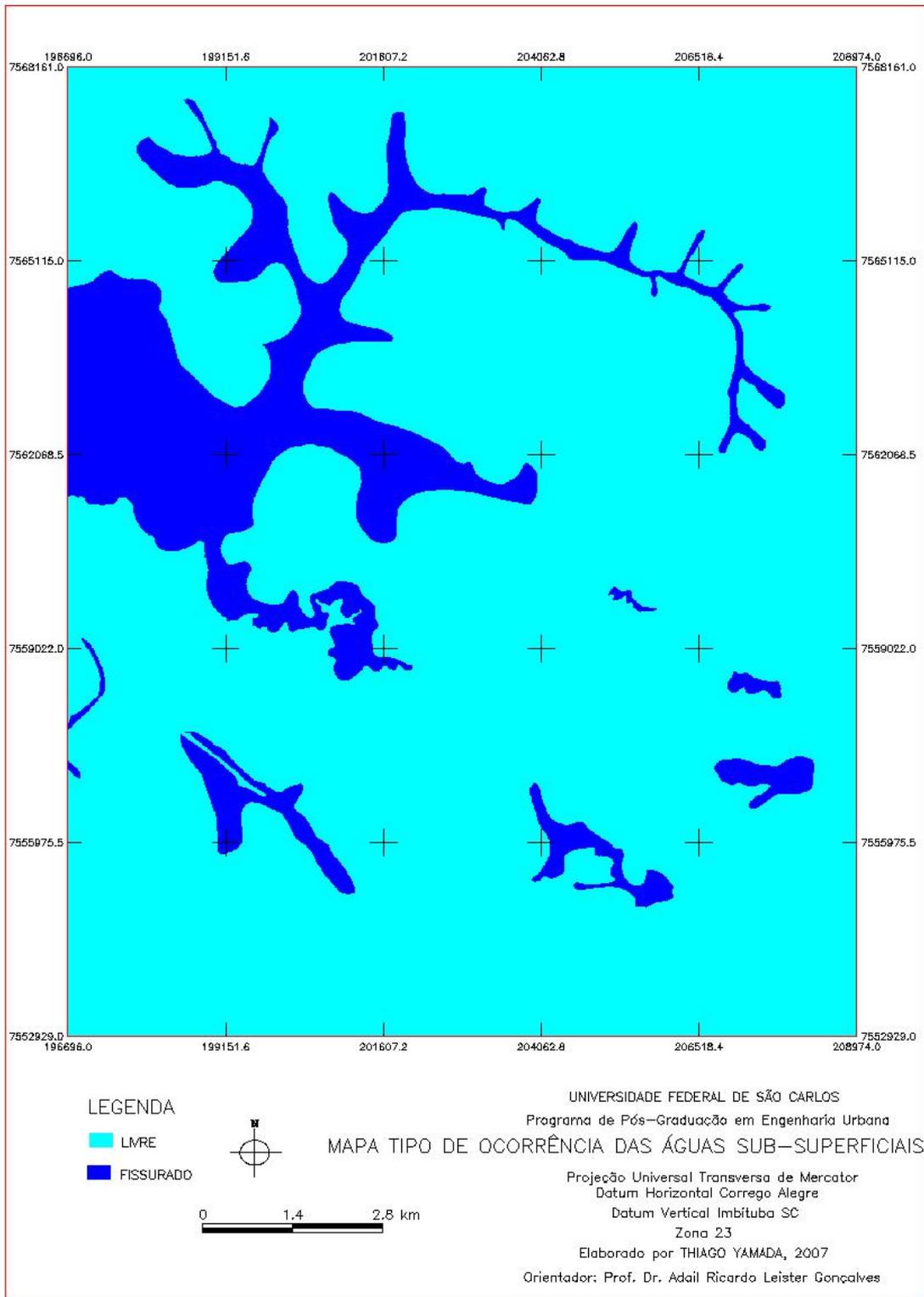


Figura 13: Mapa Tipo de Ocorrência das águas sub-superficiais.

