

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NA
REGIÃO URBANA DE SÃO CARLOS (SP) POR VAZAMENTOS EM
POSTOS DE COMBUSTÍVEIS, UTILIZANDO O MÉTODO GOD E
AVALIAÇÃO DOS CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS.

DANIEL BARTOLOMEU

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências, Programa de Pós-graduação em
Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho

VERSÃO CORRIGDA

SÃO CARLOS

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Bartolomeu, Daniel

B292a Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos-SP por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD e avaliação dos condicionantes geotécnicos. / Daniel Bartolomeu ; orientador Oswaldo Augusto Filho. -- São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geologo **DANIEL BARTOLOMEU**.

Título da dissertação: "Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método god e avaliação dos condicionantes geotécnicos".

Data da defesa: 03/09/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Oswaldo Augusto Filho** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **José Eduardo Zaine**
(UNESP – Campus de Rio Claro)

Aprovado

Prof. Dr. **João Luiz Boccia Brandão**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Aos meus pais, pelo constante apoio e
dedicação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela constante inspiração e acompanhamento no trilhar de toda a vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho, por ter me aceitado como seu orientado neste trabalho. Pelas enriquecedoras discussões técnicas. Pela enorme paciência no decorrer deste período e pela constante e efetiva orientação em todas as etapas desta dissertação de mestrado.

Aos meus pais, por terem me ajudado de diversas formas em todo o meu período acadêmico e em toda minha vida.

A todos os professores do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, pelos ensinamentos e conhecimento transmitido.

Aos técnicos Sr. Antonio Claret Carriel, Sr. Antonio Garcia, Sr. Benedito Oswaldo de Souza, Sr. Décio Aparecido Lourenço, Sr. Herivelto Moreira dos Santos.

Em especial gostaria de agradecer ao Sr. José Luis Guerra, pela paciência e pelos imprescindíveis conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários da secretária Sr. Álvaro Luiz Nery, Sra. Maristela Aparecida Zotesso Batissaco e Sra. Neiva Mompean Rosalis Cardoso.

A todos os meus colegas do período do mestrado. Em especial a Tânia Zapata Coacalla, grande amiga de Peru, pela amizade, conhecimentos e discussões técnicas que trocamos.

A Camilo Alberto Hernandez Ortiz e a Nestor Benedito Fracasse de Barros pelo companheirismo em todo o período em que estive no departamento de Geotecnia.

Ao Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE), pelo suporte financeiro e aprendizado profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

BARTOLOMEU, D. **Análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) por vazamentos em postos de combustíveis, utilizando o método GOD e avaliação dos condicionantes geotécnicos.** 2012. 173f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O constante avanço econômico e tecnológico que estamos vivendo, nos dias de hoje possui como uma das mais marcantes características o aumento na demanda de combustíveis para diversos usos. Fato que pode ser preocupante do ponto de vista ambiental, onde estes combustíveis representam grandes potenciais poluidores. Na área de estudos (região urbana de São Carlos - SP) já existem focos de poluição identificados pela CETESB, onde também ocorrem três importantes aquíferos: Bauru, Guarani (porosos) e Serra Geral (fraturado), estando estes em sessão aflorante (zona de recarga) e em sub-superfície. O mapeamento geológico-geotécnico é uma importante ferramenta, que pode ser empregada como método de diagnóstico fundamentando a análise de vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos. Com a integração do mapeamento geotécnico e técnicas de caracterização específicas de áreas contaminadas poderemos proceder com uma análise de vulnerabilidade mais consistente. O método GOD, utilizado como parâmetro para a análise de vulnerabilidade, vem sendo muito utilizado tanto no cenário nacional como internacional. Neste trabalho se mostrou eficiente, sendo possível correlacionar as diversas classes de vulnerabilidade com os compartimentos geológico-geotécnicos definidos no mapeamento e com a análise dos condicionantes geotécnicos que podem deflagrar uma contaminação em cada unidade geológico-geotécnica definida.

Palavras-chave: vulnerabilidade, mapeamento geológico-geotécnico, método GOD, postos de combustíveis.

ABSTRACT

BARTOLOMEU, D. **Analysis of the vulnerability of water resources in the urban area of São Carlos (SP) for leaks at gas stations, using the GOD method and assessment of geotechnical conditions.** 2012. 173f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

The constant economic and technological advancement that we are living today has one of the most striking features an increase in fuel demand for different uses. This fact may be worrying the environmental point of view, where these fuels are major potential polluters. In the study area (urban area of Sao Carlos - SP) since there are outbreaks of pollution identified by CETESB, where also there are three major aquifers: Bauru, Guarani (porous) and Serra Geral (fractured), the latter being in session outcropping (zone charge) and sub-surface. The geological-geotechnical mapping is an important tool that can be used as a method of diagnosing the reasons for vulnerability analysis of contamination of water resources. With the integration of geological-geotechnical mapping and geotechnical characterization techniques to specific contaminated areas can proceed with a more consistent vulnerability analysis. The GOD method, used as a parameter for the vulnerability analysis, has been widely used in both the national and international scenario. In this work This method was successfully, it is possible to correlate the various classes of vulnerability compartments defined in the geological-geotechnical mapping and analysis of geotechnical conditions which may trigger a contamination in each unit defined.

Keywords: vulnerability, geological-geotechnical mapping, GOD method, gas stations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxograma do método integrado por Abreu (2007).....	28
Figura 3.2. a) Bloco diagrama esquematizando o processo de rastejo, notar mudança na inclinação de postes e da cerca. b) Foto ilustrando o processo. Fonte das figuras: Borrero et al. (2008).	35
Figura 3.3. a) Esquema ilustrando um escorregamento ou deslizamento de blocos de rocha. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).	35
Figura 3.4. a) Esquema ilustrando queda de blocos. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).	36
Figura 3.5. a) Esquema ilustrando corrida de solo ou fluxo de terra. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).	37
Figura 3.6. Processo de assoreamento do rio Jacupiranguinha (Vale do Ribeira – SP). a) foto tirada em 2005 – presença de pequena ilha de sedimentos. b) foto tirada em 2007 – a ilha já bem estabelecida com vegetação consistente e o alargamento do canal do rio. Fonte: Moccellini (2010).	38
Figura 3.7. Processo de inundação em São Carlos (SP). a) Vista geral do processo no centro da cidade. b) Detalhe em uma rua do centro da cidade. Fonte: São Carlos em Rede (2010).	39
Figura 3.8. Modelo de pluma de contaminação para LNAPL. Fonte: Fetter (2001) modificado por Silva (2006).	46
Figura 3.9. Modelo de pluma de contaminação para DNAPL. Fonte: Fetter (2001) modificado por Silva (2006).	46
Figura 3.10. Esquema de barreira reativa permeável (LOURENÇO, 2006).	60
Figura 4.1. Fluxograma com as etapas da pesquisa.	69
Figura 4.2. Malha de pontos adotada para cálculo do erro RMS.	72
Figura 4.3. Ficha de campo detalhada (frente).	74
Figura 4.4. Ficha de campo detalhada (verso).	75
Figura 4.5. Ficha de campo para pontos de controle.	76
Figura 4.6. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade de recursos hídricos subterrâneos. Traduzido de Foster et al. (2006) por Tavares et al. (2009).	79

Figura 4.7. Esquema de aplicação do método GOD.....	80
Figura 5.1. Localização da Área de Estudos.....	85
Figura 5.2. Províncias estruturais do Brasil (CPRM, 2003).	87
Figura 5.3. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná Milani (2004).	88
Figura 5.4. Principais estruturas, falhas e lineamentos na Bacia do Paraná com o contorno estrutural (em metros): 1. Falha de Jacutinga. 2. Lineamento Tietê. 3. Lineamento Paranapanema. 4. Falha de Guapiara. 5. Falha Santo Anastácio. 6. Lineamento Barra Bonita - Itu. 7. Falha São Jerônimo - Curiúva. 8. Falha Rio Alonzo. 9. Falha Cândido de Abreu - Campo Mourão. 10. Zona de Falha Lancinha - Cubatão. 11. Zona de Falha Blumenau - Soledade. 12. Arco de Ponta Grossa. 13. Zona de Cisalhamento Transbrasiliano. 14. Zona de Cisalhamento Ribeira. Araújo et al. (2006). 89	89
Figura 5.5. Mapas com unidades geológicas de diferentes autores dentro do limite da área de estudos do presente projeto.	90
Figura 5.6. Pluviograma mensal contendo os valores em milímetros das chuvas de 1959 a 2004 (SIGRH, 2011).	96
Figura 5.7. MDT com fotos aéreas georreferenciadas, área urbana e postos de combustíveis identificados como contaminados e não contaminados. Localização e estado de contaminação dos postos compilados de CETESB (2010) e Hamamoto (2010a,b).	99
Figura 6.1. Fotos de grãos lavados com defloculante da Fm. Botucatu na lupa.....	103
Figura 6.2. Afloramento da Fm. Botucatu (Ponto 187 - Coordenadas: X - 202.379, Y - 7.556.939.....	104
Figura 6.3. Análise granulométrica conjunta de uma amostra do compartimento Botucatu.	105
Figura 6.4. Fotos de grãos lavados com defloculante da Fm. Serra Geral na lupa.....	109
Figura 6.5. Afloramento da Fm. Serra Geral (Ponto 126 - Coordenadas: X - 202.533, Y - 7.561.799.....	110
Figura 6.6. Afloramento da Fm. Serra Geral (Ponto 150 - Coordenadas: X - 198.536, Y - 7.560.855.....	111
Figura 6.7. Análise granulométrica conjunta de uma amostra do compartimento Serra Geral.....	112
Figura 6.8. Amostras lavadas com defloculante da porção basal da Fm. Itaquerí, vista em lupa.....	115

Figura 6.9. Amostras lavadas com defloculante da porção superior da Fm. Itaquerí, vista em lupa.....	116
Figura 6.10. Amostras lavadas com defloculante da porção superior da Fm. Itaquerí, vista em lupa.....	116
Figura 6.11. Feição característica da Fm. Itaqueri na área de estudos (afloramento da Fm. Itaqueri - Ponto 99 - Coordenadas: X - 158.157, Y - 7.564.882).	117
Figura 6.12. Análise granulométrica da porção basal da Fm. Itaqueri.	118
Figura 6.13. Curva granulométrica da amostra 06.....	119
Figura 6.14. Curva granulométrica da amostra 07.....	120
Figura 6.15. Areias de aluvião lavadas com defloculante representando o compartimento Aluvial.....	125
Figura 6.16. Afloramento de Aluvião foto no córrego Monjolinho (Ponto 285 - Coordenadas: X - 200.175, Y - 7.563.614).....	126
Figura 6.17. Curva granulométrica determinada no compartimento Aluvionar.....	127
Figura 6.18. Amostra de leque coluvial lavada com defloculante representando o compartimento Coluvionar.	130
Figura 6.19. Afloramento de Colúvio (Ponto de Amostragem P08 - Coordenadas: X - 198.673, Y - 7.560.137.	131
Figura 6.20. Curva granulométrica determinada no compartimento Coluvionar.....	131
Figura 6.21. Extrato da Análise de Vulnerabilidade, destacando áreas Vulnerabilidade Insignificante e Baixa.	134
Figura 6.22. Extrato da Análise de Vulnerabilidade (áreas Alta e Extrema).....	137
Figura 6.23. Fotos aéreas da área de estudos e postos de combustíveis classificados de acordo com sua vulnerabilidade frente a contaminação de recursos hídricos superficiais.	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Informações fundamentais para o planejamento com atributos do meio físico relacionados. Fonte: Pejon 1992 e Pejon e Zuquette, 1995.	23
Tabela 3.2. Fatores condicionantes do processo erosivo. FENDRICH et al. (1997) apud PONS (2006).	32
Tabela 3.3. Critérios de identificação de solos colapáveis. Fonte: Vilar et al, (1981).	42
Tabela 3.4. Classes de declividade associadas à tendência à erosão e movimentos de massa. Adaptação da compilação de informações apresentadas por Veneziani et al. (1998), Oliveira et al. (2006) e Santos et al. (2007).	43
Tabela 3.5. Tabela síntese de classificação dos HPAs quanto a sua carcinogenicidade (IARC), carcinogenicidade e ocorrência (EPA) e periculosidade (ABNT). Fonte: Sisno et al. (2003).	48
Tabela 3.6. Causas de vazamentos em tanques de aço e tubulações (MORRISON, 2000).	57
Tabela 4.1. Materiais utilizados na pesquisa.	67
Tabela 6.1. Índices físicos determinados em uma amostra do compartimento Botucatu.	105
Tabela 6.2. Análises granulométricas da Fm. Botucatu Aguiar (1989).	106
Tabela 6.3. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Botucatu Aguiar (1989).	106
Tabela 6.4. Índices físicos de uma amostra da Fm. Serra Geral.	112
Tabela 6.5. Análises granulométricas da Fm. Serra Geral Aguiar (1989).	113
Tabela 6.6. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Serra Geral Aguiar (1989). ...	113
Tabela 6.7. Índices Físicos da amostra 05.	117
Tabela 6.8. Índices físicos da amostra 06.	119
Tabela 6.9. Índices físicos da amostra 07.	120
Tabela 6.10. Análises Granulométricas da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).	121
Tabela 6.11. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).	122
Tabela 6.12. Índices físicos do compartimento Aluvionar.	127

Tabela 6.13. Análise granulométrica no compartimento Aluvionar (Aguiar 1989).....	128
Tabela 6.14. Índices físicos e limites de Attemberg de amostras do compartimento Aluvionar (Aguiar 1989).....	128
Tabela 6.15. Índices físicos do compartimento Coluvionar.	130
Tabela 6.16. Pontos representativos das unidades definidas pelo método GOD, os pontos constam da figura 6.1.....	133
Tabela 6.17. Pontos representativos das unidades definidas pelo método GOD, os pontos constam da figura 6.21.....	135
Tabela 6.18. Pontos representativos das unidades definidas pelo método.	136
Tabela 6.19. Tabela mostrando os postos de combustíveis e a análise de vulnerabilidade de cada um frente a uma possível contaminação dos recursos hídricos superficiais.....	139
Tabela 6.20. Informações básicas sobre os postos de combustíveis para avaliação das tendências que podem condicionar a deflagração da contaminação em postos de combustíveis.	143
Tabela 6.21. Quadro geral para avaliação das tendências que podem condicionar a deflagração da contaminação em postos de combustíveis.....	143

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
API	Instituto Americano de Petróleo.
ANP	Agência Nacional do Petróleo.
APP	Área de Preservação Permanente.
AVI	Índice de Vulnerabilidade do Aquífero.
ARDA	Sistema de Geoinformação do Inventário de terras do Canadá.
BD	Banco de Dados.
BTEX	Benzeno, Tolúeno, Etilbenzeno e Xilenos.
CATI	Coordenadoria de Assistência Técnica Integral.
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral.
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CTC	Capacidade de Troca Catiônica.
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio.
DNAPL	Fase não aquosa líquida pesada.
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral.
DPRN	Divisão de Proteção de Recursos Naturais.
DQO	Demanda Química de Oxigênio.
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos.
EUA	Estados Unidos da América.
EPA	Agência de Proteção Ambiental.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo.
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GOD	Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table.
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos.
HRB	Highway Research Board.
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas.

IAEG	International Association of Engineering Geology and Environmental.
IARC	Agência Internacional para Pesquisa do Cancer.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IG	Instituto Geológico.
IGC	Instituto de Geografia e Cartografia.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológica.
LNAPL	Fase líquida não aquosa leve.
MDT	Modelo Digital de Terreno.
MINEROPAR	Serviço Geológico do Paraná.
NA	Nível d'água.
NAPL	Fase líquida não aquosa.
NBR	Denominação de norma.
NHRI	National Hydrology Research Institute.
POPs	Poluentes Orgânicos Persistentes.
PUCE	Patter Unit Component Evaluation.
RMS	Root Mean Square.
RPPN	Reserva de Patrimônio Particular Natural.
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto.
SAS	Sistema de Armazenamento Subterrâneo.
SASC	Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis.
SIG	Sistema de Informações Geográficas.
SP	São Paulo.
SPT	Standart Penetration Test.
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
UGRHI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
UNESP	Universidade Estadual Paulista.
UTM	Universal Transversa de Mercator.
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.
USP	Universidade de São Paulo.
UTM	Universo Transverso de Mercator.
ZERMOS	Zonas Expostas aos Riscos de Movimentos de Solos.