### **8.5 Mapa de Vulnerabilidade Natural à poluição das águas sub-superficiais**

O Mapa de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais foi criado utilizando três mapas criados anteriormente, Mapa do substrato rochoso, Mapa do tipo de ocorrência da água subterrânea e Mapa da profundidade das águas sub-superficiais, conforme estabelecido pelo método GOD (Groundwater hydraulic confinement), proposto por Foster *et. al.* (2002). Primeiramente criou-se, no ambiente Spring, uma categoria Temática (Nome = vulnerabilidade), com classes (extrema, alta, moderada, baixa e desprezível) no PI (vul\_god). Para se obter o mapa de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais da área urbana e periurbana do município de São Carlos – SP, os planos de informação cont\_geo, aquifero\_livre e nivel\_aquífero, foram ponderados e fatiados na Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL).

Os resultados obtidos foram duas classes de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais para a área de estudo, alta e moderada, sendo que a alta abrangeu 35 % da área tendo predominância na porção norte e dois focos na porção sul, onde a altura do nível estático é baixa. Já a classe moderada abrangeu 65% da área com predominância centroeste e sudoeste, fale ressaltar que onde ocorre a Formação Serra Geral a classe foi moderada. A tabela 5 revela as definições das classes de vulnerabilidade.

Tabela 5: Mostra as classes de vulnerabilidade natural de aquíferos, e suas respectivas definições correspondentes (restrições). Fonte: modificado de Foster *et. al.*, 2002.

<b>Classes de vulnerabilidade</b>	<b>Definição correspondente</b>
<b>Extrema</b>	Vulnerável à maioria dos poluentes de rápido impacto na água. Aplicável em inúmeros cenários de poluição. Imprescindível à realização de estudos quantitativos e qualitativos de detalhe (ensaios laboratoriais e geofísicos) para todas as instalações de empreendimentos potenciais à poluição do solo e da água.
<b>Alta</b>	Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição. Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais
<b>Moderada</b>	Vulnerável para alguns poluentes. Apresenta capacidade atenuadora mais eficaz que as classes alta e extrema. Resíduos e/ ou efluentes resultam em risco de contaminação quando são continuamente descartados ou em situação de vazamento. Necessário realizar estudos de detalhe qualitativos e específicos para cada tipo de empreendimento
<b>Baixa</b>	Somente vulnerável para poluentes conservativos (baixa mobilidade), quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento. Necessários estudos de detalhe qualitativo para cada tipo de empreendimento
<b>Desprezível</b>	Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical

A Figura 14 revela o mapa de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais, ferramenta esta que pode definir um melhor zoneamento da área, visando garantir a qualidade das águas subterrâneas para as futuras gerações, como também os melhores locais para áreas de recarga das águas sub-superficiais, além de melhorar a decisão de abertura de novos poços.