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Peso específico
$W_{(m\acute{e}dia)}$	Umidade
ρ_d	Peso específico seco
ρ_s	Peso específico dos sólidos
e	Índice de vazios
N	Porosidade
S_r	Grau de saturação
S_{rn}	Grau de saturação natural
IP	Índice de plasticidade
LP	Limite de plasticidade
K	Coefficiente de identificação de solos colapsíveis
w	Teor de umidade natural
e_l	Índice de vazios no limite de liquidez
e_n	Índice de vazios natural
$\%$	Porcentagem
P	Probabilidade
V	Vulnerabilidade
Km	Quilometro
m	Metro
mm	Milímetro
in	Polegada
mV	Micro volt

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	5
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
3.1	Análise de Vulnerabilidade em Recursos Hídricos.....	7
3.1.1	Aspectos Gerais	7
3.1.2	Análise de Vulnerabilidade Intrínseca em Recursos Hídricos.....	12
3.1.3	Consequências de vazamentos em postos de combustíveis.....	14
3.2	Caracterização Geológico-Geotécnica	15
3.2.1	Mapeamento Geológico-Geotécnico	16
3.2.2	Métodos de Maior Relevância para a Pesquisa.....	22
3.2.2.1	Metodologia Proposta pela EESC/USP.....	22
3.2.2.2	Metodologia Proposta pela UNESP de Rio Claro.....	25
3.2.3	Outras Metodologias de Destaque no Cenário Nacional	26
3.3	Processos Relacionados ao Meio Físico.....	29
3.3.1	Erosão Hídrica	30
3.3.2	Movimentos de Massa	34
3.3.3	Assoreamento.....	37
3.3.4	Inundação	39
3.3.5	Subsídências e Colapsos	40
3.3.6	Influência da Declividade	42
3.4	Derivados de Hidrocarbonetos como Poluentes.....	43
3.4.1	Percolação de Derivados de Hidrocarbonetos no Meio Físico	49
3.4.2	Fenômenos de Transporte Associados.....	50
3.4.3	Propriedades Físico-Químicas	52

3.4.4	Indicadores de Campo Para a Contaminação.....	54
3.4.5	Sistema de Armazenamento Subterrâneo (SAS)	55
3.4.6	Processos Corrosivos em Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis.....	56
3.4.7	Principais Métodos de Remediação	59
3.5	Legislação Relacionada.....	62
3.5.1	Quanto à Análise de Vulnerabilidade e Recursos Hídricos	62
3.5.2	Quanto ao Poluente	63
3.6	Utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	64
4.	MATERIAIS, MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA	67
4.1	Materiais.....	67
4.2	Métodos e Etapas da Pesquisa.....	68
4.2.1	Planejamento.....	69
4.2.2	Aquisição de Dados (Secundários e Primários).....	70
4.2.3	Avaliação e Compilação de Dados	70
4.2.4	Preparação da Base (Geração do Modelo Digital do Terreno (MDT) e Calculo do Erro RMS)	71
4.2.5	Preparação da Base (Foto Interpretação).....	72
4.2.6	Etapas de Campo.....	73
4.2.7	Análises Laboratoriais	77
4.2.8	Integração em SIG	77
4.2.9	Definição e Caracterização das Unidades Geológico-Geotécnicas	77
4.2.10	Análise de Vulnerabilidade Utilizando o Método GOD.....	78
4.2.11	Análise dos Condicionantes Geotécnicos à Deflagração da Contaminação	81
4.2.12	Análise da Vulnerabilidade versus Condicionantes Geotécnicos.....	81
4.2.13	Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Superficiais.....	82
5.	ÁREA DE ESTUDO.....	85

5.1	Localização e Vias de Acesso	85
5.2	Meio Físico.....	86
5.2.1	Geologia Regional e Local.....	86
5.2.2	Materiais Inconsolidados e Perfis de Alteração.....	93
5.2.3	Geomorfologia	95
5.3	Clima	95
5.4	Recursos Hídricos	96
5.5	Meio Socioeconômico.....	97
5.6	Problemas Geoambientais	98
5.7	Focos de Poluição (Postos de Combustíveis) em São Carlos (SP).....	98
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
6.1	Compartimentação Geológico-Geotécnico	101
6.1.1	Compartimento Botucatu.....	103
6.1.2	Compartimento Serra Geral	108
6.1.3	Compartimento Itaqueri	115
6.1.4	Compartimento Aluvial	125
6.1.5	Compartimento Coluvionar	129
6.2	Análise de Vulnerabilidade Utilizando o Método GOD	132
6.2.1	Classes de Vulnerabilidade Insignificante e Baixa.....	133
6.2.2	Classe de Vulnerabilidade Média	135
6.2.3	Classes de Vulnerabilidade Alta a Extrema.....	136
6.3	Análise Simplificada da Vulnerabilidade de Contaminação das Águas Superficiais	138
6.3.1	Análise dos Possíveis Condicionantes Geotécnicos à Deflagração da Contaminação em Postos de Combustíveis na Área de Estudos	142
6.4	Discussão: Vulnerabilidade Versus Condicionantes Geotécnicos nos Compartimentos.....	145
6.5.1.	Compartimento Botucatu	145

6.5.2. Compartimento Serra Geral	146
6.5.3. Compartimento Itaqueri	147
6.5.4. Compartimento Aluvionar	148
6.5.5. Compartimento Coluvionar	149
7. CONCLUSÕES	151
7.1 Sugestões para Continuidade da Pesquisa	152
REFERÊNCIAS.....	155

Anexo 1 - Base Cartográfica

Apêndice 1 - Mapa de Documentação

Apêndice 2 - Fotos Aéreas Georreferenciadas com Modelo Hilshade (10x)

Apêndice 3 - Mapa de Compartimentos Litológicos

Apêndice 4 - Mapa de Materiais Inconsolidados

Apêndice 5 - Mapa Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas

Apêndice 6 - Mapa do Topo do Freático

Apêndice 7 - Mapa de Distância das Drenagens

1. INTRODUÇÃO

Devido à intensa utilização de combustíveis derivados de petróleo e/ou bicompostíveis na sociedade moderna, o tema abordado nesta dissertação se faz de elevada importância. Inicialmente, se observam os dados apresentados pela ANP (2009), onde é possível verificar que a capacidade total de armazenamento, para a distribuição nacional de combustível automotivo em 2008 era de 2.847.557 m³ para derivados do petróleo, exceto GLP que era de 134.160 m³ e a capacidade de armazenamento de álcool igual a 612.321 m³.

Estes volumes são armazenados e distribuídos por 508 bases espalhadas pelo território nacional, sendo que 208 estão situadas na região Sudeste. A partir destas bases o combustível é levado para postos, onde é armazenado em menor quantidade utilizando tanques e posteriormente distribuído para o consumidor final.

Este ramo da economia está em constante aceleração, principalmente pela popularização de automóveis devido às facilidades de aquisição. Como consequência do aquecimento deste setor econômico, temos alguns problemas, sendo comum o vazamento destes combustíveis, que pode ocorrer em diversas fases, onde podemos citar:

- a)* Durante processos de refino provenientes da matéria prima extraída a partir do petróleo;
- b)* No transporte por dutos ou caminhões;
- c)* Na estocagem antes da venda e transporte, ou pode ocorrer quando armazenado para a venda final ao consumidor em postos de combustíveis.

Ocorrendo o vazamento, por consequência ocorre a contaminação das águas superficiais (rios, lagos e/ou mares) ou das águas subterrâneas (aquíferos), comprometendo a qualidade de reservatórios de água que a sociedade comumente utiliza para diversos fins. Podemos citar as fontes de abastecimento, utilização agrícola e industrial. De acordo com a CETESB (2010a) foram identificadas 2.904 áreas contaminadas no estado de São Paulo, de origens variadas, aproximadamente 78,5% destas áreas correspondem a postos de combustíveis com vazamentos.

No município de São Carlos (SP) de acordo com a CETESB (2010b), existem quatorze postos de combustíveis com vazamentos. Onde, aproximadamente 50% da água captada para abastecimento da cidade de São Carlos (SP) provem de lençóis freáticos segundo a SAAE – São Carlos. Desta forma o vazamento que ocorre nestes postos de combustíveis é um fato preocupante. Quando observamos a NBR 10.004: ABNT (2004), que trata de diversas substâncias presentes em combustíveis (benzeno, tolueno, xileno, pireno e etilbenzeno) que são armazenados em postos de combustíveis, classificando-as como resíduos classe I (perigosos), causando diversos inconvenientes onde podemos destacar:

a) Risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;

b) Riscos ao meio ambiente, devido ao gerenciamento de forma inadequada.

A área deste estudo abrange a região urbana de São Carlos (SP), compreendendo o perímetro urbano da cidade e uma parte da área de expansão urbana.

O município de São Carlos (SP), possui cerca de 220 mil habitantes IBGE (2011), dessa forma uma quantidade considerável de moradores do município, dependem das águas subterrâneas e superficiais. A análise da bibliografia referente ao meio físico na região revela a presença do aquífero guarani, constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, sendo este um dos aquíferos mais importantes do planeta.

Não podemos negar o papel fundamental da água no desenvolvimento socioeconômico de diversos países, neste sentido, identificamos uma situação que merece crescente preocupação, que é garantir o abastecimento de forma econômica e segura de água potável nos meios urbano e rural, sem comprometer a oferta e qualidade de tais recursos hídricos (TAVARES et al. 2009). Dentro deste contexto o mesmo autor ressalta que, as fontes de água subterrânea se mostram com importância estratégica, uma vez que oferece uma alternativa de suprimento de qualidade a relativo baixo custo.

Devido a vazamentos identificados em postos de combustível. Em função do potencial hídrico da área (subterrâneo e superficial) e do processo de captação de águas atual para o abastecimento urbano. É de vital importância compreender primeiramente qual a disposição espacial dos materiais de natureza geológica (litologia e solos) e quais as suas características

geotécnicas onde os focos de contaminação estão implantados, permitindo uma avaliação prévia sobre os condicionantes do meio físico que podem induzir a vazamentos.

Posteriormente avaliar onde são os focos de contaminação e qual o índice de vulnerabilidade associada aos compartimentos do meio físico, frente a está contaminação que podem causar prejuízos aos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Neste sentido o levantamento de atributos geotécnicos como a litologia, solos, e a caracterização destes compartimentos juntamente com o topo do lençol freático, trás os parâmetros necessários para avaliar o papel dos condicionantes geológico-geotécnicos que podem induzir a uma contaminação dos recursos hídricos. O cruzamento desta análise com a vulnerabilidade se faz uma importante ferramenta para o planejamento de novas instalações.

Sendo este um tema atual de grande importância social e econômica, podemos ainda por meio dos resultados da pesquisa, fornecer subsídios para que, no município, novos empreendimentos com potencialidade poluidora possam ser implantados. Direcionando-os para locais onde os compartimentos geotécnicos ofereçam menor vulnerabilidade.

Nesta pesquisa foram gerados mapas apresentados em sete apêndices e um anexo:

- ✓ Anexo 1 - Base Cartográfica
- ✓ Apêndice 1 - Mapa de Documentação
- ✓ Apêndice 2 - Fotos Aéreas Georreferenciadas com Modelo Hilshade (10x)
- ✓ Apêndice 3 - Mapa de Compartimentos Litológicos
- ✓ Apêndice 4 - Mapa de Materiais Inconsolidados
- ✓ Apêndice 5 - Mapa Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas
- ✓ Apêndice 6 - Mapa do Topo do Freático
- ✓ Apêndice 7 - Mapa de Distância das Drenagens

Os mapas foram gerados em escala de levantamento 1:10.000 e apresentados em escala 1:25.000, sintetizando de forma cartográfica os resultados e dados obtidos na pesquisa, facilitando a compreensão e a análise dos dados.

2. OBJETIVOS

Realizar a análise de vulnerabilidade de recursos hídricos na região urbana de São Carlos (SP) utilizando o método GOD (Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table) em ambiente SIG, com o software ArcGIS 9.3.

Realizar uma caracterização geológico-geotécnica, na área de estudos, direcionada principalmente a um mapeamento litológico e de solos (utilizado no método GOD), na escala 1:25.000, caracterizando as unidades geológicas conforme parâmetros geotécnicos.

Caracterizar o meio físico com observações de campo; ensaios laboratoriais; levantamentos de subsuperfície (focando na obtenção da superfície freática) e parâmetros geotécnicos das unidades litológicas e de solos, com ênfase em mecânica dos solos. Em ambos os casos utilizando dados diretos (primários) e indiretos (secundários).

Analisar as classes de índice de vulnerabilidade geradas pelo método GOD. Analisar os dados frente à contaminação derivada de postos de combustíveis. Analisar as unidades litológicas e de solos tendo como foco a determinação de condicionantes geológico-geotécnicos, discutindo as características de cada unidade e sua influência no processo de contaminação.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Wainer (2007), uma pesquisa pode ser definida como uma sequência de atividades, permitindo reunir informações relacionadas a um tema e proceder com uma análise por meio de um método científico, obtendo conhecimento sobre este tema. Este tópico é desenvolvido, tendo como base a revisão bibliográfica de temas específicos, que fundamentam teoricamente a pesquisa, destacando:

- a)* Análise de Vulnerabilidade em Recursos Hídricos;
- b)* Caracterização Geológico-Geotécnica;
- c)* Processos relacionados ao meio físico;
- d)* Derivados de hidrocarbonetos como poluentes;
- e)* Legislação Relacionada;
- f)* Sistema de Informação Geográfica.

A revisão bibliográfica utilizada para a finalidade proposta acima foi dirigida, com o intuito de explorar trabalhos relevantes e avaliar o tema pesquisado de modo rigoroso, permitindo uma compilação de forma adequada, como sugerido por Kitchenham (2007).

Desta forma desenvolvendo a pesquisa de mestrado tendo como base, conceitos extraídos de uma bibliografia consistente, procurando manter uma base consagrada no cenário técnico científico, fornecendo critérios para a elaboração das etapas de planejamento, execução e interpretação dos produtos gerados.

3.1 Análise de Vulnerabilidade em Recursos Hídricos

3.1.1 Aspectos Gerais

A análise de vulnerabilidade internacionalmente está inserida dentro do contexto da análise de risco, considerada por diversos autores que fazem uso desta ferramenta na área de recursos hídricos, como uma parcela do cálculo do risco. Sendo a análise de risco uma análise

mais complexa, levando em conta a probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente poluidor e as consequências que este pode causar Goldscheider et al. (2000), Zawren (2003), Mimi e Assi (2009).

Para uma contextualização e compreensão desta ferramenta de análise, o tópico se dispõe a apresentar uma visão geral sobre o tema, abordando os principais conceitos que estão neste meio, tanto no cenário nacional quanto internacional.

No tocante à análise de risco, podemos destacar que inicialmente no Brasil este tipo de análise foi aplicada pela CETESB, para avaliação de risco tecnológico industrial, focando na aplicação em caldeiras CETESB (1986). Segundo Augusto Filho (2001), em diversos idiomas, a palavra risco tem como significado mais amplo, a indicação de uma possibilidade, no contexto da análise e gerenciamento de riscos, ela se refere à possibilidade de perdas, danos e outras adversidades e efeitos não esperados.

Análise de risco (*risk analysis*), avaliação de risco (*risk assessment*) e gerenciamento de risco (*risk management*) são termos relativamente recentes no debate científico e público, entretanto, em certo sentido, estas análises vêm sendo praticadas ao longo da história da civilização Augusto Filho (2001). A seguir podemos observar algumas definições relacionadas a análise de risco geológico (ZUQUETTE, 1993 e OGURA, 1995 apud AUGUSTO FILHO, 2001):

Acidente (*accident*) – acontecimento calamitoso, em que foram registradas perdas sociais e econômicas (terremoto em área ocupada, por exemplo).

Evento (*event*) – acontecimento em que não foram registradas perdas sociais e econômicas (terremoto em área não ocupada, por exemplo).

Perigo (*hazard*) – ameaça potencial a pessoas ou bens (área ocupada sujeita a escorregamentos, por exemplo).

Vulnerabilidade (*vulnerability*) – gradiente de perdas sociais e econômicas potenciais de um sistema/ ocupação sujeita a acidentes. Varia de 0 (nenhuma perda) a 1 (perda total).

Risco (*risk*) – expressa o perigo em termos de danos/período de tempo, em geral, unidade monetária/ano.

De acordo com Augusto Filho (2001) o Working Group – Committee on Risk Assessment - IUGS (1997) apresentaram uma proposta de conceituação dos termos envolvidos em análise de risco (tabela 3.1), a proposta foi utilizada pelo Grupo de Estudos de escorregamentos, vinculado à União Internacional das Ciências Geológicas (International Union of Geological Sciences – USGS).

Tabela 3.1. Definição dos principais termos utilizados na análise de risco ambiental, e em particular, associados a escorregamentos (IUGS - Working Group - Committee on Risk Assessment, 1997). Traduzido por Augusto Filho (2001).

Termo	Definição
Risco (<i>risk</i>)	Uma medida da probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, propriedade ou ambiente. Risco é geralmente estimado pelo produto entre a probabilidade e as consequências. Entretanto, a interpretação mais genérica de risco envolve a comparação da probabilidade e consequências, não utilizando o produto matemático entre estes dois termos, para expressar os níveis de risco.
Processo perigoso (<i>danger</i>)	O fenômeno natural geometricamente e mecanicamente caracterizado (no caso, os fenômenos naturais seriam os diferentes tipos de escorregamentos).
Perigo (<i>hazard</i>)	Uma condição com potencial para causar uma consequência desagradável. Descrições de perigo de escorregamento, particularmente voltadas para o zoneamento, deveriam incluir as características dos escorregamentos, tais como, os volumes ou áreas dos escorregamentos e a probabilidade de ocorrência deles. Existindo valores descrevendo as velocidades absolutas e relativas dos escorregamentos. Alternativamente, o perigo é a probabilidade de um escorregamento particular ocorrer num dado período de tempo.
Elementos sob risco (<i>elements at risk</i>)	Significando a população, as edificações e as obras de engenharia, as atividades econômicas, os serviços públicos e a infraestrutura na área potencialmente afetável pelos escorregamentos.
Probabilidade (P) (<i>probability</i>)	A probabilidade de um resultado específico, medido pela razão entre o número de resultados específicos e todos os resultados possíveis. É expressa como um número entre 0 e 1, com o 0 indicando um resultado impossível, e 1 indicando que um resultado é certo.
Vulnerabilidade (V) (<i>vulnerability</i>)	O grau de perda para um dado elemento ou grupo de elementos dentro de uma área afetada por escorregamentos. Ela é expressa em uma escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Para propriedades, a perda será o valor da edificação; para pessoas, ela será a probabilidade de que uma vida seja perdida, em um determinado grupo humano que pode ser afetado pelos escorregamentos.

Continuação - Tabela 3.1. Definição dos principais termos utilizados na análise de risco ambiental, e em particular, associados a escorregamentos (IUGS Working Group - Committee on Risk Assessment, 1997). Traduzido por Augusto Filho (2001).

Termo	Definição
Análise de Risco (<i>risk analysis</i>)	O uso da informação disponível para estimar o risco para indivíduos ou populações, propriedades ou o ambiente. A análise de risco, geralmente, contém as seguintes etapas: definição do escopo; identificação do perigo; e a determinação do risco.
Avaliação de Risco (<i>risk assessment</i>)	O processo de avaliação e análise de risco.
Estimativa do Risco (<i>risk estimation</i>)	O processo para produzir uma medida do nível de risco das pessoas, das propriedades ou do ambiente que está sendo analisado. A estimativa de risco envolve as seguintes etapas: análise da frequência do acidente considerado; análise das consequências potenciais relacionadas ao acidente; e a integração entre elas.
Cálculo de Risco (<i>risk evaluation</i>)	O estágio no qual valores e julgamentos entram no processo de decisão, explicitamente ou implicitamente, pela inclusão da consideração da importância dos riscos estimados e as consequências sociais, ambientais e econômicas associadas, com o objetivo de identificar o leque de alternativas de mitigação destes riscos.
Gerenciamento de Risco (<i>risk management</i>)	O processo completo de avaliação e controle do risco.
Risco Aceitável (<i>acceptable risk</i>)	Nível de risco para o qual, para os propósitos da vida ou trabalho, nós estamos preparados para aceitá-lo como ele é, sem considerar seu gerenciamento. A sociedade geralmente não considera justificável gastos adicionais para redução destes riscos.
Risco Tolerável (<i>tolerable risk</i>)	Um risco que a sociedade está disposta a aceitar para viver com ele afim de obter certos benefícios líquidos, na confiança que este risco está sendo propriamente controlado, mantido sob inspeção e que será melhor reduzido como e quando possível.
Risco Individual (<i>individual risk</i>)	O risco de morte e/ou danos para qualquer indivíduo identificável que vive em uma zona exposta ao perigo, ou quem segue um padrão particular de vida que o submete às consequências deste perigo.
Risco Social (<i>societal risk</i>)	O risco de múltiplos danos ou mortes para toda a sociedade, um risco no qual a sociedade poderá carregar o peso de um acidente causando várias mortes, injúrias, perdas financeiras, ambientais, etc.