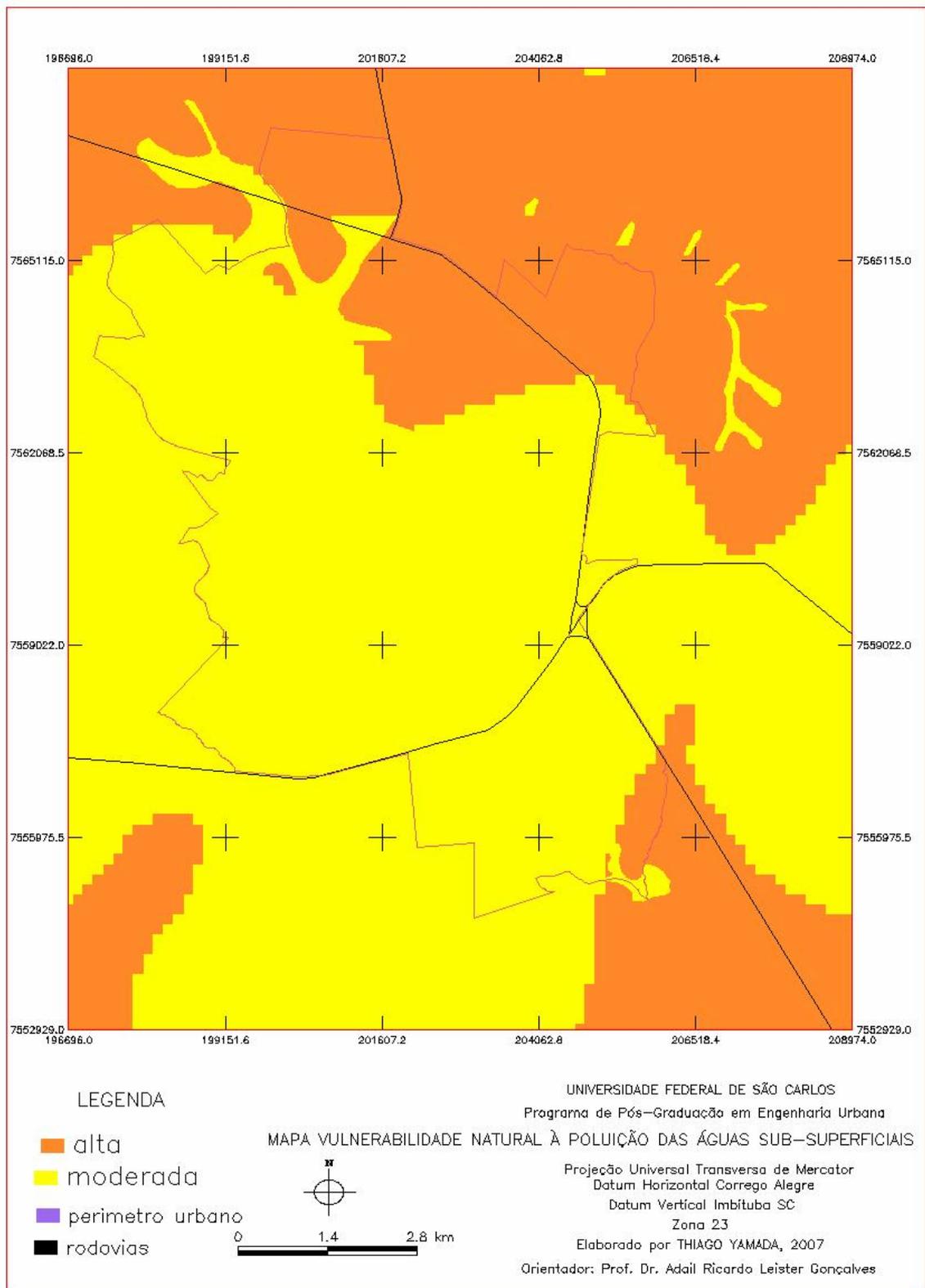


Figura 14: Mapa Vulnerabilidade Natural à poluição das águas sub-superficiais.

## 9. CONCLUSÕES

Com estes resultados cartográficos temáticos foi possível identificar as áreas com ALTA vulnerabilidade natural (porção Norte, parte Sudeste e Sudoeste) e MODERADA vulnerabilidade natural (porção Central, Centroeste e parte Sudoeste) à poluição das águas sub-superficiais.

A utilização de ferramentas de geoprocessamento na determinação dos índices de vulnerabilidade natural à poluição das águas sub-superficiais proposto pelo método GOD se mostrou extremamente eficiente, relativamente rápida e com baixo custo. Revelando-se assim de grande importância para o planejamento, gestão, monitoramento e conservação dos recursos hídricos sub-superficiais do município de São Carlos – SP.

Outros estudos, como o de Gonçalves (1986) que estudou a Geologia Ambiental da área de São Carlos, mostrou porções de vulnerabilidade diferentes das obtidas nesta dissertação que utilizou apenas três variáveis para a determinação da vulnerabilidade natural, das águas sub-superficiais, a poluição. Isto mostra que mesmo se tratando de um tema semelhante, o uso de diferentes métodos pode levar a diferentes respostas para uma mesma área de estudo. Portanto, sempre se deve conhecer as características presentes na área de estudo para que se possa determinar qual o método que proporcionará a melhor resposta.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUIAR, R.L. **Mapeamento geotécnico da área de expansão urbana de São Carlos – SP: contribuição ao planejamento**. 2v. 127p + 14 mapas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1989.
2. ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bulletin BMGM ZME**, 2<sup>o</sup> Series, v.3, n<sup>o</sup>4, p13-22, 1970.
3. ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKET, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings**. Preparado por National water well association para US EPA Office of Research and Development, Ada, USA, 1987.
4. ALMEIDA, F. F. M.. Geologia do Centro-Oeste Mato-grossense. **Boletim Divisão Geologia e Mineralogia** (215). Rio de Janeiro: 137 p. 1964.
5. ANA – Agência Nacional de Águas (2002). Disponível em <http://www.ana.gov.br>. Acessado em 2005.
6. ANDERSEN, L. J.; GOSK, J. Applicability of vulnerability maps. **TNO Committee for hydrological research: Proceeding and information**. The Netherlands. V. 38, p.321-332. 1987.
7. ARONOFF, S. **Geographical information system: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1989.
8. AULICINO, L. C. M; RUDORFF, B. F. T; MOREIRA, M. A; MEDEIROS, J. S; SIMI Jr., R. Subsídios para o Manejo Sustentável da Bacia Hidrográfica do Rio Una através do uso de técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA, IX. Argentina. **Anais...2000**.
9. BRASIL, Lei No. 4.771. **Institui o novo Código Florestal**. 15 de setembro de 1965. Disponível em: <http://www.sosmatatlantica.org.br>.
10. BRASIL. Lei n. 9.433. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. SRH/MMA. Brasília, DF: senado. 08 de janeiro 1997.
11. BTA ENGENHARIA. **Planta planialtimétrica, digitalizada e georreferenciada, em escala 1:10.000 da cidade de São Carlos, com a localização dos poços do SAAE**. Arquivo em formato dwg, gravado em CD. 1998.

12. CÂMARA, G. Anatomia de sistema de informações geográficas: Visão atual e perspectivas de evolução. In: **Sistemas de informações geográficas aplicações na agricultura: Ministério da agricultura, do abastecimento e da reforma agrária, Empresa Brasileira de pesquisa Agropecuária- EMBRAPA**, Centro de pesquisa Agropecuária dos Cerrados- CPAC, pp. 16-37. 1993.
13. CÂMARA, G. **Anatomia de um SIG**. Curitiba: Fator GIS, nº4. 1994.
14. CÂMARA, G. **Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Banco de Dados Geográficos**. Tese (Doutorado em Computação aplicada). São José dos Campos. INPE. 1995. disponível em <[http:// www.dpi.inpe.br/teses/gilberto](http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto)>. Acessado: 2006.
15. CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Geoprocessamento para projetos ambientais. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Salvador, BA. INPE. P. 138. 1996.
16. CÂMARA, G., et al. **Análise espacial de dados geográficos**. FEIRA E Congresso Internacionais de Geoinformação. São Paulo, 2000.
17. CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Relatório de qualidade de águas subterrâneas, 2004**. disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acessado em 2006.
18. COIMBRA – FILHO, A. F. **Leontopithecus rosalia chrysopygus, o mico – leão do estado de São Paulo**. Sil. São Paulo, 10: 1- 36. 1996.
19. CORIDOLA, R.; VIEIRA, E. M.; ALVES, M. G.; ALMEIDA, F. T. Uso das Técnicas de Geoprocessamento na Elaboração de Mapa Preliminar de Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Campos de Goytacazes – RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO XII. p. 2933-2940. Goiânia. **Anais...**2005.
20. CORRÊA, T.; COSTA, C.; SOUZA, M. G.; BRITES, R. S. Delimitação e Caracterização de Áreas de Preservação Permanente por Meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). **Revista Árvore**. Viçosa - MG, v.20, n.1, p.129 – 135. 1996.
21. COSTA, R. C. **A decisão de participar de projetos de conservação ambiental: o caso dos assentados do Ribeirão Bonito (Teodoro Sampaio – SP)**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Programa de Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
22. COSTA, S. M. F. Orbital remote sensing applied to urban environmental impact – A case study. In: International Symposium on Remote Sensing o environment, **Summaries**, 24. Rio de Janeiro – RJ. 1991.
23. CRÓSTA, A.P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas. São Paulo. 1992.