Na língua portuguesa a diferença entre risco (*risk*) e perigo (*hazard*) não é clara, sendo em geral considerados como sinônimos. A utilização destes dois termos em contextos

diferentes, é um caminho no sentido de tentar uma melhor adequação a uma terminologia internacional.

O mesmo autor destaca que a grande maioria das cartas de risco geológico produzidas mundialmente e em particular no Brasil, talvez devessem ser mais propriamente denominadas de cartas de perigo ou de ameaça (em espanhol, este termo também pode ser utilizado como equivalente a *hazard* na língua inglesa). Uma vez que nestes produtos, não existe a quantificação do risco em termos de danos potenciais (sociais e econômicos) por um período de tempo, mas no máximo, determinam as probabilidades relacionadas a determinados eventos e acidentes geológicos, utilizando métodos estatísticos formais ou não.

Outro aspecto importante com relação à terminologia de referência apresentada anteriormente, diz respeito ao termo vulnerabilidade. Dentro do enfoque da análise de risco, ela geralmente se refere ao elemento ou sistema sob perigo (população e estruturas), servindo como um indicador da magnitude das possíveis consequências, no caso da ocorrência do acidente.

O termo vulnerabilidade também é empregado em outro contexto nos trabalhos de avaliação ambiental, podendo expressar um nível de suscetibilidade ou fragilidade de determinado sistema natural (por exemplo, um aquífero).

No tocante a estudos em recursos hídricos destacamos os trabalhos de Zwahlen (2003) e Mimi e Assi (2009), que estudam o risco de contaminação de aquíferos cársticos. E os trabalhos brasileiros desenvolvidos na Unicamp, onde Escada (2009) aplicou o método GOD (*Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth to groundwater table*), avaliando a vulnerabilidade que empreendimentos representam às águas subterrâneas.

Como este trabalho se propõe a seguir o método GOD e avaliar a vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos, a revisão enfatiza estes conceitos.

O método GOD, consiste na caracterização por meio de índices, do grau de confinamento da água subterrânea, da ocorrência dos estratos de cobertura e do nível do lençol freático. O resultado final é obtido pela multiplicação dos índices e corresponde a um mapa geral com indicação dos níveis de vulnerabilidade da área (FOSTER e HIRATA, 1988).

3.1.2 *Análise de Vulnerabilidade Intrínseca em Recursos Hídricos*

De acordo com Zwahlen (2003) e Mimi e Assi (2009), existem diversos métodos para mapear a vulnerabilidade intrínseca relativa à contaminação de águas subterrâneas, citamos entre os mais conhecidos o método DRASTIC e o método GOD. Estes métodos são os mais aplicados tanto no Brasil, quanto em países da Europa e nos Estados Unidos da América, outros métodos interessantes são os métodos PI e o método AVI, ambos citados abaixo. Todos estes métodos são empíricos, concentrados em superposições, tendo como base condições do terreno (litologia e solos), considerando também as condições hidro geológicas da área.

O método PI (produto entre P e I), constitui uma forma mais recente de tratar o problema. Considera dois fatores, uma camada de proteção (P), que diz respeito ao nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada e condições de infiltração (I), que diz respeito á capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero. Este método pode ser aplicado a todos os tipos de aquíferos. Tem sua base metodológica fundamentada em um "caminho de origem/modelo de destino", quer dizer que o método considera o caminho por onde o contaminante migra, desde um ponto potencial de liberação até o seu "alvo" final, que seria o recurso hídrico em análise, geralmente um aquífero Zwahlen (2003).

O método AVI, proposto inicialmente por Van Stempvoort et al. (1993) *apud* Zwahlen (2003), para a National Hydrology Research Institute – NHRI do Canadá, consiste em um índice de vulnerabilidade de aquíferos, que se baseia em dois parâmetros: **i**) espessura (E_i), é a espessura da i -ésima camada sedimentar acima do nível da água (zona não saturada do solo) e **ii**) da condutividade hidráulica (K_i) estimada da i -ésima camada sedimentar e (C), é a resistência hidráulica total de cada ponto. Este índice indica a resistência ao fluxo vertical, indicando o tempo de transporte da água pela zona não saturada, focando no processo de advecção.

Segundo Zwahlen (2003), o método DRASTIC foi desenvolvido por Aller et al. (1987) em um estudo direcionado para a United States Environmental Protection Agency - USEPA, agência ambiental norte americana, possuindo algumas premissas a saber:

- a)* O contaminante entra em contato com a superfície do terreno;
- b)* A percolação do contaminante é preferencialmente vertical, atingindo o aquífero por infiltração;
- c)* O contaminante, possui as características de percolação da água;
- d)* A área mínima avaliada pelo método é de 0,4 km².

O método DRASTIC representa o somatório ponderado dos valores correspondentes a sete (7) parâmetros ou indicadores hidro geológicos:

D - Profundidade do topo do aquífero, ou seja, distância entre a superfície do solo e o nível de água, em (m);

R - Recarga do aquífero (mm/ano);

A - Composição litológica do aquífero;

S - Tipo de Solo;

T - Topografia;

I - Influência da zona não saturada;

C - Condutividade hidráulica do aquífero, em (cm/s).

No método GOD, segundo Foster e Hirata (1988) e Tavares et al. (2009) se faz uma alternativa com uma grande simplicidade conceitual e aplicabilidade, amplamente testado e apresentando resultados satisfatórios com a análise de uma quantidade de parâmetros reduzida. Porém, dando uma ótima indicação quanto à vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos. O método está incluído no âmbito da classificação dos estratos de cobertura, quando se dá ênfase à ocorrência de fraturas bem desenvolvidas que podem favorecer o fluxo preferencial, reduzindo, substancialmente, a atenuação dos contaminantes, sendo fator crucial para o aumento da vulnerabilidade.

Segundo Tavares et al. (2009) os mapas de vulnerabilidade servem apenas para avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea associado às descargas de substâncias que ocorrem na superfície do terreno em fase líquida dissolvida.

Dessa forma, fatores limitantes à utilização do método GOD correspondem à avaliação do perigo de contaminantes que são despejados abaixo do subsolo, esta situação pode ocorrer em caso de vazamentos de grandes tanques de armazenagem subterrâneos, de lixiviação de aterros de resíduos sólidos. O método é mais indicado para avaliar a vulnerabilidade de um derramamento superficial, ou próximo a camadas superficiais do terreno.

Considerando o caso de derramamento de solventes orgânicos sintéticos, podemos afirmar que o método GOD, é interessante para a análise deste tipo de contaminante. Como os tanques de armazenamento em postos de combustíveis estão muito próximos à superfície, o método é útil para a análise proposta.

3.1.3 Consequências de vazamentos em postos de combustíveis

Buscando uma melhor contextualização sobre o tema, no cenário da análise de vulnerabilidade, devem ser observadas algumas características dos poluentes em estudo, quando em contato com o ser humano. Servindo também como uma justificativa do porque estudar este poluente em específico.

No Brasil, podemos encontrar referência às consequências de vazamentos na norma técnica da ABNT, NBR 10.004 de 2.004 (Resíduos Sólidos – Classificação), onde os compostos presentes nos combustíveis podem causar: inflamabilidade, corrosividade, toxicidade, mortalidade, patogenicidade, sendo classificados como resíduos classe I.

Temos um destaque especial para os HPAs, que são os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, como apresentados anteriormente, sendo muito agressivos à saúde, causando câncer (leucemia), podendo levar a mortalidade. No caso destes compostos eles não são biodegradáveis, devido a este fator se fazem mais preocupantes no tocante à análise proposta neste trabalho.

Quanto aos hidrocarbonetos monoaromáticos (BTEX), são altamente solúveis, principalmente quando misturados com etanol. Possuem como valores máximos permitidos segundo a Portaria 1.469/2.000 do Ministério da Saúde, 5 $\mu\text{g.L}^{-1}$ para o benzeno, 170 $\mu\text{g.L}^{-1}$ para o tolueno, 200 $\mu\text{g.L}^{-1}$ para o etilbenzeno e 300 $\mu\text{g.L}^{-1}$ para o xileno.

Os BTEX são poderosos depressores do sistema nervoso central, apresentando toxicidade crônica, mesmo em pequenas concentrações (da ordem de $\mu\text{g.L}^{-1}$). São substâncias carcinogênicas (podendo causar leucemia, ou seja, câncer dos tecidos que formam os linfócitos do sangue), se ingerida, mesmo em baixas concentrações durante períodos não muito longos de tempo. Uma exposição aguda (altas concentrações em curtos períodos) por inalação ou ingestão pode causar até mesmo a morte de uma pessoa.

No caso dos BTEX, existem diversos trabalhos indicando que os compostos podem ser auto depurados pelo solo, porém a mistura com etanol baixa a eficiência do solo em auto depurar estes compostos, chegando em alguns casos a anular esta capacidade.

3.2 Caracterização Geológico-Geotécnica

Este capítulo embasa teoricamente a análise do meio físico, quanto a sua propensão natural a causar o vazamento em postos de combustíveis. Destacamos algumas técnicas tradicionais, como o mapeamento e a caracterização dos compartimentos, focando em fatores que podem deflagrar um vazamento em uma estrutura enterrada.

Dessa forma são abordados aqui os principais conceitos sobre mapeamento geológico-geotécnico, envolvendo o substrato (geologia e solos) e características geotécnicas do material. Posteriormente no próximo capítulo, são abordados os processos relacionados ao meio físico (erosão, movimentos de massa, assoreamento, inundação, subsidências e colapsos), sendo conceitos relativos a processos que podem ocorrer nas unidades básicas (litologia e solos).

3.2.1 Mapeamento Geológico-Geotécnico

O mapeamento geotécnico começou a ser implantado no Brasil em 1974, com a aplicação de uma cartografia geotécnica com base em mapeamento geológico, o trabalho foi desenvolvido por Coulon (1974). Na Escola de Engenharia de São Carlos destacamos o trabalho pioneiro realizado por Zuquette (1981), tendo como finalidade um mapeamento voltado aos estudos ambientais, utilizando como base a metodologia francesa proposta por Sanejoand (1972).

Zuquette (1987) define mapa geotécnico como sendo um produto tendo limites geológicos que fornece uma representação generalizada dos componentes relacionados ao meio físico podendo ser utilizado no planejamento e uso da terra, construção e manutenção de obras civis, mineiras, entre outros. No âmbito da aplicação desta técnica Zuquette e Gandolfi (2004), destacam diversas metodologias utilizadas na execução de um mapeamento geotécnico, sobre as quais tradicionalmente podemos citar as metodologias conhecidas como:

- a) **Francesa:** Baseada na publicação de Sanejouand (1972), onde se procede com o cruzamento de planos de informação, constituídos pela geologia, geomorfologia e informações relativas a levantamentos geotécnicos. Busca estabelecer uma classificação para cartas geotécnicas na França. O trabalho é vinculado ao estudo de diversos documentos básicos (cartas de documentação, substrato rochoso, materiais de cobertura, hidrogeologia, geomorfologia), onde por meio da interpretação destas cartas, são gerados produtos de aptidão, voltados para usos em fundações, vias de transportes, escavabilidade, materiais de construção entre outros. Os estudos são direcionados a partir da escala de levantamento, sendo as escalas de 1:50.000 à 1:100.000 utilizada para o planejamento regional, 1:25.000 à 1:10.000 para o planejamento urbano, 1:10.000 à 1:5.000 para finalidades específicas e maiores que 1:5.000 para zonas específicas. Também existe uma preocupação quanto ao conteúdo da forma, sendo divididas em cartas *analíticas* (um ou mais fatores caracterizam uma síntese parcial dos dados, podendo representar cartas hidrogeológicas, materiais inconsolidados, comportamento do

nível freático) ou *sintéticas* (delimitação de zonas homogêneas quanto ao tipo de utilização e qualidade dos solos, representando, materiais de construção, susceptibilidade a erosão, entre outros produtos cartográficos);

- b) Espanhola:** Compreende a utilização de quatro tipos de mapas geotécnicos básicos, conhecidos como de caráter *geral* (escala 1:200.000), *básico* (escala 1:25.000), *seletivo* (escala 1:5.000) e *específico* (escala 1:2.000), os mapas visam subsidiar e assessorar estudos de planejamento, fornecendo informações básicas para qualquer tipo de construção;
- c) Suíça:** Se baseia no sistema Patter Unit Component Evaluation - PUCE, tendo influência de sistemas americanos. Admite que terrenos desenvolvidos por um mesmo grupo de eventos e sob condições climáticas similares podem apresentar propriedades geotécnicas e comportamentos semelhantes. O método leva em conta fatores como os processos de formação geológica, ambientes geológicos, variações eustáticas e isostáticas, topografia, formas do terreno, hidrografia, vegetação, uso da terra e levantamentos geotécnicos;
- d) Grã Bretanha:** Possui como finalidade auxiliar no planejamento territorial e reconhecimento de áreas, os dados são obtidos de maneira generalizada, podendo ser dados relativos ao comportamento de rochas e solos quanto à estabilidade de taludes, características de escavação, tipos de materiais, dados sobre águas superficiais e subterrâneas, profundidade do substrato rochoso, entre outros. Estas cartas geológicas para a engenharia predominam nas obras civis e são realizadas para três níveis (reconhecimento, investigação local e estágio construtivo);
- e) Antiga união soviética:** Foi produzido um significativo número de mapas geotécnicos em escalas variadas, desde mapeamentos mais gerais até escalas de maior detalhe, os mapas são constituídos baseados em características geológicas, estruturais, geomorfológicas, podendo fornecer informações sobre processos do meio físico. Também fornecem informações sobre os materiais de construção presentes na área. Além disso, devem refletir as condições hídricas da área,

superficiais e subterrâneas, situando e correlacionando-os de forma geral no contexto geológico, contemplando as inter-relações entre os fatores;

- f) Mathewson e Font:* Metodologia desenvolvida pelos autores americanos citados. O método se propõe a gerar mapas geotécnicos em quatro ordens. Sendo os de 1ª ordem mapas de observação (topográfico, litológico, geológico, tectônico, solos, drenagem superficial. Os de 2ª ordem (capacidade de infiltração, recursos de engenharia, estabilidade de taludes, qualidade da rocha, qualidade do solo, classificação do solo, resistência à compressão simples), ambos os produtos cartográficos de 1ª e 2ª ordem, são voltados a usuários técnicos. Por outro lado os mapas de 3ª ordem (adequação para instabilidades subterrâneas, adequação para estrada pesada e para depósitos de rejeitos) são voltados para o público em geral. E os mapas de 4ª ordem (geologia de engenharia e uso do solo com recomendações) são voltados para prefeituras e empresas direcionados a um planejamento específico;
- g) Kiefer:* Compreende trabalhos executados na região de Fringe (EUA), consistindo de uma análise sistemática do terreno, visando orientar a ocupação do solo, principalmente focando em fins residenciais, são elaborados mapas que servirão para ordenar o desenvolvimento de áreas em terrenos residenciais, industriais e outros, sendo denominados mapas de adequação;
- h) GASP (Geotechnical Area Studies Programme):* A metodologia foi proposta na região de Hong Kong (China), podendo ser aplicada em estudos regionais (escala 1:20.000), estudos distritais estágio 1 (1:2.500), estudos distritais estágio 2 (avaliações mais detalhadas do que no estágio anterior). O mapa de classificação do terreno costuma ser baseado em grupos de atributos (declividade, componentes dos terrenos, caracterização das encostas e hidrologia), o mapa é apresentado, utilizando uma simbologia alfa numérica. Os mapas interpretativos podem ser obtidos a partir de combinações de atributos específicos, direcionados para os interesses em questão. O documento final mais comum é o mapa de uso geotécnico do terreno que define e classifica as unidades de terreno em classes quanto às possibilidades de ocupação;

- i) PUCE (*Patter Unit Component Evaluation*):** A compartimentação do meio físico é realizada principalmente por meio das características geológicas/geomorfológicas, uso do solo e características geotécnicas, tendo em vista a escala de estudo adotada. Tem sua aplicação voltada a estudos de viabilidade e planejamento;
- j) IAEG (*International Association of Engineering Geology and Environmental*):** Tem como base principalmente o caráter de rochas e solos, condições hidrogeológicas e geomorfológicas, cruzando com processos geodinâmicos. Os mapas gerados possuem finalidades distintas, podendo apresentar uma finalidade *especial* ou *multifinalidades*, também variam em conteúdo, podendo ser *analítico* ou *compreensivo*, pode ter escalas variadas subdividas em *grandes* (1:10.000 ou maior para finalidades específicas), *médias* (1:10.000 à 1:100.000 voltado ao planejamento regional), *pequenas* (1:100.000 ou menores, para mapeamentos de grandes áreas). A litogênese também é considerada, apresentando os tipos: *geologia de engenharia* (uniformiza características litológicas, no estado de alteração), *litológico* (prevê heterogenidade quanto à alteração e a homogeneidade em termos de estruturas, textura e composição), *complexo litológico* (diversos tipos litológicos), *suíte litológica* (diversos complexos litológicos);
- k) Sistema ARDA (*Sistema de Geoinformação do Inventário de terras do Canadá*):** Trata-se da classificação das terras quanto à capacidade de uso e aptidão para várias atividades, são oito categorias padronizadas que variam desde “boa capacidade” até “incapacidade”, para cada objetivo considerado. É possível também verificar a capacidade do solo para a agricultura, reflorestamento, recreação e capacidade do terreno voltada para a vida silvestre. Os dados geoambientais também são registrados, junto com fatores sócio econômicos, e sua finalidade básica é fornecer um produto cartográfico nas escalas entre 1:50.000 e 1:250.000;
- l) Sistemática de Ontário, Canadá:** Está metodologia foi desenvolvida visando duas finalidades, a primeira de *caráter básico* que visa a seleção de áreas para

implantação de aterro sanitário, que leva em conta a topografia, enfatizando formas da superfície, se possível em uma abordagem tridimensional, substrato rochoso e materiais de cobertura, também leva em conta o sistema de drenagem, cortes estratigráficos e os registros relativos às águas subterrâneas. A finalidade *multifunção regional*, leva em conta fatores como formas do terreno, considerando as origens e variações das geoformas, tipos de materiais, topografia e drenagem;

m) Mapas de solos para fins de engenharia: A metodologia foi desenvolvida para a região de Nova Jérsei (EUA), visando o planejamento inicial e reconhecimento para a locação e relocação de alinhamentos de estrada e outras obras longitudinais, planejamento dos trabalhos em solos para projetos específicos, investigações de superfície para fundações, planejamento inicial de aeroportos, mapas de inventário e registro de materiais para construção, planejamento de áreas urbanizadas e como mapa base para estudos de viabilidade de pavimentos. O método contempla aquisição bibliográfica de dados, aquisição de dados em campo, amostragem, ensaios de laboratório, interpretação e correlação dos dados obtidos;

n) Cartas ZERMOS (Zonas Expostas aos Riscos de Movimentos de Solos): Aplicada inicialmente na França no início de 1972, objetivando fornecer a probabilidade de movimentos de massa ou instabilidades, apresentando um zoneamento graduado do risco sem previsão de tempo. Os produtos cartográficos contemplam três fases de trabalho, sendo a primeira relativa a levantamento bibliográfico focando a existência de movimentos nos terrenos da região estudada, assim como suas frequências e amplitudes. A segunda fase compreende um estudo geomorfológico, por meio de fotointerpretação e a terceira um levantamento de campo, focando fatores permanentes e temporais relativos à dinâmica de escorregamentos, em escala igual a 1:50.000 ou maiores;

o) Sistemática Bottino: Aplicada na região de Turim (Itália), compreende a hierarquização de cinco ordens de documentos (cartas geotécnicas de base, cartas temáticas primárias, cartas temáticas de integração, cartas temáticas de síntese de setor e cartas de síntese geral). A metodologia objetiva fornecer dados principalmente em campos de atuação que envolvem estabilidade do terreno,

recursos para agricultura, recursos hídricos, recursos de energia e recursos lítominais.