24. DALKEY, N.; HELMER, O. An experimental application of the Delphi Method to the use of experts. **Management Science**, vol.9, n.9. 1963.
25. DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, S.; POPESCU Ch.; ZWHALEN, F. “Main concepts of the ‘European Approach’ for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping”, **Hydrogeology Journal**, 10, 2, pp340-345. 2002.
26. DANGERMOND, J. What is a Geographic information System (GIS) In: JOHNSON, A .I.; PETTERSSON, C. B.; FULTON, J. L. **Geographic Information Systems (GIS) and Mapping – Practices and Standards**. Philadelphia: ASTM STP 1126, Eds. American Society for Testing and Materials, 1992.
27. DIEDERICHSEN, A. T. B.; METZGER, J. P. A influência da atitude conservacionista e legislação ambiental da conservação de fragmentos florestais, Caucaia- do- Alto (Cotia, Ibiúna, SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO. Fortaleza. **Anais...**2002.
28. DITT, E. H. **Diagnóstico da conservação e das ameaças a fragmentos florestais no pontal do Paranapanema**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) - Programa de Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000.
29. ENGLUND, E. & SPARKS, A. Geo-EAS 1.2.1. **User’s Guide: US.EPA Report #600/8-91/008**, EPA-EMSL. 1991. Disponível em: [www.epa.gov/ada/csmos/models/geoeas.html](http://www.epa.gov/ada/csmos/models/geoeas.html)
30. FILHO, M. V. Gerenciamento de bacias hidrográficas com aplicação de técnicas de Geoprocessamento. **Análise Ambiental: Estratégias e Ações**. Coord. Sâmia Tauk, editora UNESP, Rio Claro, pp.135 a 140. 1995.
31. FORESTI, C. Proposta metodológica para o estudo ambiental e da estruturação do espaço urbano em áreas metropolitanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO VI. Manaus. **Anais...**1990.
32. FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. Contaminacion de las água subterráneas: un enfoque ejecutivo de la situacion em América Latina y el Caribeen relacion com el suministro de água potable. **Lima: OMS; OPS- HPE; CEPIS**, 1987.
33. FOSTER, S., HIRATA, R.C.A **Groundwater pollution risk evolution: the methodology using available data**. Lima. Technical Report 1988.
34. FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; GOMES, D.; D’ELIA, M.; PARIS, M. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. **Washington: The World Bank**, 2002.

35. FURLAN, S. A. **Lugar e Cidadania: implicações sócio-ambientais das políticas de conservação ambiental (situação do Parque Estadual de Ihabela na Ilha de São Sebastião – SP)**. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
36. GOMES, J.M.; VELHO, L. **Computação visual: imagens**. Rio. SBM. 1995.
37. GONÇALVES, A. R. L. **Geologia Ambiental da Área de São Carlos**. Tese (Doutorado em Geologia geral e de aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
38. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO; SECRETARIA DOS SERVIÇOS E OBRAS PUBLICAS; DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 6 Ribeirão Preto**. Geopesquisadora Ltda. Tahal consulting engineers ltd. 1974.
39. GREGÓRIO, C. E. **Análise de uma região no município de Campinas (SP) através do uso de imagens orbitais LANDSAT e SPOT: com ênfase em Áreas de Preservação Permanente**. Dissertação (Mestrado em geotecnia) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
40. GRIGORIEV, A. A. “The Theoretical Fundaments of Modern Physical Geography”. In: **The Interaction of Sciences in the Earth**. Moscou. 1968.
41. HEARTLE, A. Toxic organic chemicals: destrution and waste treatment. **Poll Tech Review**. V. 1, p 40-317,1983.
42. INPE. **Manual do usuário Spring**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em [http:// www.dpi.inpe.br](http://www.dpi.inpe.br)>. Acessado em 2006.
43. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica Tiête / Jacaré. UGRHI 13**. Comitê da Bacia Hidrográfica Tiête / Jacaré – CBH – TJ. Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO. Minuta disponível on-line em: <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Acessado em 2004.
44. ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York. Oxford University Press. 1989.
45. LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. Rio Claro. Editira Unesp. 1997.
46. LANDIM, P.M.B. GEOEAS: um exemplo de aplicação em análise geoestatística. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatématica, **Texto Didático** 11, 41 pp. 2003. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 2007.