Entre as metodologias aplicadas no Brasil temos como principais trabalhos os desenvolvidos na EESC/USP, UNESP (Rio Claro/SP) e IPT, que serão melhores detalhadas no sub tópico 3.1.2.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004) no Brasil também são desenvolvidos mapeamentos geotécnicos com alguns aspectos e procedimentos metodológicos próprios, onde podemos citar o grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Instituto Geológico (IG); Mineropar; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e nas universidades federais do Paraná, Pernambuco e Alagoas, tais procedimentos não serão detalhados no presente trabalho.

Como produtos cartográficos de natureza geotécnica os mesmos autores citados acima, também destacam a utilização das terminologias *mapa* e *carta*. Caracterizando a aplicação dos documentos em diversas finalidades (obras civis, planejamento urbano, territorial e ambiental, desenvolvimento, conservação e gestão do ambiente, avaliação de eventos perigosos e riscos associados), reunindo informações pertinentes a um ou mais aspectos do meio (físico, biótico e antrópico).

Estes autores consideram o produto cartográfico denominado como *mapa* representativo de um registro de dados, que são obtidos representando um determinado aspecto do ambiente em estudo, sem interpretação. O termo *carta* para os autores supracitados constitui um documento cartográfico com representação das informações direcionadas para uma finalidade, ou seja, contendo interpretações e associações dos dados contidos em mapas.

Neste contexto um mapa geotécnico é definido como: “*produto tendo limites geológicos que fornece uma representação generalizada dos componentes inerentes ao meio físico podendo ser utilizado no planejamento e uso da terra, construção e manutenção de obras civis, mineiras, entre outros*” (IAEG, apud ZUQUETTE, 1987).

3.2.2 Métodos de Maior Relevância para a Pesquisa

As metodologias nacionais aplicadas na EESC-USP e na Unesp – Rio Claro, se fazem relevantes para a presente pesquisa, devido sua estrutura metodológica, possuem aspectos passíveis de serem integrados e direcionados para uma finalidade específica, podendo ser remodelados conforme o foco da pesquisa, por esta razão serão detalhadas a seguir.

3.2.2.1 Metodologia Proposta pela EESC/USP

Zuquette e Gandolfi (2004) destacam que o princípio básico da metodologia adotada pela EESC/USP, que contempla desde a obtenção dos atributos do meio físico até a elaboração de cartas específicas para usuários. Originalmente a metodologia foi proposta por Zuquette (1987) e Zuquette (1993), consolidada por aplicações em trabalhos posteriores no departamento de Geotecnia da EESC-USP.

A metodologia trás como conceito fundamental a definição de atributo, tratando se de um elemento básico cuja finalidade é ser operado em um documento cartográfico como informação que representa parte dos constituintes do meio (litologia, declividade, textura de materiais inconsolidados, escoamento superficial, uso do solo, entre outros).

Segundo apresentado por Zuquette (1993), quando são utilizadas as informações obtidas sobre o meio físico em forma de atributos, devem seguir a sequência básica:

- 1) Geomorfologia;
- 2) Substrato rochoso;
- 3) Materiais inconsolidados;
- 4) Definição preliminar dos arranjos tridimensionais;
- 5) Águas superficiais;
- 6) Águas subterrâneas;
- 7) Definição final dos arranjos tridimensionais;
- 8) Amostragem;

- 9) Ensaios;
 10) Definição das unidades geotécnicas.

O mesmo autor, com base em sua pesquisa, indica que o meio físico deve ser analisado sob o conceito de *landforms* (elementos do meio que possuem composição litológica e variações das características visuais e físicas definidas como: forma topográfica, modelo e morfologia de drenagem).

Pejon (1992) e Pejon e Zuquette (1995) apresentam uma síntese contendo informações fundamentais em caráter geral para o planejamento do meio físico, tendo como base o mapeamento geotécnico, a partir de uma integração de diversos campos do conhecimento.

Considerando seus tipos, aspectos, grupos de atributos e atributos específicos, a compilação destas informações pode ser observada na Tabela 3.1, apresentada por Pejon (1992) e Zuquette (1995). Os autores ressaltam que os atributos são estruturas dentro de uma organização hierárquica, sugerindo que devem ser definidos de acordo com a finalidade e escala de trabalho, dependendo da correta definição a qualidade e eficiência do mapeamento proposto.

Tabela 3.1. Informações fundamentais para o planejamento com atributos do meio físico relacionados. Fonte: Pejon 1992 e Pejon e Zuquette, 1995.

Campos de Conhecimento	Tipo/Aspecto	Grupos de Atributos	Atributos
Águas	Superficiais		*1. escoamento *2. infiltração 3. áreas de acúmulo de água 4. características físico-químicas
	Subterrâneas		5. aquíferos (livres e confinados) 6. áreas de recarga 7. profundidade/espessura/ poços/senilidade
Geomorfologia	Morfometria	Unidades básicas	9. altitudes 10. declividade e sentido
	Morfografia		*11. landforms (encosta, bacia) *12. formas de encostas *13. comprimentos das encostas ou landforms

Continuação - Tabela 3.1. Informações fundamentais para o planejamento com atributos do meio físico relacionados. Fonte: Pejon 1992 e Pejon e Zuquette, 1995.

Campos de Conhecimento	Tipo/Aspecto	Grupos de Atributos	Atributos
Geologia	Substrato Rochoso	Materiais	*14. tipo rochoso *15. litologia 16. mineralogia 17. densidade 18. resistência 19. permeabilidade 20. estruturas 21. distribuição 22. profundidade *23. grau de intemperismo *24. alterabilidade 25. potencial p/ material de
		Processos	26. erosão 27. deposição 28. sismicidade 29. subsidência
	Materiais Inconsolidados	Gerais	*30. origem, textura *31. distribuição 32. permeabilidade 33. índice de vazios 34. mineralogia 35. erodibilidade 36. fertilidade 37. potencial de corrosividade 38. expansibilidade
		Específicos	*39. variação em profundidade 40. características químicas 41. capacidade campo e murchamento *42. processos de intemperismo e pedológicos 43. resistência/suporte 44. massas específicas dos
Clima			*46. pluviosidade 47. temperatura/ umidade/ ventos/ 48. evapotranspiração 49. intensidades pluviométricas

*Atributos que representam relação com mais de 50% dos demais.

3.2.2.2 Metodologia Proposta pela UNESP de Rio Claro

O método proposto pela UNESP – Rio Claro, segundo Cerri et al., (1996) possui como destaque o conceito de detalhamento progressivo, procedendo com a realização de atividades ordenadas em três etapas sucessivas, onde cada fase determina os temas técnicos abordados e o detalhamento necessário ao desenvolvimento da fase subsequente. Como apresentado por Cerri et al, (1996) e Zaine (2000) podemos sintetizar as três etapas em:

1ª Etapa ou Etapa Geral (de maior interesse para a pesquisa) - Procede-se com o mapeamento geológico-geotécnico regional na escala 1:50.000 ou 1:25.000, a partir da integração de dados de levantamentos e realizados em diferentes escalas, com eventuais complementações.

Onde deve estar incluso a caracterização do meio físico geológico, a definição das dimensões da área de estudo em função da área urbana atual e da projeção do crescimento urbano a médio prazo (10 a 20 anos), além de uma área envoltória, em que a caracterização do meio físico geológico contribua para o melhor entendimento de sua dinâmica.

2ª Etapa ou Etapa Intermediária - Tendo como base as cartas e/ou mapas geotécnicos apresentados na escala 1:25.000 (1ª etapa = 1:50.000) ou 1:10.000 (1ª etapa = 1:25.000), em áreas de adensamento e/ou de expansão urbana, selecionadas a partir do mapa geológico-geotécnico regional, procede-se com um detalhamento da caracterização do meio físico geológico, pré realizada na etapa anterior (também apontando as limitações e as potencialidades), além da identificação dos eventuais problemas de natureza geológico-geotécnica que ocorre na área de estudo.

Os resultados obtidos fornecem subsídios diretos para o planejamento adequado e a gestão do uso urbano do solo em áreas já urbanizadas e naquelas com perspectivas de urbanização em médio prazo. Também está incluída a quantificação dos parâmetros geológico-geotécnicos selecionados e que interessem diretamente às ações de planejamento e gestão urbana.

3ª Etapa ou Etapa de Detalhe - Tendo como base a caracterização do meio físico geológico e a identificação de eventuais problemas geológico-geotécnicos selecionados em

escala de detalhe, são escolhidos locais para realização de estudos específicos, onde, caso se faça necessário deve-se proceder a confecção de mapas, em escala de maior detalhe, geralmente 1:5.000, este produto de maior detalhe objetiva subsidiar a elaboração de projetos em obras de engenharia para sanar problemas já instalados ou para a implantação de novos empreendimentos.

Nesta etapa, deve-se destacar a necessidade de quantificação de parâmetros geológico-geotécnicos pertinentes ao estudo temático, exceto nos casos em que a capacitação técnica acumulada do pesquisador seja suficiente para embasar projetos e obras.

3.2.3 Outras Metodologias de Destaque no Cenário Nacional

No âmbito do mapeamento geotécnico no Brasil, ainda podemos destacar a metodologia adotada pelo *Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)*.

Segundo Nakazawa et al. (1991) a metodologia contempla o planejamento territorial em escalas de trabalho regional ou local, tendo como produto de saída cartas que podem ser utilizadas de forma direta e imediata pelo público final, sendo que os estudos são voltados para problemas específicos (erosão, movimento de massa, planejamento territorial).

Zuquette e Gandolfi (2004) apresentam de forma sintetizada os cinco pontos centrais dos trabalhos desenvolvidos pelo IPT, que também são discutidos por Nakazawa, Freitas e Diniz (1994), a saber:

- 1)** Partir dos problemas do meio físico significativos para as suas condicionantes mapeáveis.
- 2)** Considerar as formas usuais de ocupação do solo e as solicitações sobre o meio físico como fatores fundamentais na determinação do desempenho dos terrenos.
- 3)** Concentrar esforços na coleta objetiva e orientada de dados, voltada para definir unidades de terreno de mesmo comportamento, de modo que cada unidade

conduza a distintas práticas e técnicas de prevenção e correção dos problemas identificados.

- 4) Superar o determinismo ingênuo intrínseco aos conceitos de “aptidão”, comumente empregados nas cartas geotécnicas, valendo-se do arsenal de técnicas disponíveis para a maximização de opções plausíveis de uso do solo.
- 5) Elaborar cartas geotécnicas de caráter dinâmico que permitam incorporar novos conhecimentos do meio físico e novas técnicas de ocupação do solo.

De acordo com as premissas apresentadas, os atributos do meio físico interessantes ao trabalho não são definidos na fase de planejamento, sendo determinados nas primeiras etapas, por meio da análise e entendimento dos processos instalados na área. No método também são utilizados ensaios (*in situ* e laboratório) para quantificar atributos de interesse.

Também podemos citar o recente trabalho desenvolvido por ABREU (2007), onde a autora visando um constante avanço no campo da pesquisa científica, organizou e aplicou uma integração entre os métodos desenvolvidos pela EESC, IPT e UNESP, tendo como fundamento o método da EESC. Incorporando aspectos positivos dos outros métodos citados, em linhas gerais a sistematização elaborada pela autora pode ser observada no fluxograma da figura 3.1.

O método consta de 11 etapas, abaixo, pode-se observar a definição de cada etapa do método:

Etapa 1: Levantamento dos dados existentes - Consta de uma revisão bibliográfica dos trabalhos de interesse existentes na área.

Etapa 2: Elaboração das bases cartográficas - O método utiliza diferentes escalas de trabalho, otimizando recursos na medida do necessário, conforme o quadro diagnóstico da área que vai sendo levantado, esta etapa envolve a preparação da base cartográfica, aquisição de fotografias aéreas e outros produtos de sensoriamento remoto.

Etapa 3: *Diagnóstico dos processos e restrições geotécnicas na área* - Consta de aerofotointerpretação, trabalhos de campo de reconhecimento para verificar em campo processos delimitados nos produtos de sensoriamento remoto.

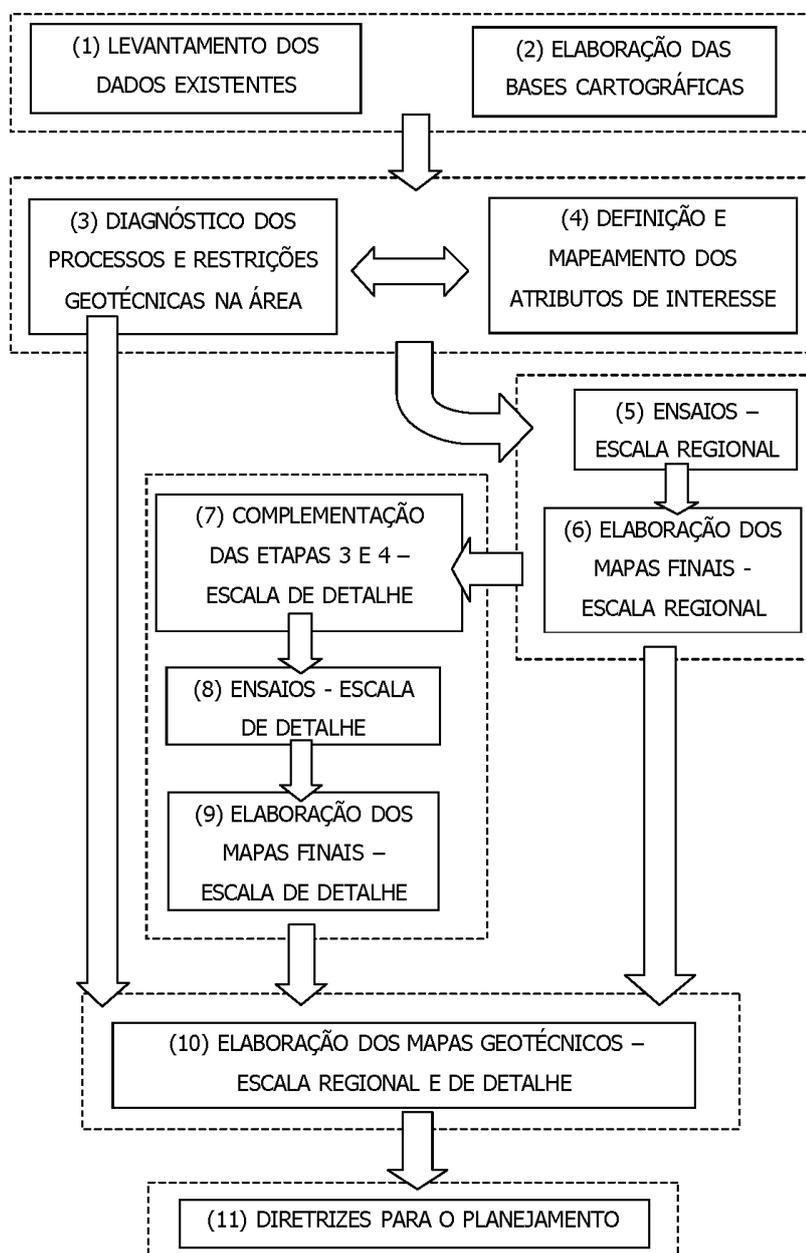


Figura 3.1. Fluxograma do método integrado por Abreu (2007).

Etapa 4: *Definição e mapeamento dos atributos de interesse* - Nesta etapa se dá a definição cartográfica dos atributos de interesse do meio físico considerados de interesse para

elaboração do mapa geotécnico, podendo ser: substrado rochoso, materiais inconsolidados, declividade, uso do solo.

Etapa 5: Ensaio em escala regional - Ensaio de caracterização geotécnica dos materiais (granulometria, limites de consistência, determinação da massa específica seca).

Etapa 6: Elaboração dos mapas finais em escala regional - Representação cartográfica da distribuição de diferentes materiais inconsolidados.

Etapa 7: Complementação das etapas 3 e 4 em maior detalhe - Mapeamento em maior detalhe de locais que se façam interessantes.

Etapa 8: Ensaio em escala de maior detalhe - São ensaios cuja localização das amostras se encontram mais próximos dando informações mais detalhadas sobre o local investigado.

Etapa 9: Elaboração dos mapas finais em escala de detalhe - Com base nas informações obtidas na etapa anterior os dados são melhor adensados propiciando um mapa com mais detalhes.

Etapa 10: Elaboração dos mapas geotécnicos em escala regional e de detalhe - Por meio da avaliação crítica de todos os dados reunidos ao longo da pesquisa, tanto em nível regional quanto de detalhe, são elaborados mapas geotécnicos definitivos.

Etapa 11: Diretrizes para o planejamento - Com base nos aspectos geotécnicos do meio físico, são realizadas avaliações das aptidões à ocupação de cada unidade geotécnica e o levantamento dos conflitos de uso na área Municipal.

3.3 Processos Relacionados ao Meio Físico

Para melhor compreender as características dos compartimentos geotécnicos, definidos no mapeamento é importante conhecer os processos a que o meio físico está sujeito. Podemos destacar alguns processos de interesse na geologia de engenharia, conforme Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), sendo de maior importância para a área de estudos os processos erosivos, movimentos de massa, assoreamento, inundação, subsidências e colapsos.

O mesmo autor ressalta ainda que é possível ocorrer outros processos como os *costeiros* que não estão no domínio geomorfológico da área de estudos.

Da mesma forma que os processos costeiros, também existem os processos de *empastilhamento* (desagregação em forma de pastilhas própria de rochas argilosas). Citamos também os processos de *expansão* que ocorre associado a argilas do grupo da esmectita (quando em contato com água as argilas sofrem expansão, como consequência ocorre uma fragmentação da estrutura do solo ou rocha).

3.3.1 Erosão Hídrica

Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) definem *erosão* como um processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou de fragmentos e partículas de rocha. Pela ação combinada da gravidade com a água, vento, gelo e organismos.

Segundo Lima (2003), Camapum de Carvalho (2005) e Camapum de Carvalho et al. (2006) é comum classificar as erosões em quatro grandes grupos: erosão hídrica (causada pela ação da água), erosão eólica (causada pela ação do vento), erosão glacial (causada pela ação do gelo) e erosão organogênica (causada pela ação de organismos). Os mesmos autores discutem os fatores que deflagram os processos erosivos, a seguir podemos observar os fatores de natureza externa:

- a) **Potencial de erosividade da chuva:** Corresponde a ação dos agentes erosivos, como a água, que causa a desagregação e o transporte de solo Lal & Elliot (1994);
- b) **Condições de infiltração e escoamento superficial:** Segundo Prusko et al. (2008) a infiltração nada mais é do que o processo pelo qual a água atravessa a superfície do solo, podendo ser facilitada ou dificultada pelo escoamento superficial que corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. Alguns fatores interferem no escoamento superficial, onde podemos citar os fatores agroclimáticos tratando se da cobertura e tipos de uso do solo e seus efeitos sobre as condições de infiltração de água no solo,

quanto maior a porcentagem de cobertura vegetal e rugosidade da superfície do solo, menor o escoamento superficial. A evapotranspiração também pode representar um importante fator para retirada de água do solo. Fatores fisiográficos também são importantes, quanto maior a área e a declividade da bacia, maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial, também podemos citar o tipo de solo, topografia, rede de drenagem e a presença de obras hidráulicas.

- c) Declividade:* Pode ser entendida como a inclinação de um terreno. Para valores em porcentagem, corresponde à diferença de nível (vertical) entre dois pontos horizontais, multiplicada por 100%, onde posteriormente este valor é dividido pelo espaçamento horizontal entre os pontos considerados, comumente este procedimento é realizado em uma carta topográfica, conforme exposto por De Biasi (1970);
- d) Comprimento do talude ou encosta:* Dimensão linear da superfície inclinada (varia do topo a base).

Estes são fatores de grande importância no condicionamento de processos erosivos. Os mesmos autores também consideram a ação de fatores internos, como:

- a) Gradiente crítico:* Gradiente hidráulico correspondente à força do corpo resultante nula (CRAIG, 2007), pode ser entendido como o valor máximo do gradiente hidráulico, acima do qual em um solo saturado pode ser verificado fluidez ou erosão interna;
- b) Desagregabilidade e erodibilidade do solo:* Falta da capacidade do solo em resistir aos processos erosivos, depende não só das características intrínsecas do solo, onde devemos considerar fatores como ciclos de umedecimento, secagem, e composição química da água presente Vilar e Prandi (1993).

FENDRICH et al., 1997 apud PONS (2006), apresenta como fatores condicionantes do processo erosivo os fatores humano, chuva, solo, topográfico e clima (tabela 3.2).

Tabela 3.2. Fatores condicionantes do processo erosivo. FENDRICH et al. (1997) apud PONS (2006).

Fator condicionante	Contribuição ao processo erosivo
Fator Humano	<ul style="list-style-type: none"> - retirada da cobertura vegetal; - agricultura praticada com manuseio impróprio; - formação de pastos com alta densidade de animais, ocasionando o excessivo pisoteio; - abertura de valetas de forma inadequada (perpendicular às curvas de nível), a fim de proteger culturas; - abertura de estradas sem obras de drenagem; - execução de loteamentos sem obras de drenagem e controle de erosão.
Fator Chuva	<ul style="list-style-type: none"> - destacabilidade do solo desnudo pelo impacto das gotas de chuva; - desagregabilidade do solo superficial, pelo escoamento superficial direto; - desagregabilidade do subsolo e do desmonte de maciços, pelo escoamento subterrâneo; - capacidade transportadora da chuva, sobre o solo destacado; - capacidade transportadora do escoamento superficial sobre o solo desagregado; - capacidade de provocar o deslizamento e quedas de maciços arenosos no pé dos taludes; - parcela de escoamento superficial excedente atua com intensidade no terreno durante alguns minutos e também ao longo dos períodos de chuva; - parcela do escoamento subterrâneo é menos intensiva sobre o solo, porém, atua continuamente ao longo dos períodos de seca.
Fator Solo	<ul style="list-style-type: none"> - os solos mais propícios à formação de boçorocas são os do tipo arenoso, secos e ácidos, pouco coesivos, coluviais e porosos, apresentando o horizonte A, em geral, com cor vermelha intensa, constituídos por areia muito fina, siltosa e pouca argila.
Fator Topográfico	<ul style="list-style-type: none"> - as boçorocas ocorrem tanto em terrenos levemente ondulados, como naqueles de topografia acidentada. A topografia influi na sua velocidade de formação e desenvolvimento, os locais que apresentam maior densidade de drenagem, dada pela quantidade de talvegues, sulcos, valetas.
Fator Clima	<ul style="list-style-type: none"> - com base no índice de Classificação Internacional de Climas de KÖEPPEN, as regiões mais atingidas pela erosão são caracterizadas pelas classes de clima úmido, tropical quente e temperado, (Cwa e Aw) e Cfa, com inverno seco e verão chuvoso, respectivamente.

De forma geral a evolução da erosão ao longo do tempo depende de fatores tais como características geológicas e geomorfológicas do local, presença de trincas de origem tectônica e evolução físico-química e mineralógica do solo.

Segundo Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) a erosão hídrica superficial (que se faz de maior importância para o presente trabalho, devido às características da área de estudo), pode ser laminar ou linear. A erosão laminar (causada por escoamento difuso) é caracterizada pela remoção uniforme do solo ao longo da vertente, causada principalmente pelo impacto das gotas de chuva, podendo ou não nessa fase propiciar o aparecimento de sulcos, este processo apresenta uma maior severidade quando o terreno está desprovido de cobertura vegetal. As evidências de erosões laminares, são de difícil percepção, geralmente não deixam traços visíveis, podendo continuar atuando por décadas, não existindo um “marco” que define a passagem de erosão laminar para sulco (erosão linear) Camapum de Carvalho et al. (2006).

De acordo com Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), a erosão linear superficial forma feições classificadas como:

- a) **Sulco:** Feição que chega em média até meio metro de profundidade (ocorre geralmente associada a trilhas de gado ou em locais expostos devido à movimentação de terra);
- b) **Ravina:** Feição maior que meio metro não atingindo o lençol freático. Oliveira (1994) discute também que neste tipo de erosão, podem ocorrer mecanismos que evoluem para movimentos de massa, em forma de pequenos deslizamentos em taludes laterais, relacionados a solapamento das bases da feição, devido ao escoamento superficial em seu interior, provocando o alargamento da feição erosiva;
- c) **Vossoroca ou bossoroca:** Feição formada pelo aprofundamento das ravinas, atingindo o lençol freático, representa um estado mais avançado e agressivo do processo erosivo. As voçorocas podem atingir grandes dimensões, gerando impactos ambientais consideráveis, tanto em sua área de ocorrência, quanto à jusante da

feição, dificultando o uso do solo, pode estar associado a este processo erosivo, a ação de *piping*, liquefação de areia, escorregamentos laterais, contaminação acentuada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos Rodrigues (1982).

Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006) em meio urbano, as voçorocas são originadas pela ampliação do volume e concentração de águas superficiais e por lançamentos inapropriados das drenagens de águas pluviais. Geralmente, o problema se agrava quando da mistura de águas servidas com águas pluviais do sistema de drenagem. Ainda ligadas ao lançamento de sistemas de drenagem encontramos as ravinas e voçorocas junto a rodovias, ferrovias e outras obras de engenharia. No meio rural, elas geralmente surgem e se desenvolvem em consequência de alterações hidrológicas na bacia de drenagem, em consequência de desmatamentos e modificações nas taxas de infiltração e no regime de vazões.

Podemos citar ainda a ação da erosão interna, também conhecida como *piping*, tratando-se de um fenômeno de erosão subterrânea no qual a percolação de água causa a remoção de partículas do interior do solo, formando cavidades de forma tubular que avançam para o interior do solo Hargerty (1991). Este processo pode evoluir para grandes cavidades no subsolo, ocorrendo nas proximidades de taludes, podendo também se desenvolver ao longo de centenas de metros de distância de voçorocas, enfraquecendo o solo e podendo causar subsidências Fendrich et al. (1997).

As erosões classificadas em eólica, glacial e organogênica não serão abordadas em detalhe neste trabalho, devido sua baixa relevância para a área de estudos.

3.3.2 Movimentos de Massa

Press et al. (2006), Oliveira (1995) e Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) definem movimentos de massas como instabilizações que ocorrem em encostas ou taludes, algumas características como a velocidade do movimento, natureza do material e a quantidade de água presente no material, direcionam a classificação deste fenômeno em:

- a) Fluxo de Materiais Inconsolidados Lentos (*talus-creep, soil-creep, rock-creep*):** Pode ser chamado de *rastejo*, sendo definido como uma deformação de caráter plástico cuja geometria não é bem definida, lento, descendente e contínuo da massa de solo no talude. Como evidência de campo é possível observar postes ou cercas inclinadas como na Figura 3.2, também pode causar danos em estruturas como muros e construções. O movimento se dá em centímetros por ano, sendo perceptível somente após longos períodos de tempo Borrero et al. (2008);

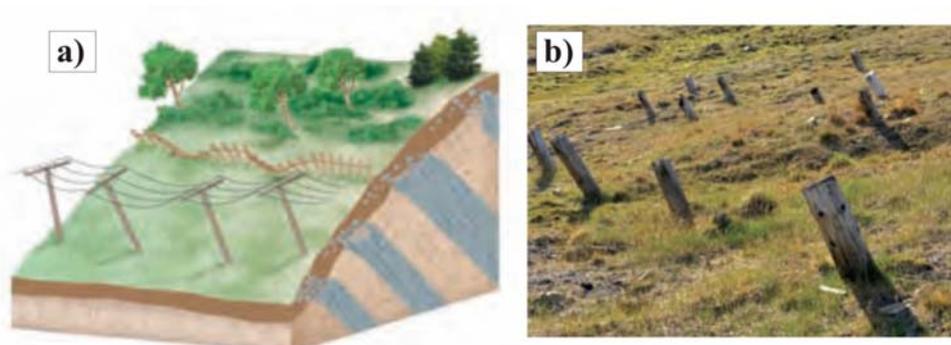


Figura 3.2. a) Bloco diagrama esquematizando o processo de rastejo, notar mudança na inclinação de postes e da cerca. b) Foto ilustrando o processo. Fonte das figuras: Borrero et al. (2008).

- b) Escorregamentos (*landslides, rock-slide, debri-slide, slump*):** Movimento geralmente rápido de massas de solo ou rocha, também podendo ocorrer em velocidades baixas, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude. Os blocos de rocha deslizam pela superfície do talude mais ou menos como uma unidade de material. Na Figura 3.3, podemos observar um escorregamento em rocha;



Figura 3.3. a) Esquema ilustrando um escorregamento ou deslizamento de blocos de rocha. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).

c) **Movimentos de blocos rochosos ou Quedas (rock fall, debris-fall):** Deslocamentos devido à ação da gravidade, afetando blocos de rocha, podendo ser classificados em queda, tombamento, rolamento e deslocamento, neste processo os blocos de rocha caem livremente pela vertente, formando uma nova face. Na Figura 3.4, podemos observar um processo de queda de blocos;



Figura 3.4. a) Esquema ilustrando queda de blocos. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).

d) **Fluxo de materiais Inconsolidados Rápidos (earth-flow, mud-flow):** Podem ser subdivididos em *fluxo de terra*, *fluxo de detritos* e *corridas*, sendo a velocidade crescente do primeiro para o último. Os *fluxos de terra* são entendidos como um movimento fluído de materiais de grãos relativamente finos, tais como solos, folhelhos alterados e argilas. Os *fluxos de detritos* são movimentos de massa fluídos de fragmentos rochosos suportados por uma matriz de lama, podendo se mover em velocidades de até 100 km/h. As *corridas* são movimentos gravitacionais de massas de grandes dimensões, que se deslocam na forma de escoamento rápido, possuindo uma dinâmica híbrida (regidos pela mecânica dos sólidos e fluídos). As *corridas de lamas*, são caracterizadas por apresentarem uma massa de material fluído, geralmente mais fino do que areia, com alguns fragmentos de rocha, contendo grande quantidade de água. Na Figura 3.5, podemos observar a ilustração de um processo de corrida de massa.

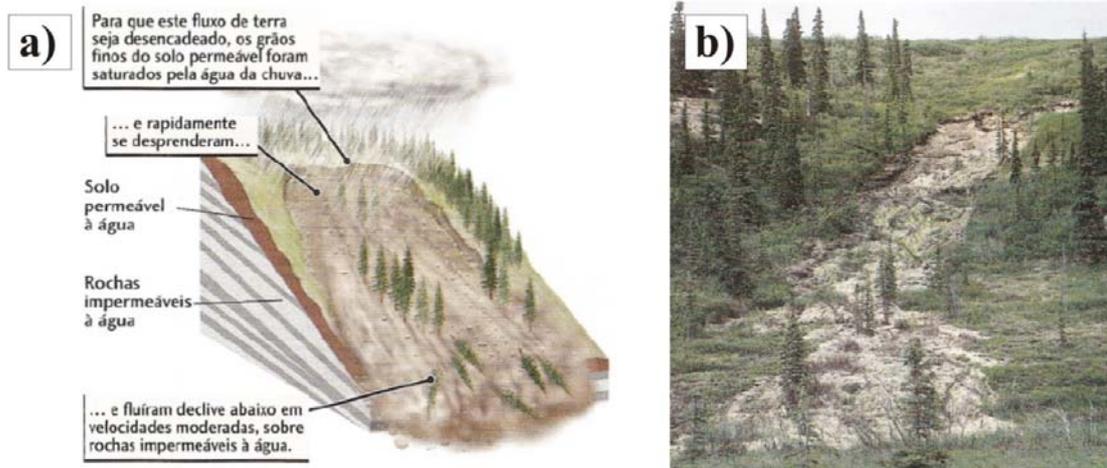


Figura 3.5. a) Esquema ilustrando corrida de solo ou fluxo de terra. b) Foto ilustrando o processo. Fonte: Press et al. (2006).

Press et al. (2006) discutem alguns fatores que podem deflagrar estes movimentos de massa, onde podemos destacar a presença de uma encosta muito inclinada, podendo condicionar processos erosivos, ou ser inadequada no caso de escavações de natureza antrópica. A saturação do material também pode ser um agente deflagrador, ocasionada por chuvas intensas ou subida do lençol freático em casos de represamentos. Alguns eventos cíclicos como terremotos e tormentas também são fatores importantes a considerar. Os efeitos causados pelo tectonismo em épocas passadas também podem condicionar movimentos de massa, onde podemos citar a geração de superfícies de relevo com elevada altitude, encostas inclinadas e rochas fraturadas.

3.3.3 Assoreamento

De acordo com Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998) o assoreamento (Figura 3.6) consiste na acumulação de partículas sólidas em meio aquoso ou aéreo. Ocorre quando a força do agente transportador natural (curso d'água e/ou vento) é sobrepujada pela força da gravidade ou quando a supersaturação das águas ou ar permite a deposição de partículas sólidas.

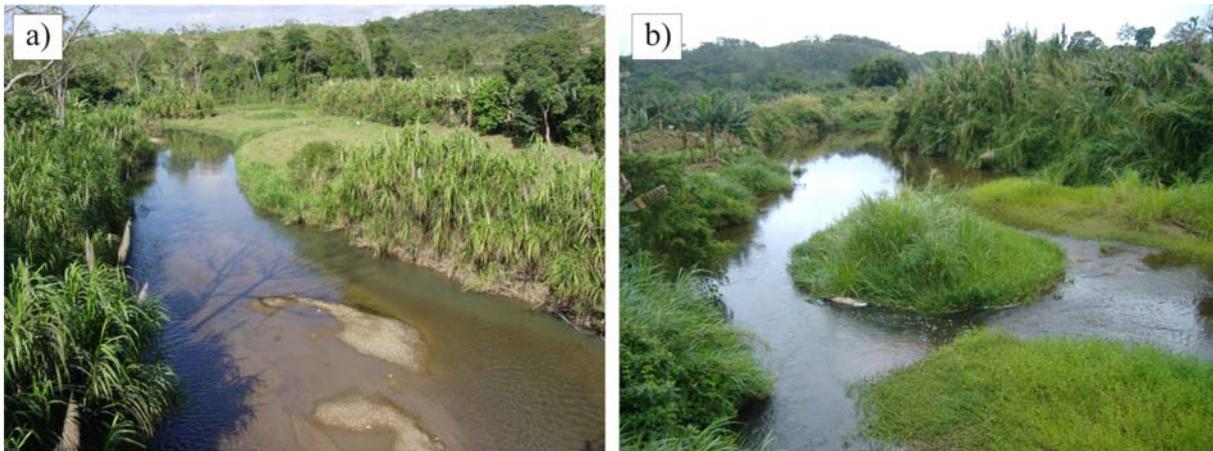


Figura 3.6. Processo de assoreamento do rio Jacupiranguinha (Vale do Ribeira – SP). *a)* foto tirada em 2005 – presença de pequena ilha de sedimentos. *b)* foto tirada em 2007 – a ilha já bem estabelecida com vegetação consistente e o alargamento do canal do rio. Fonte: Moccellini (2010).

Desta forma, o processo de assoreamento está intimamente relacionado aos processos erosivos que fornecem os materiais que darão origem aos novos depósitos, quando não há energia suficiente para transportar o material erodido este é depositado Guerra (1995).

Em área continental os depósitos relacionados ao assoreamento estão em maior número relacionados ao ambiente fluvial. De acordo com Suguio (2003) os rios (fluxo canalizado e confinado) são importantes agentes geológicos que desempenham um papel de grande relevância no modelado do relevo, no condicionamento ambiental e na própria vida do ser humano.