47. LANDIM, P.M.B. INTRODUÇÃO À ANÁLISE VARIOGRÁFICA COM O VARIOWIN: Lab. Geomatemática, DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, **Texto Didático** 14, 25 pp. 2004. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 2007.
48. LEFF, H. **Epistemologia ambiental**. Cortez Editora, São Paulo. 2001.
49. LEITE, C. E. S. MOBUS, G. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do rio Mundaú / Ceará. In: **X Congresso Brasileiro de águas subterrâneas São Paulo – SP**. 1998.
50. LEVANTAMENTOS DO PD. PDF. **Plano Diretor**. Prefeitura Municipal de São Carlos. Secretaria Municipal de Habitação e Desenvolvimento Urbano. CD-ROM, São Carlos – SP. 2003.
51. LIBÓRIO, M. G. C. **Código Florestal Brasileiro: em estudo sobre as relações entre sua eficácia e a valorização da paisagem florestal no Sudoeste Paulista**. Tese (Doutorado em Organização do espaço) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1994.
52. LIMA, M. A. De., CAVALHEIRO, F. Análise da degradação ambiental no município de Rio Claro com apóia de sistemas de Informação Geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO VII. Curitiba. **Anais...**1993.
53. MACHADO, L. M. C. P. Paisagem valorizada: a serra do mar como espaço e lugar. In: DEL RIO, V.; OLIVEIRA, L. (Org.). **Percepção Ambiental: a experiência brasileira**. São Carlos. Study Nobel, p. 97 – 119. 1999.
54. MACHADO, P. A. L. **Direito Ambiental brasileiro**. Malheiros Editores LTDA, São Paulo. ed. 7, pp. 485 a 492. 1998.
55. MALHEIROS, T. M. M. **A gestão ambiental pública**. Gazeta Mercantil, 24 de abril . fasc. 6, p. 6. 1996.
56. MEAULO, F. J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara – SP**. Dissertação (Mestrado em geociências e meio ambiente) - Instituto de Geociências e ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2004.
57. MCT. **Convenção sobre Mudança do Clima: O Brasil e a Convenção Quadro das Nações Unidas. 2002**, disponível em: <http://www.mct.gov.br/clima/>. Acessado em 10 de agosto de 2005.
58. MELLO, L. P. **Percepção da paisagem e conservação ambiental no banhado grande do Rio Gravataí (RS)**. Tese (Doutorado em geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

59. MENDONÇA, F. J. *et. al.* Aplicação de imagens Landsat na análise temporal do uso da terra a nível de imóvel rural. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO V. Natal. **Anais...**1988.
60. MIGUEZ, J.D.G. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: a proposta e as perspectivas brasileiras. In: ENCONTRO "SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA NO BRASIL: OS PRÓXIMOS VINTE ANOS".Campinas. **Anais...**2002.
61. MONKHOUSE, R. A. Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom. Nottingham: Institute of Geological Sciences Report, 1983.
62. MURO, M. D. **Carta de zoneamento para seleção de áreas frete à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP, escala 1: 50.000.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) -Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
63. NOVO, E. M. L. de M. Sensoriamento remoto princípios e aplicações, Ed. Edgar Bluche Ltda., São Paulo – SP. 1988.
64. OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H. Levantamento pedológico semi-detalhado do estado de São Paulo: quadrícula São Carlos. **Boletim técnico.** No. 98. III memorial descritivo. Campinas: IAC. 188 p. II. 1988.
65. PANNATIER, Y. **VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D.** Springer-Verlag. 1996.
66. PERRONI, J. C. A. **Avaliação do consumo de energia elétrica para a produção de água subterrânea – o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos, SP.** Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento) -Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
67. PELLEGRINI, A. F. **Ecologia, cultura e turismo.** Campinas: Papyrus, 190p. 1993.
68. PINTO, L. V. A.; FERREIRA, E.; BOTELHO, S.A.; DAVIDE, A.C.**Uso atual das terras nas Áreas de Preservação Permanente das nascentes e matas ciliares da sub-bacia do ribeirão santa cruz.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2002.
69. PISSARRA, T. C. T. *et. al.* Utilização de sistema de informação geográfica para avaliação de áreas de preservação permanente em microbacias hidrográficas: um estudo de caso para o município de Jaboticabal, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO XI. Belo Horizonte. **Anais...**2003.
70. PONS, N.A.D. **Levantamento e diagnósticos geológico – geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos SP, com auxílio de geoprocessamento.** Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2006.