Segundo Oliveira (1995) o assoreamento trás diversos problemas associados como: perda de volume de água em reservatórios, redução da profundidade de canais com reflexos importantes na perda de eficiência de obras hidráulicas e na produção de cheias mais frequentes e intensas, retenção de poluentes nos depósitos e conseqüentes alterações na vida aquática. O mesmo autor afirma que este processo deve ser considerado em um quadro de desequilíbrio ambiental de vários caracteres, onde podemos citar os aspectos:

a) Geomorfológico: Porque o assoreamento faz parte do conjunto de processos de modelado de relevo;

b) Pedológico: Porque o assoreamento responde à erosão que acompanha importantes transformações dos solos, tanto física quanto quimicamente;

c) Hidrológico: Devido a alterações do comportamento hídrico do terreno, especialmente no que diz respeito às taxas de escoamento superficial e infiltração.

3.3.4 Inundação

Segundo Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), o processo de inundação, comum na área urbana de São Carlos (SP), foco do presente estudo (Figura 3.7), corresponde ao extravasamento das águas de um curso d'água, para as áreas marginais, quando a vazão a ser escoada é superior à capacidade de descarga da calha. A inundação está normalmente associada à enchente ou cheia (acréscimo na descarga por certo período de tempo), assoreamento de canal, barramentos ou remansos. As inundações são normais no ambiente, consistindo em um processo geomorfológico natural, que veio a se tornar um problema para a sociedade quando o homem passa a ocupar as planícies de inundação dos rios.



Figura 3.7. Processo de inundação em São Carlos (SP). *a)* Vista geral do processo no centro da cidade. *b)* Detalhe em uma rua do centro da cidade. Fonte: São Carlos em Rede (2010).

De acordo com Bell (2007) quando a inundação ocorre, o volume do rio aumenta significativamente, o que leva a um aumento de sua velocidade e competência. Obstruções e formas irregulares no leito do rio, tais como bancos de areia e vegetação, oferecem resistência

adicional ao fluxo. Rios sinuosos também podem aumentar o atrito. Esses fatores fazem com que a deflexão do fluxo de energia se dissipe.

Na literatura existe uma confusão entre os termos inundação e enchente (SOUZA, 2004). Os termos aparecem em alguns casos com o mesmo sentido e em outros casos com sentido diferente como no caso do autor citado anteriormente Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

Segundo Riccomini et al. (2000) as inundações constituem um dos principais e mais destrutivos acidentes geológicos e ocorrem quando a descarga do rio é elevada e excede a capacidade do canal, extravasando suas margens e alagando as planícies adjacentes.

Este fenômeno pode ser controlado por fatores naturais e/ou antrópicos, entre os fatores naturais, temos as chuvas excepcionais e o degelo, os fatores antrópicos podem ser responsáveis por grandes enchentes, onde podemos citar as rupturas de barragens e diques artificiais. Importantes obras de engenharia, como diques marginais artificiais, barragens de contenção, canalização, piscinões constituem obras de contenção para minimizar os efeitos deste fenômeno, que certamente seria evitado por um correto planejamento urbano. Os mesmos autores ressaltam ainda que este processo gera prejuízos anuais astronômicos.

Para o presente trabalho está sendo considerada a terminologia adotada por Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998).

3.3.5 *Subsidências e Colapsos*

De acordo com Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), o fenômeno de subsidência é caracterizado por uma deformação ou deslocamento de direção essencialmente vertical descendente, manifestando afundamentos no terreno, o colapso por sua vez corresponde a movimentos bruscos no terreno, a subsidência propriamente dita é mais lenta que o colapso.

De acordo com o mesmo autor, o processo de subsidência pode decorrer de duas causas naturais: **a)** dissolução de rochas (carstificação), comum em rochas calcárias, dolomíticas, salinas ou que apresentam gipsita em sua constituição; **b)** acomodação de camadas por seu próprio peso ou por movimentação segundo planos de falha é outro fator.

Os processos em terrenos carsticos não são muito importantes para a presente pesquisa, devido a não ocorrência de rochas relacionadas a estes processos na região de estudo. Alguns solos, submetidos a um incremento do teor de água em seus vazios ou ao sofrerem carregamento e posteriormente umedecimento experimentam uma redução de volume devido a uma brusca variação do índice de vazios. Têm-se atribuído esse fenômeno a um colapso da estrutura do solo, e o material denominado de solo colapsível (Vilar et al., 1981).

Segundo Cintra (1998), este tipo de solo apresenta uma estrutura instável, com uma rigidez temporária mantida pela pressão de sucção e/ou cimentação. Esse estado resistente é instável diante o aumento de umidade, quando é ultrapassado um limite crítico ocorre o colapso, desde que a carga atuante também esteja acima de um limite.

Desta forma Cintra (1998) entende que os solos susceptíveis ao colapso apresentam uma grande sensibilidade à ação da água, sendo que o aumento do teor de umidade é o mecanismo detonador ou efeito gatilho do colapso. Zuquette (1993) propõe que os fatores limitantes para a ocorrência do colapso é a porosidade (n) próxima dos 45% e uma porcentagem de argila próxima dos 45%.

Que correlacionados com os resultados obtidos entre a relação da massa específica aparente seca dos solos é possível estimar o potencial de colapsibilidade. Segundo Ferreira et. al (1989) e Cintra (1998) os solos colapsíveis no Brasil podem ser solos alúvionares, colúvios ou residuais, constituídos por diversas texturas, desde areias até argilas. Sendo seus indicadores os:

- a)* Baixos valores de SPT (≤ 4 golpes);
- b)* Baixos valores de CPT ($q_c \leq 1,0$ MPa);
- c)* Granulometria aberta (ausência de fração silte);
- d)* Baixo grau de saturação ($S_r \leq 60\%$);
- e)* Grande porosidade ($n \geq 40\%$).

Considerando vários autores Vilar et. al (1981), apresenta critérios partindo de índices físicos e propriedades de fácil determinação, indicando de forma qualitativa se o solo é colapsível ou não (tabela 3.3), onde segundo o autor, para que o solo seja colapsível é necessário que a sua estrutura possua um índice de vazios tal que o teor de umidade necessário para sua completa saturação seja maior que o limite de liquidez.

Tabela 3.3. Critérios de identificação de solos colapsíveis. Fonte: Vilar et al, (1981).

Autor	Fórmula	Solo colapsível se:
Denisov (1951)	$K = \frac{e_l}{e_n}$	$0,5 < K < 0,75$
Feda (1966)	$K = \frac{\frac{W_n}{S_{rn}} - LP}{IP}$	$S_m < 60$ $K < 0,85$
Building Code (USSR) Feda (1966)	$K = \frac{e_n - e_l}{1 + e_n}$	$S_m < 60$ $K < -0,1$ $K < 0,1(IP 1-10) / 0,17 (IP 10-14) / 0,27 (14-22)$
Gibbs e Bara (1967)	$K = \frac{e_n}{e_l}$	$K > 1$

Onde:
 K = Coeficiente de identificação de solos colapsíveis;
 W_n = Teor de umidade natural;
 e_l = Índice de vazios no limite de liquidez;
 S_m = Grau de saturação natural;
 e_n = Índice de vazios natural;
 IP = Índice de Plasticidade;
 LP = Limite de plasticidade.

3.3.6 Influência da Declividade

Podemos destacar a influência da declividade quanto à tendência do solo apresentar a ocorrência de movimentos de massa e erosão, justificando a utilização da carta de declividade no presente estudo e integração da mesma na análise dos compartimentos geotécnicos. Devido à influência destes fatores quanto à integridade dos sistemas de armazenamento de combustível.

Na tabela 3.4, apresentamos os intervalos de declividade e a interpretação quanto à tendência a apresentar movimentos de massa e erosão, com classes de valores adaptados da compilação das informações apresentadas por Veneziani et al. (1998), Oliveira et al. (2006) e Santos et al. (2007).

Tabela 3.4. Classes de declividade associadas à tendência à erosão e movimentos de massa. Adaptação da compilação de informações apresentadas por Veneziani et al. (1998), Oliveira et al. (2006) e Santos et al. (2007).

Classes de Declividade (%)	Tendência à erosão	Tendência a movimento de massa
0 – 6	Baixo	Muito Baixo
6 – 12	Média	Baixo
12 – 30	Alta	Baixo
30 – 50	Muito alta	Médio
> 50	Muito alta	Alto

3.4 Derivados de Hidrocarbonetos como Poluentes

Conhecer as características deste tipo de poluente, assim como as propriedades que regem a interação destes com o meio físico, se faz importante para fornecer subsídios à análise de vulnerabilidade associada aos compartimentos geotécnicos na presente pesquisa.

Como conceito básico, podemos entender *poluição ambiental* como resultado do lançamento ou liberação de matéria ou energia em um ambiente, em quantidade ou intensidade tais, que o torne impróprio às formas de vida que ele normalmente abriga, ou prejudique os seus usos (MOTA, 1997).

Corseuil e Marins (2008) discutem que em um vazamento em um posto de gasolina, uma das principais preocupações é a contaminação ambiental de aquíferos, que são usados como fonte de abastecimento de água para consumo humano. A gasolina é muito pouco

solúvel em água, contendo mais de uma centena de componentes, inicialmente, estará presente no subsolo como líquido de fase não aquosa (LNAPL).

Quando em contato com a água subterrânea a gasolina se dissolverá parcialmente. Segundo Corseuil e Marins (2008), os hidrocarbonetos monoaromáticos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e os três xilenos (orto, meta e para), conhecidos como compostos BTEX, são os constituintes da gasolina que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes que primeiro irão atingir o lençol freático.

Como apresentado anteriormente, estes contaminantes são considerados substâncias perigosas, devido à ação que empregam no ser humano, principalmente agredindo o sistema nervoso central e por causarem leucemia em casos de exposição crônica. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico, segundo as normas do Ministério da Saúde. Corseuil e Marins (2008) fazem observações importantes a cerca da composição da gasolina comercializada no Brasil que é bastante diferenciada de outros países por ser misturada com 22% de etanol.

Devido esta mistura as interações entre o etanol e os compostos BTEX, podem causar comportamento completamente diferente no deslocamento de uma pluma de contaminação, em comparação com o modelo observado em países que utilizam gasolina pura. Desta forma, no Brasil devemos ficar atentos na caracterização e previsão do comportamento da pluma deste tipo de contaminante. Segundo os mesmos autores, os três aspectos principais que podem afetar o comportamento dos hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno em sistemas subsuperficiais em presença do etanol são:

- 1) Possibilidade do aumento da solubilidade dos BTEX em água;
- 2) Possibilidade do aumento da mobilidade dos BTEX dissolvidos na água subterrânea;
- 3) Possibilidade de que a presença do etanol possa dificultar a biodegradação natural dos BTEX, aumentando a persistência destes compostos na água subterrânea.

Uma vez que o etanol é completamente solúvel em água, sua concentração deverá ser maior do que a dos compostos BTEX em águas subterrâneas contaminadas com misturas de etanol e gasolina. Como compostos altamente solúveis têm menor potencial de sorção, o etanol terá uma mobilidade maior do que a dos compostos BTEX na água subterrânea. O etanol, quando presente em altas concentrações pode diminuir o retardo no deslocamento dos BTEX na água subterrânea, causado por efeito de sorção no solo.

O etanol pode também ser biodegradado antes que os BTEX, dessa forma consumindo todo o oxigênio necessário para a degradação dos hidrocarbonetos monoaromáticos. Além disso, o etanol pode ser tóxico ou inibitório para os micro-organismos degradadores de BTEX (CORSEUIL E MARINS, 2008).

Kaipper (2003) discute que a concentração deste tipo de contaminantes orgânicos na sub superfície pode ser afetada por processos variados, onde podemos destacar a infiltração dos compostos NAPL's na zona insaturada do solo por força gravitacional, capilaridade, migração no topo da franja capilar e expansão do NAPL no lençol freático, formando a pluma de contaminação.

Estes compostos são subdivididos em LNAPL (Fase não aquosa líquida leve), que possui um comportamento típico para o modelo da pluma de contaminação que pode ser observado na figura 3.8. O LNAPL também pode ser dissolvido na água e sofrer transporte seguindo as linhas de fluxo da água subterrânea para jusante, também pode sofrer perdas por biodegração, vaporização ou sorção. Por outro lado os compostos denominados de DNAPL (Fase líquida densa não aquosa) são líquidos orgânicos como tricloroetilenos, pouco solúveis em água, possuindo uma densidade maior que a água, podem migrar até a base do aquífero sujeito à contaminação (figura 3.9).

Kaipper (2003) enfatiza que os contaminantes podem ser adsorvidos pelo solo, serem dissolvidos na água, sofrer transferência do solo para a água, sofrer sorção por meio do solo e da água por vegetais e também podem se volatilizar do solo ou água para o ar. As diversas propriedades físico-químicas do composto como densidade, solubilidade, coeficientes de partição, pressão de vapor e constante de Henry, vão ditar como será a tendência do composto se mover. Estas propriedades devem ser levadas em conta em estudos mais completos, que objetivam a remediação de áreas contaminadas.

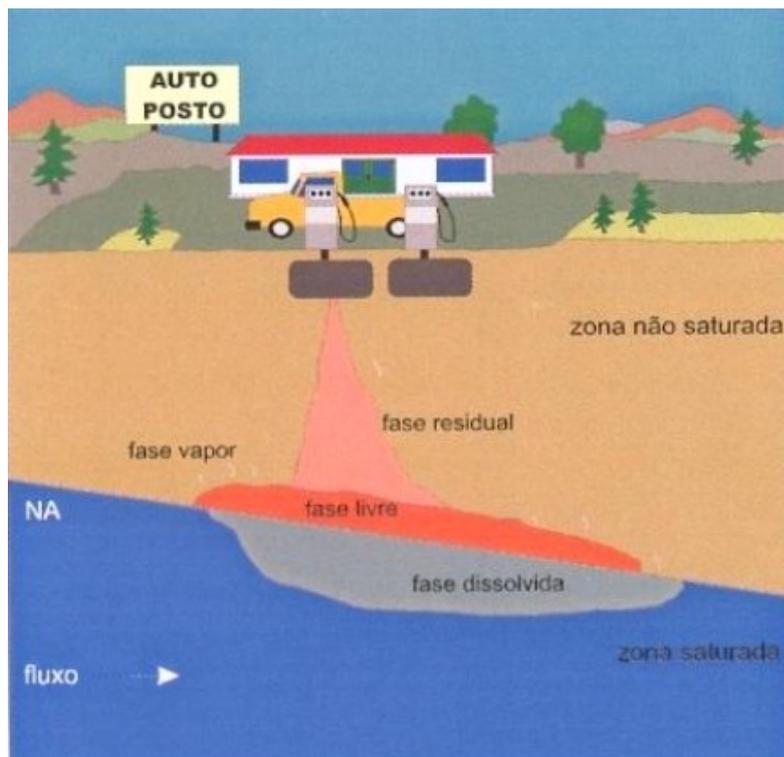


Figura 3.8. Modelo de pluma de contaminação para LNAPL. Fonte: Fetter (2001) modificado por Silva (2006).

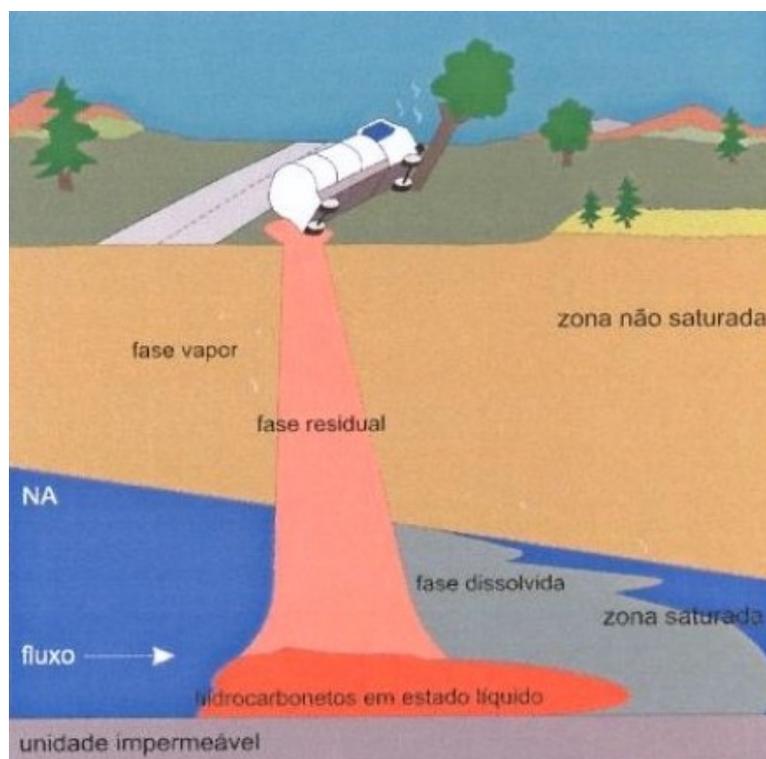


Figura 3.9. Modelo de pluma de contaminação para DNAPL. Fonte: Fetter (2001) modificado por Silva (2006).

Costa et al, (1999) descreve as fases onde ocorrem os processos de interação entre o contaminante e o meio físico, destacamos as fases adsorvida, livre, dissolvida, vaporizada e condensada, descritas a seguir:

Fase adsorvida: Ocorre no halo de dispersão entre a fonte poluidora e o nível freático, caracterizada por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo grumos de solo ou descontinuidades existentes na rocha, mais importante para produtos viscosos (diesel).

Fase livre: Sua forma ocorre como uma película não miscível, sobre o topo do freático livre e que pode ser mais espesso em casos onde o sistema freático é pouco dinâmico (várzeas).

Fase dissolvida: Caracterizada como contaminações por dissolução de aditivos polares e por uma fração emulsionada de hidrocarbonetos que possui maior mobilidade, possuindo como característica típica uma dissipação abaixo do nível freático livre, mais importante em fluidos menos viscosos (gasolina).

Fase vaporizada: É formada por uma fase gasosa de componentes voláteis dos combustíveis, ocupando vazios do solo ou rocha, mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõem a gasolina.

Fase condensada: Aparece mais tipicamente em áreas urbanas, onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, caracterizada pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos.

De acordo com SHU et al. (2003), outros compostos importantes presentes em muitos combustíveis, são os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), onde, segundo exposto por Sisno et al. (2003) tratam-se de poluentes orgânicos de importância ambiental e interesse toxicológico, muitos apresentam propriedades pré-carcinogênicas e/ou mutagênicas para homens e animais (Tabela 3.5).

Tabela 3.5. Tabela síntese de classificação dos HPAs quanto a sua carcinogenicidade (IARC), carcinogenicidade e ocorrência (EPA) e periculosidade (ABNT). Fonte: Sisnno et al. (2003).

HPAs	IARC	EPA	ABNT
Fluoreno	3	P	NM
Fenatreno	3	P	NM
Antraceno	3	P	NM
Metilfenantrenos+Metilantracenos	3	P	NM
Pireno	3	P	NM
Fluoranteno	3	P	CP
Benzo[a]antraceno	2A	P	CP
Criseno	3	P	CP
Benzo[b]fluoranteno	2B	P	CP
Benzo[k]fluoranteno	2B	P	NM
Benzo[e]pireno	3	P	NM
Benzo[a]pireno	2A	P	CP
Indeno[1,2,3-c,d]pireno	2B	P	CP
Dibenzo[a,h]antraceno	2A	P	CP
Benzo[g,h,i]perileno	3	P	NM
Coroneno	3	P	NM

IARC = International Agency for Research on Cancer; EPA = Environmental Protection Agency; ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 10.004). 2A = Provável carcinogênico para humanos – limitada evidência em humanos e suficiente em animais (IARC); 2B = Possível carcinogênico para humanos – limitada evidência em humanos e insuficiente em animais (IARC); 3 = Não é classificado como carcinogênico para humanos (IARC); P = Prioritário (EPA); CP = Confere periculosidade (ABNT); NM = Não mencionado no anexo D, listagem no 4 (ABNT).

A presença de qualquer um dos compostos apresentados na tabela 3.5 é suficiente para classificar o mesmo como resíduo perigoso (classe I).

3.4.1 *Percolação de Derivados de Hidrocarbonetos no Meio Físico*

É importante ter o conhecimento dos modelos conceituais a cerca da percolação dos poluentes estudados no meio físico, no caso abordado por este trabalho, poluição pode ocorrer de diversas formas, sendo as mais comuns, derramamento accidental, vazamento em bombas de abastecimento e vazamento em sistemas de armazenamento subterrâneo raso. O entendimento de como são as características dos poluentes no meio físico, podem direcionar os estudos de caracterização das dimensões da contaminação, utilização de técnicas de remediação e monitoramento ambiental.

Como já apresentados no item anterior, podemos destacar dois comportamentos diferentes para os derivados de hidrocarbonetos. Os LNAPLs, por serem menos densos que a água ($< 1 \text{ g/ml}$) apresentam um comportamento diferente dos DNAPLs, que possuem uma densidade maior que a da água ($> 1 \text{ g/ml}$).

Segundo diversos autores, como Guiguer (1996), Fetter (1999), Silva (2003), estes poluentes quando derramados na superfície tendem a migrar verticalmente pela zona não saturada do solo, sob influência das forças gravitacional e capilar (responsável pela presença de migrações verticais). A dispersão em sub superfície não ocorre de forma uniforme e homogênea, mas sob a forma de acumulações discretas que dependem das propriedades químicas e físicas do meio e do fluído percolante.

Segundo os mesmos autores, um aquífero contaminado por LNAPL, pode apresentar quatro fases, sendo elas:

- 1) ***Gasosa ou vapor:*** Possui contaminantes volatizados a partir das fases apresentadas a seguir, a migração desta fase se dá de acordo com suas propriedades físico-químicas (pressão de vapor, solubilidade, concentração, densidade e viscosidade) e das características do aquífero (condutividade hidráulica, profundidade, nível estático, direção do fluxo d'água subterrâneo, porosidade);
- 2) ***Aquosa ou dissolvida:*** Corresponde à parte dos compostos orgânicos que estão dissolvidos na água, dependendo de sua solubilidade, resulta do contato entre a

água de sub superfície e os hidrocarbonetos em fase líquida, esta fase representa o maior volume na pluma de contaminação, devido a maior mobilidade de compostos dissolvidos;

- 3) ***Imiscível ou livre:*** Os contaminantes estão presentes em uma fase individual, sobrenadante à franja capilar, não absorvido pelas partículas do solo. Atingindo a zona saturada, será formada uma pluma de contaminação de fase livre que tende a migrar seguindo o fluxo de água subterrânea, e sua velocidade é controlada pela velocidade do fluxo. O espalhamento vertical dos hidrocarbonetos na franja capilar sofrerá influência direta das flutuações do nível freático, uma persistência desta fase indica uma fonte permanente de contaminação;
- 4) ***Sólida, adsorvida ou retida:*** As moléculas dos hidrocarbonetos aparecem adsorvidas na superfície dos sólidos, isto ocorre por processos de adsorção química, absorção e ligações de *Van der Waals*.

Quando a contaminação está na zona não saturada, as quatro fases expostas acima estão presentes, porém, quando a contaminação atinge a zona saturada, só estão presentes três fases (adsorvida ou retida, dissolvida e livre).

3.4.2 Fenômenos de Transporte Associados

Ferreira e Zuquette (1998) apresentam uma síntese sobre os fenômenos de transporte associados à percolação de contaminantes gerados por combustíveis fósseis. Os autores destacam estes fenômenos no transporte de LNAPLs, onde tanto na zona saturada quanto na zona não saturada do solo são dependentes da quantidade de composto liberado no meio, subdividindo em pequenos volumes e grandes volumes:

- a) ***Pequenos volumes:*** Atingirão o estado de saturação residual ao migrarem pela zona não saturada do solo. A fase gasosa liberada será controlada por difusão molecular, enquanto que o processo de dissolução controlará a água presente nos

poros do solo, levando os compostos mais solúveis até a zona saturada, onde a distribuição desta fase se dará por difusão e advecção.

b) *Grandes Volumes:* Quando liberados no solo, o deslocamento descendente os coloca na zona de capilaridade próximo à zona saturada, os componentes mais solúveis tendem a se infiltrarem rapidamente, em contraposição aos não solúveis. No topo da zona de capilaridade, onde a água satura um grande volume de poros do solo, o produto acumulado causa uma redução na permeabilidade relativa do meio e fica impedido de se mover para baixo. Em função de sua baixa densidade no caso dos LNAPLs, tendem a se espalhar e flutuar sobre o topo da franja capilar, constituindo uma fase livre imiscível, passando a fluir na mesma direção do fluxo de água subterrânea.

De acordo com Fetter (1999) e Jesus (2004) o processo de migração e retenção de poluentes no solo é influenciado por diversos fatores relacionados às características do fluido percolante, ao solo e às condições ambientais. Podemos destacar alguns fatores, como: o tipo de solo, mineralogia, CTC, espécies de cátions adsorvidos, velocidade de percolação, teor de matéria orgânica, concentração do contaminante, presença de outras substâncias na solução percolante, condições hidrogeológicas, temperatura e o pH do meio.

Os mecanismos que regem o movimento de poluentes em ambiente hidrogeológico são agrupados em três categorias: física, química e bioquímica. Dentre os principais mecanismos de transporte associados à contaminação do meio físico por hidrocarbonetos derivados de petróleo podemos citar: a difusão, advecção e a dispersão mecânica. Também podem ocorrer fenômenos de sorção, precipitação, complexação e as atividades biológicas.

A seguir, são apresentados os conceitos envolvidos na difusão, advecção e dispersão mecânica.

a) *Difusão:* Segundo Schulz (2003) neste processo ocorre a transferência do material por meio de movimentos aleatórios de partículas do meio no sentido decrescente da “concentração” da propriedade transferida. A difusão pode ser

molecular (as partículas são moléculas, e o material se transfere em decorrência da agitação molecular) ou difusão turbulenta (as partículas são volumes macroscópicos de fluido que percorrem aleatoriamente grandes distâncias).

b) *Advecção ou (Convecção):* O material é transferido em razão de um movimento preferencial (bem definido) do meio fluido (ou do fluido que compõe o meio) Schulz (2003). A transferência de massa por este meio ocorre quando a massa é transportada entre o contorno de uma superfície e um fluido que se move. Ou entre dois fluidos que se movem quando relativamente imiscíveis, este processo pode ser forçado ou natural, dependendo do gradiente de pressão ou de densidade, respectivamente, do meio Sissom e Pitts (1979).

c) *Dispersão Mecânica e Hidrodinâmica:* De acordo com Fetter (1988, 1999), ao percorrer um caminho, o fluido carregado de partículas haverá o encontro e mistura do fluido sem sólidos dissolvidos, resultado na diluição da concentração desses sólidos ao longo do caminho do fluxo. Este é o processo de dispersão mecânica, podendo ser de dois tipos *longitudinal* (dispersão paralela ao fluxo principal) e *transversal* (dispersão perpendicular ao fluxo principal). A dispersão hidrodinâmica se apresenta como a combinação dos processos de difusão molecular e dispersão mecânica.

3.4.3 *Propriedades Físico-Químicas*

De forma geral, as propriedades físico-químicas e o particionamento entre as diversas fases (líquida, vapor e sólida) dos hidrocarbonetos são influenciados pela pressão e temperatura do ambiente e pelo tipo e quantidade de outras espécies de compostos (Silva, 2002). De acordo com Fetter (1999), uma fase imiscível é formada por vários compostos, possuindo propriedades que refletem a contribuição de todos os hidrocarbonetos existentes, de acordo com suas proporções moleculares, estas propriedades podem influenciar a mobilidade e a retenção dos combustíveis líquidos no solo.

Quanto à solubilidade de hidrocarbonetos em água, considerando que este é um composto solúvel puro, adicionado continuamente a um volume de água, uma fase líquida

orgânica aparecerá, ao ser excedido o limite de solubilidade deste hidrocarboneto (Silva 2002). Esta fase orgânica constituirá a fase imiscível, também denominada fase livre ou NAPL, os hidrocarbonetos que apresentam solubilidade maior são aromáticos leves, como o benzeno, o tolueno, o etilbenzeno e o xileno (Guiguer, 1996 *apud* Silva, 2002).

Com base em vários autores Silva (2002) discute a importância da viscosidade dinâmica ou cinemática, onde esta característica representa a medida da resistência de um fluido ao seu escoamento (resistência ao fluxo) e é aproximadamente paralela à pressão de vapor, recebendo influência direta da temperatura.

A densidade é dada pela razão entre a massa de um determinado volume de uma substância pela massa do mesmo volume de água. Se apresentar valor menor que 1,0 mg/l flutuará na água, caso contrário, se for maior que 1,0 mg/l a substância afundará na água. Na maioria das vezes, quanto maior for o peso molecular e grau de halogenação (Cl, Br), maior será a densidade do composto Silva (2002).

A tensão interfacial é correspondente à energia de contato entre um líquido e outra substância, que pode ser um sólido, um líquido imiscível ou gás. Tal energia, por exemplo, pode ser explicada pela diferença do grau de atração entre as moléculas de uma substância **A** e a superfície de um determinado líquido, quando comparado com o grau de atração entre as moléculas da substância **B** e a superfície do mesmo líquido Fetter, (1999) e Silva (2002).

O ponto de ebulição fornece uma indicação da medida da volatilidade de um fluido, em relação ao ponto de ebulição normal da água (100 °C). Classificada em líquidos com baixo ponto de ebulição (<100 °C) e alto ponto de ebulição (>100 °C). Segundo Cole (1994) *apud* Silva (2002), apenas os produtos derivados de petróleo com alta pressão de vapor apresentarão uma fase vapor, em caso em contato com os poros da zona vadosa ou de aeração do solo.

3.4.4 Indicadores de Campo Para a Contaminação

A importância deste tópico está relacionada a futuros estudos de detalhamento, que podem ocorrer em zonas de maior interesse. Neste sentido o tópico procura abordar os principais indicadores para contaminação do solo por derivados de hidrocarboneto.

Indicadores de contaminação de forma geral são definidos como: *“ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas através de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem (IBGE, 2004)”*.

Ou como *“uma medida quantitativa ou qualitativa que é usada para demonstrar modificações, ou para simplificar a informação, servindo para entender e valorizar fenômenos complexos (INECE, 2011)”*.

Os indicadores ambientais podem representar o estado do ambiente (que não é o mesmo que sustentabilidade ambiental), ou quanto existe de um recurso natural representa um parâmetro que indica qual a sua qualidade. Não indica que parâmetros como a *“quantidade de vegetação”* ou *“qualidade de água”* seja sustentável (CEPAL, 2003), também podemos incluir elementos do meio físico (solo e/ou rocha) como indicadores ambientais.

Segundo Silva (2003), a fase constituída por voláteis, nos hidrocarbonetos derivados de petróleo por terem como características uma grande mobilidade são frequentemente empregadas na detecção de vazamentos. A CETESB, faz uso do equipamento Gastec Inova SV (monitor de vapores de hidrocarbonetos no solo para avaliação de passivos ambientais em postos de combustíveis com leitura até 10.000ppm), para auxiliar na definição de áreas contaminadas com investigações superficiais.

Silva (2005) agrupa indicadores específicos para poluição ocasionada por derivados de petróleo, no caso, tratam se dos compostos que são mais abundantes:

Aromáticos: Presentes na maioria dos tipos de petróleo, porém, em pequena quantidade. No entanto apresentam maior toxicidade (capacidade inerente de um agente causar efeitos adversos em um organismo vivo), maior potencial de migração e maior capacidade de produzir impactos ambientais. Quanto à capacidade de biodegradação é um processo lento, estes compostos estão associados a efeitos crônicos e carcinogênicos. Fazem

parte deste grupo os hidrocarbonetos monoaromáticos, benzeno, tolueno, etilbenzeno e os três xilenos (orto, para e meta), chamados compostos BTEX. Os poluentes com dois ou mais anéis aromáticos são denominados de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), também conhecidos como Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs). São reconhecidos como os principais produtos da combustão incompleta da matéria orgânica, potencialmente perigosos e amplamente distribuídos pelo meio ambiente em forma de misturas complexas, alguns são mutagênicos ou carcinogênicos, com atividade dependente de sua forma molecular, não são biodegradáveis e constituem um grande problema.

Alcanos (parafinas ou alifáticos saturados): Compreendem a maior fração de grande parte dos petróleos explorados, são incolores, relativamente inodoros e pouco reativos, sua toxicidade geralmente é baixa e são facilmente biodegradados.

Alcenos (olefinas): Similar aos anteriores diferindo apenas pela presença de ligação dupla entre os átomos de carbono, geralmente estão ausentes ou aparecem em pequenas quantidades no petróleo, sendo muito abundantes em produtos de refino como a gasolina.

Cicloalcanos (naftas): Sua toxicidade é variável de acordo com a estrutura molecular e são resistentes à biodegradação.

3.4.5 Sistema de Armazenamento Subterrâneo (SAS)

Os sistemas de armazenamento subterrâneo (SAS) consistem em tanques e dutos associados com no mínimo 10% do volume sob a superfície do terreno, possuindo uma bomba que move o produto (geralmente uma substância regulamentada) para a superfície Silva (2006).

O mesmo autor discute que estas substâncias podem apresentar risco à saúde pública ou ao ambiente, dentre estes estão incluídos os derivados de petróleo (combustíveis, solventes, lubrificantes, óleo usado, entre outros) e diversas substâncias perigosas.

Neste contexto podemos denominar os SAS's que armazenam combustíveis de *Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis (SASC)*.

3.4.6 Processos Corrosivos em Sistemas de Armazenamento Subterrâneo de Combustíveis

De acordo com Gentil (2007) a corrosão consiste na deterioração de um material, em geral metálico, devido a ação química e/ou eletroquímica induzida pelo meio, podendo ser ou não associada a esforços mecânicos. Onde a corrosão submetida a um estado de tensão pode ser acelerada.

Morrison (2000) apresenta uma compilação sobre corrosão em SACS, considerando os modelos de tanques implantados nos Estados Unidos da América, antes do ano de 1998, de acordo com o autor, existem diversos modelos, para indicar o início de vazamentos em tanques e como estes ocorrem. As abordagens dentro da temática deste tópico têm como base a propensão de vazamentos a partir de um tanque de aço submetido a processos corrosivos e a defeitos de instalação até 1998, onde a partir disto nos EUA, as normas de instalação para estas estruturas ficaram mais rigorosas.

Segundo Morrison (2000), um estudo patrocinado pelo American Petroleum Institute (API), indicou que a expectativa de vida média dos tanques é de cerca de 15 anos, porém, segundo o estudo a idade é um indicador fraco para avaliar a integridade do tanque, podemos observar na tabela 3.6, os resultados da pesquisa, com a avaliação de 1.717 SASC e sistemas de tubulação que foram identificados com vazamentos, no período de 1977 a 1980.

Morrison (2000) destaca que o estudo realizado pela API, mostrou que os tanques de aço enterrados, têm uma vida útil entre 5 a 45 anos, dependendo da espessura do aço, que pode ser de (0,1 a 0,25 in), também depende do modo de instalação, resistividade do solo, pH do solo, nível do lençol freático, presença de sulfetos, tipo de material usado para o aterramento do tanque e as dimensões do tanque. A presença de alta concentração de sulfetos em conjunto com uma umidade elevada do solo, pode resultar na degradação de derivados de hidrocarbonetos, onde a utilização de materiais deste tipo como sistema de proteção é interessante.

Os processos de corrosão associados podem ser compreendidos em dois grandes grupos, os processos químicos e eletroquímicos Marcus (2002), Sandres (2004) e Gentil (2007).

Neste sentido, segundo Sandres (2004), o processo de corrosão química envolve a ação direta de um meio agressivo, sobre um material metálico, o processo geralmente ocorre sem a presença de água e em temperaturas elevadas, onde a energia é suficiente para propiciar as reações de oxidação. O mesmo autor ressalta que os solos brasileiros apresentam pH normalmente abaixo de 7 devido o processo de lixiviação comum em climas tropicais.

Tabela 3.6. Causas de vazamentos em tanques de aço e tubulações (MORRISON, 2000).

Categoria e causa	Número	% em relação ao total
1. Tanques de Aço		
1.1. Corrosão	775	84,88
1.2. Peças soltas	10	1,09
1.3. Quebras físicas	14	1,53
1.4. Outros	55	6,02
1.5. Desconhecidos ou sem resposta	59	6,46
2. Canalização		
2.1. Corrosão	343	63,51
2.2. Falha em conexões	31	5,74
2.3. Quebra física	34	6,29
2.4. Peças soltas	57	10,55
2.5. Outros	50	9,25
2.6. Desconhecidos ou sem resposta	25	4,62

O pH do solo constitui um indicador do processo corrosivo em SASC, considerando uma estrutura enterrada metálica, uma vez que o pH reagem com um dos produtos formados no ânodo, devido a capacidade de reação dos íons metálicos com o anión OH^- . Ou seja, quanto maior a concentração de H^+ maior também será a quantidade de OH^- que poderá reagir com o íon do metal.