71. REBOUÇAS, A. C. **Água doce no mundo e no Brasil. In: REBOUÇAS, A. da C. (ed) Águas Doces na Brasil.** São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, USP. 1999.
72. REBOUÇAS, A. C., B. BRAGA, E J.G. TUNDISI, Organizadores. **“Águas Doces no Brasil - capital ecológico, usos e conservação”.** Ed. Escrituras Editora e Livraria da Vila. 2a.edição. 2002.
73. RIZZINI, C. T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos e florísticos.** V. 2. 1ª. Ed. São Paulo: Hucitec/ EDUSP. 374 P. 1977.
74. ROCHA, S. F. ALVES, M. G.; ALMEIDA, T. A. Estudo Preliminar da Vulnerabilidade dos Aquíferos em Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro. In: SBSR XI. Belo Horizonte. **Anais...** 2003.
75. RODRIGUES, S. R. **“O uso da terra e a qualidade das águas superficiais da bacia do Rio Sapucaí-Guaçú, no município de Campos do Jordão - SP”.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Filosofia Letras C H, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
76. ROSALEN, D.L. **Utilização de um Sistema de Informações Geográficas Associado à Equação Universal de Perda de Solo no Planejamento do Ecoturismo no Município de Santo Antonio do Pinhal – SP.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
77. ROSS, J. L. S. **“Geomorfologia, Ambiente e Planejamento”.** Editora Contexto, São Paulo. 1990.
78. SOARES, J.J., SILVA, D.W. DA E LIMA, M.I.S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo State, Brazil. In: **Brazilian Journal of Biology**, vol.63. n°3, p.527-536. ago. 2003.
79. SOUZA, de A.; SINELLI, O.; DAVINO, A.; BARBOSA, P. F. **Estudos hidrogeológicos para captação de água na EMBRAPA – UEPAE de São Carlos.** Ministério da Agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. São Carlos, SP. 1988.
80. SURFER for Windows. Golden Software, Inc., versão 8.0. 2002.
81. TEIXEIRA, A. L. J.; MORETTI, E.; CHRISTOFOLETTI, A. **Introdução aos sistemas de informação geográfica.** Ed. Do autor, Rio Claro. 1992.
82. USEPA – United States Environmental Protection Agency. **GEO-EAS, version 1.2.1.** [ s.l.]: USEPA, 1991. Conjunto de programas, disponível em < <http://www.sph.umich.edu/~aelon/geoeas/>>. Acessado em 2007.

83. VALVERDE, J. A.; MESALLES, R. P. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.** Disponível em: [http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa\\_rica/analisis\\_vulnerabilidad/vulnerabilidad\\_acuiferoscr.htm](http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad_acuiferoscr.htm). Acessado em 10 de março de 2006.
84. VRBA, J.; ZAPOROTEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability.** International Association of Hydrogeologists. International Contributions to Hydrogeology, 16, 1994.
85. YAMAMOTO, J.K. **A review of numerical methods for the interpolation for geological data.** An. Acad. Bras. Ciên. v.70 n.1.1998.