O potencial redox do solo se baseia na ideia de considerar o solo como sendo um metal e realizar a medição do seu potencial de oxirredução. Esta medição é feita com uso de eletrodo de platina.

As amostras de solo obtidas nas sondagens a trado foram selecionadas considerando a parte superior, intermediária e inferior do furo, com intuito de representar os diferentes horizontes próximos às profundidades de assentamento do oleoduto (entre 1,5 a 3,0m). Pannoni (2004) e Alonso e Pannoni (2006) considera que, em condições de pH acima de 6, o solo tende a possuir reduzido potencial de corrosividade, mesmo considerando condições de elevação do nível freático.

Já com relação ao Eh e Potencial Redox, Booth et al. (1967) *apud* Alonso e Pannoni (2006) propõem que valores acima de 400 mV para solos arenosos, e 430 mV para solos argilosos, indicam condições de solo agressivo, com potencial de causar corrosão nas tubulações enterradas.

Pannoni (2004), também destaca que a corrosão pode ser morfológica ou mecânica, a corrosão morfológica desencadeia um processo uniforme (alveolar, esfoliação, placas, intergranular, puntiforme, intragranular, filiforme, gráfitica) em torno de um cordão de solda. A corrosão mecânica, se dá por aeração diferencial ou eletrolítica (corrente de fuga) associada à solicitação de esforços mecânicos, também pode ser denominada de corrosão sob tensão fraturante em torno de um ponto de ligação ou cordão de solda.

A corrosão sobtensão é um mecanismo importante para ser considerado nos SACS, na área de estudos, devido a presença de solos colapsíveis, estes podem fragilizar as estruturas aumentando a susceptibilidade das mesmas à processos corrosivos, além de danificar mecanicamente as estruturas SACS.

Segundo Videla (1988), a corrosão pode ser influenciada pela ação de microrganismos, classificada como corrosão induzida microbiologicamente (CIM). Este tipo está associado ao processo de corrosão eletroquímica, onde, nos dois casos, pode-se observar uma região anódica desenvolvendo um processo de oxidação. Levando a dissolução do metal (corrosão) e concomitantemente uma redução de algum componente do meio a partir de uma reação catódica. Podemos destacar a ação de fungos, algas e principalmente bactérias neste processo.

3.4.7 Principais Métodos de Remediação

Para uma contextualização de como o problema abordado nesta dissertação pode ser resolvido, destacamos aqui alguns métodos para remediar a contaminação gerada por vazamentos em postos de combustíveis:

Processos Oxidativos Avançados: Nos últimos anos, os processos oxidativos avançados (POAs) têm aparecido como uma excelente alternativa para o tratamento de resíduos, principalmente em razão da sua elevada eficiência de degradação frente a substratos resistentes.

O processo, fundamentado na geração do radical hidroxila (HO^\cdot) fortemente oxidante, permite a rápida e indiscriminada degradação de uma grande variedade de compostos orgânicos, muitas vezes permitindo a sua completa mineralização Tiburtius et al, (2005). O contaminante é degradado por meio de uma série de reações químicas, tendo como produtos finais CO_2 , H_2O e íons inorgânicos. A oxidação química é um processo rápido, quando comparado aos processos biológicos, porém, a matriz do solo é modificada pela ação dos agentes oxidantes, fator que não ocorre nos processos biológicos CETEM (2008).

Biorremediação: Visa o desenvolvimento de mecanismos para estimular o crescimento e a reprodução de microrganismos necessários para a biodegradação dos contaminantes no solo CETEM (2008). Segundo os mesmos autores dentro desta técnica podemos utilizar os métodos *Air Sparging* em conjunto com extração de vapores e fitorremediação.

Air Sparging consiste em uma técnica para remoção de compostos voláteis (VOC) do solo contaminado por meio da indução de um fluxo de ar no aquífero e posterior remoção de contaminantes por volatilização. Constituintes voláteis são extraídos por meio de poços (horizontais ou verticais), o vapor extraído é tratado com carvão ativado (adsorção dos hidrocarbonetos voláteis presentes nas correntes de vapores).

A *Fitorremediação* consiste na utilização de sistemas vegetais (árvores, arbustos, plantas aquáticas) resistentes ao contaminante para com sua microbiota remover, degradar ou isolar substâncias tóxicas do ambiente, tem como principal vantagem o baixo custo e desvantagem o tempo. Para contaminantes derivados de hidrocarbonetos são utilizados vegetais que estimulam os microorganismos do gênero *rizosphere*. O processo pode ser acelerado com a inoculação de microorganismos apropriados com capacidade de degradar o poluente.

Barreira Reativa Permeável: Segundo Lourenço (2006) consiste no lançamento de um material reativo no subsolo, projetado para interceptar uma pluma contaminante, garante uma trajetória de fluxo pelo meio reativo (aeróbico ou anaeróbico), transformando os contaminantes em uma forma ambientalmente aceitável (figura 3.10).

A remediação ocorre à jusante da barreira, propiciando a descoloração reductiva de hidrocarbonetos, acelerando taxas de degradação. Nestas barreiras ocorrem reações Redox, onde o hidrocarboneto é oxidado (doador de elétron) e um aceptor de elétron é reduzido. Aceptores de elétrons - Oxigênio, Nitrato, Óxidos de Fe^{+3} , entre outros.

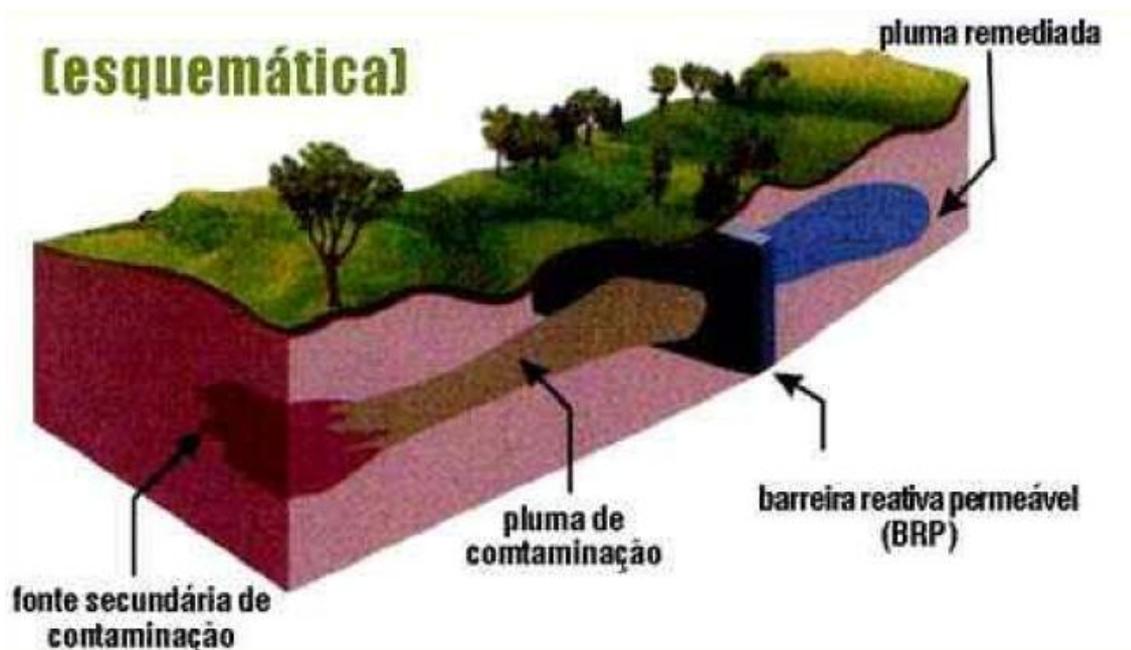


Figura 3.10. Esquema de barreira reativa permeável (LOURENÇO, 2006).

Remediação Intrínseca: Como exposto por Tarozo (2005) este método também é conhecido como atenuação natural ou remediação passiva, consiste na recuperação natural da matriz ambiental por processos biológicos (biodegradação aeróbica e anaeróbica). Processos físicos (dispersão, difusão, diluição por recarga e volatilização) ou processos químicos (absorção química e reações abióticas), os quais reduzem a concentração do poluente (hidrocarboneto) no ambiente dissolvido em água natural.

Foto-Remediação: Segundo Tarozo (2005) o método utiliza a degradação fotoquímica dos derivados de hidrocarbonetos. Os compostos aromáticos são mais sensíveis à foto-oxidação. A posição e a quantidade de substituintes no anel aromático influenciam no processo de degradação. Quatro processos podem ser citados neste método:

- 1) Transferência de energia de estados eletronicamente excitados de compostos aromáticos e polares para oxigênio molecular gerando oxigênio singlete.
- 2) Fotodimerização de hidrocarbonetos poliaromáticos.
- 3) Auto oxidação induzida por radicais livre gera fotoprodutos.
- 4) Transferência de elétrons que inicia oxigenações.

Aplicação de Turfa - *Sphag Sorb*: De acordo com Andrade (2007) o método consiste na ação de reações redox, onde o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} por um grupo quinona oxidado presente no ácido húmico (AH). Ajuda a traçar o destino e a permanência de poluentes orgânicos e inorgânicos no ambiente, determinando a mobilização e a retenção de metais tóxicos e hidrocarbonetos.

Os grupos funcionais quinonas, presentes em concentração elevada nas substâncias húmicas são os principais responsáveis pela atividade redox, agindo nos ácidos húmicos. Este método é bastante eficiente para remediação imediata, de caráter emergencial, de contaminações que ocorrem em água.

3.5 Legislação Relacionada

Podemos relacionar uma série de normas e leis brasileiras, que fazem referência ao tipo de poluição abordada neste trabalho, análise de vulnerabilidade de recursos hídricos e assuntos relacionados ao meio ambiente.

3.5.1 Quanto à Análise de Vulnerabilidade e Recursos Hídricos

Podemos citar a Lei Federal no. 9433/97, intitulada - Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Esta lei foi um marco para a normatização de instrumentos de gestão, tanto no Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) quanto no do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Também é oportuno citar a resolução nº 396/2008 do CONAMA, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências e a Resolução nº 420/2009 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas, estas resoluções são interessantes pois ambas incorporam aspectos relacionadas à avaliação da vulnerabilidade de aquífero.

Podemos citar de forma específica o Artigo nº 20 da resolução CONAMA Nº 396/2008, onde o mesmo determina que os órgãos ambientais, em conjunto com os órgãos gestores dos recursos hídricos, promovam a implementação de áreas de proteção de aquíferos e, perímetros de proteção de poços de abastecimento, objetivando a proteção da qualidade da água subterrânea. Na mesma resolução, no Capítulo V que trata das diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, Artigo nº. 29, Inciso II, é determinado que se efetue “a caracterização da vulnerabilidade e dos riscos de poluição dos aquíferos.

3.5.2 *Quanto ao Poluente*

Citamos primeiramente a Lei Federal 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, com seus fins, mecanismos de formulação, aplicação e estrutura do SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente. A Lei Federal 7.347/85 disciplina a Ação Civil Pública de responsabilidade causada por danos imprimidos ao meio ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico.

De caráter mais específico a Lei Federal 9.966/00 dispõe sobre a prevenção, controle e fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências.

O Decreto Federal 24.643/34 institui o Código das Águas, estabelecendo definições e regras gerais sobre o uso da água no território nacional. Já o Decreto Federal 79.367/77 dispõe sobre o padrão de potabilidade da água.

Lei Federal nº 9.478/97 - Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.

A Lei Federal 9.605/98, atua no âmbito de Crimes Ambientais, dispondo sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, sendo que a medida provisória 2.163-41 acrescenta dispositivos a esta Lei. O Decreto Federal 3.179/99 dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

No âmbito das resoluções do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), podemos citar, a resolução CONAMA 05/93, dispondo sobre os procedimentos mínimos para o gerenciamento de resíduos sólidos ou lixo, objetivando a preservação da saúde pública e a qualidade do meio ambiente.

A resolução CONAMA 09/93 estabelece que todo óleo lubrificante, usado contaminado, será obrigatoriamente recolhido e terá uma destinação adequada, de forma a não afetar negativamente o meio ambiente, a Resolução CONAMA 237/97 efetiva a utilização do

sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente.

A resolução CONAMA 273/00 estabelece que a localização, construção, instalação, modificação, ampliação e a operação de postos revendedores de combustíveis, instalações de sistemas ratalhistas, e postos flutuantes de combustíveis dependerão do prévio licenciamento do órgão ambiental competente.

A Resolução CONAMA 357/05 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

Podemos ainda citar a Portaria MS 518/2004 do Ministério da Saúde que dispõe sobre os padrões de potabilidade da água e a Norma ABNT NBR 10004/2004 que fala sobre a Classificação de Resíduos sólidos.

Por fim citamos que a atividade de revenda de combustíveis para automóveis depende da obtenção de registro e autorização de funcionamento, junto à Agência Nacional do Petróleo – ANP. Sendo está uma autarquia especial, integrante da Administração Federal indireta e vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída pela Lei nº 9.478/97 como órgão regulador da indústria do petróleo. A Portaria ANP n.º 116/00, constituiu um completo manual para obter autorização para revender combustíveis.

3.6 Utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Michalak (1993) destaca o uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG), em planejamentos abrangendo uma grande série de aplicações, incluindo inventário e gestão de recursos diversos, avaliação de capacidade de usos, estoque de habitações, instalações de serviços de localização, infraestrutura de planejamento e avaliação de impacto ambiental.

Sistemas de informações espaciais ou geográficos como foram definidos acima, constituem uma abordagem útil para a integração, manipulação e visualização de grandes quantidades de informação espacializadas em uma área Freitas e Tagliani (2009). Recentemente se firmou não somente como um sistema de comprovada eficiência, mas

também um campo de estudos e avanços científicos, o SIG possui uma capacidade multi escala que permite rápida integração e análise de um grande número de atributos de diferentes fontes, também possui grande facilidade de partilha de dados, atualização, geração e comparação de alternativas de gestão de diversos cenários Freitas e Tagliani (2009).

Os mesmos autores apresentam o SIG como uma importante ferramenta de gerenciamento de dados. Suportando bancos de dados espacializados e georreferenciados, tornando-se uma ferramenta muito importante para mapeamentos temáticos, rápida tomada de decisões assim como a realização de análises multicritérios. O sistema também permite rápida saída de visualização e impressão em diversas escalas. No presente trabalho será utilizado o software ArgGis 9.3, como plataforma de trabalho SIG, devido a alta eficiência do produto e o departamento possuir licença para a utilização do software em pesquisa.

Decidiu-se por utilizar o método de interpolação *Spline*, do módulo *Spatial Analyst*, para interpolar a análise de vulnerabilidade pelo método GOD, devido a eficiência do método.

De acordo com a ESRI, a forma básica do método *Spline* está baseada na interpolação por uma mínima curvatura, impondo duas condições: **a)** a superfície deve passar exatamente através dos pontos que representam os dados; **b)** a superfície gerada deve ter uma curvatura mínima, representando a soma dos quadrados dos termos da segunda derivada relativa à superfície. A técnica básica do método *Spline* é conhecida como interpolação *placa fina*, garantindo uma superfície (contínua e diferenciável) lisa, juntamente com a primeira derivada contínua da superfície. A opção regularizada modifica os critérios de minimização para a terceira derivada, onde os termos são incorporados aos critérios de minimização. Utilizar valores que variam entre 0 e 0,5 são adequados. Usando a opção de regularização, garantimos uma superfície lisa e suave. Esta técnica é útil se a segunda derivada da superfície interpolada precisa ser calculada. A opção tensão, tem como característica modificar os critérios de minimização. O peso “argumento” especifica o valor atribuído aos termos de primeira derivada durante o processo de minimização, conhecido como *phi* na literatura. Um peso de zero resulta na interpolação *Spline* relativa à placa fina, consistindo na técnica mais básica. Usando um maior valor de peso, reduzimos a rigidez da placa, e o limite em que se aproxima do infinito “*phi*”, a superfície interpolada se aproxima da forma de uma membrana, ou folhas de borracha, que passam pelos pontos. A superfície interpolada é boa, possuindo uma ótima qualidade, as primeiras derivadas são contínuas, mas não suaves.

4. MATERIAIS, MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA

4.1 Materiais

Para a realização da presente pesquisa foram utilizados documentos cartográficos, fotos aéreas, equipamentos de campo e laboratoriais e softwares, o detalhamento dos materiais pode ser observado na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Materiais utilizados na pesquisa.

Documentos cartográficos IGC - 1:10.000 (código das folhas)	SF-23- Y-A-I-1-NO-B; SF-23- Y-A-I-1-NE-A; SF-23 Y-A-I-1-NO-D; SF-23-V-C-IV-3-SO-F; SF-23- V-C-IV-3-SE-E; SF-23- Y-A-I-1-NE-C.
Fotografias aéreas do ano 2000 escala - 1:30.000 (código)	FX049-86; FX049-88; FX049-89; FX050-86; FX050-88; FX050-89; FX511-50; FX511-53.
Principais equipamentos utilizados	GPS Garmin 76S; máquina fotográfica digital Sony; scanner tamanho A3; sacos plásticos (20 x 40 cm; 50 x 70 cm); anéis de PVC (7,45 x 4,65 cm, 4,5 x 2,5 cm); equipamentos diversos no laboratório de mecânica dos solos.
Principais softwares utilizados	ArcGIS 9.3; pacote de softwares Microsoft Office.

4.2 Métodos e Etapas da Pesquisa

Como pode ser observado na figura 4.1, as etapas da pesquisa se deram segundo a sequência: planejamento; aquisição de dados; avaliação e compilação dos dados; preparação da base topográfica, compreendendo a geração dos modelos digitais do terreno; conferência do modelo segundo o erro RMS e foto interpretação.

Posteriormente, procedeu-se com a etapa de campo sistemático, análises laboratoriais de amostras coletadas em campo, após isto, foi feita uma integração e análise em SIG, utilizando o software ArcGIS 9.3.

Foram definidas as unidades litológicas, solos e o mapa de topo da superfície do aquífero (potenciométrico). Posteriormente, foi gerado o mapa de vulnerabilidade do topo do lençol freático, utilizando o método GOD.

Seguiu-se com a caracterização das unidades geológicas conforme os parâmetros geotécnicos selecionados. Após isto, seguiram as etapas de identificação e caracterização dos condicionantes geológico-geotécnicos à deflagração da contaminação em estruturas enterradas, que estão presentes nos postos de combustíveis.

Após estas fases concluídas procedeu-se com uma análise integrada da vulnerabilidade versus os condicionantes geológico-geotécnicos. E separadamente foi feita uma análise simplificada da vulnerabilidade de recursos hídricos superficiais.

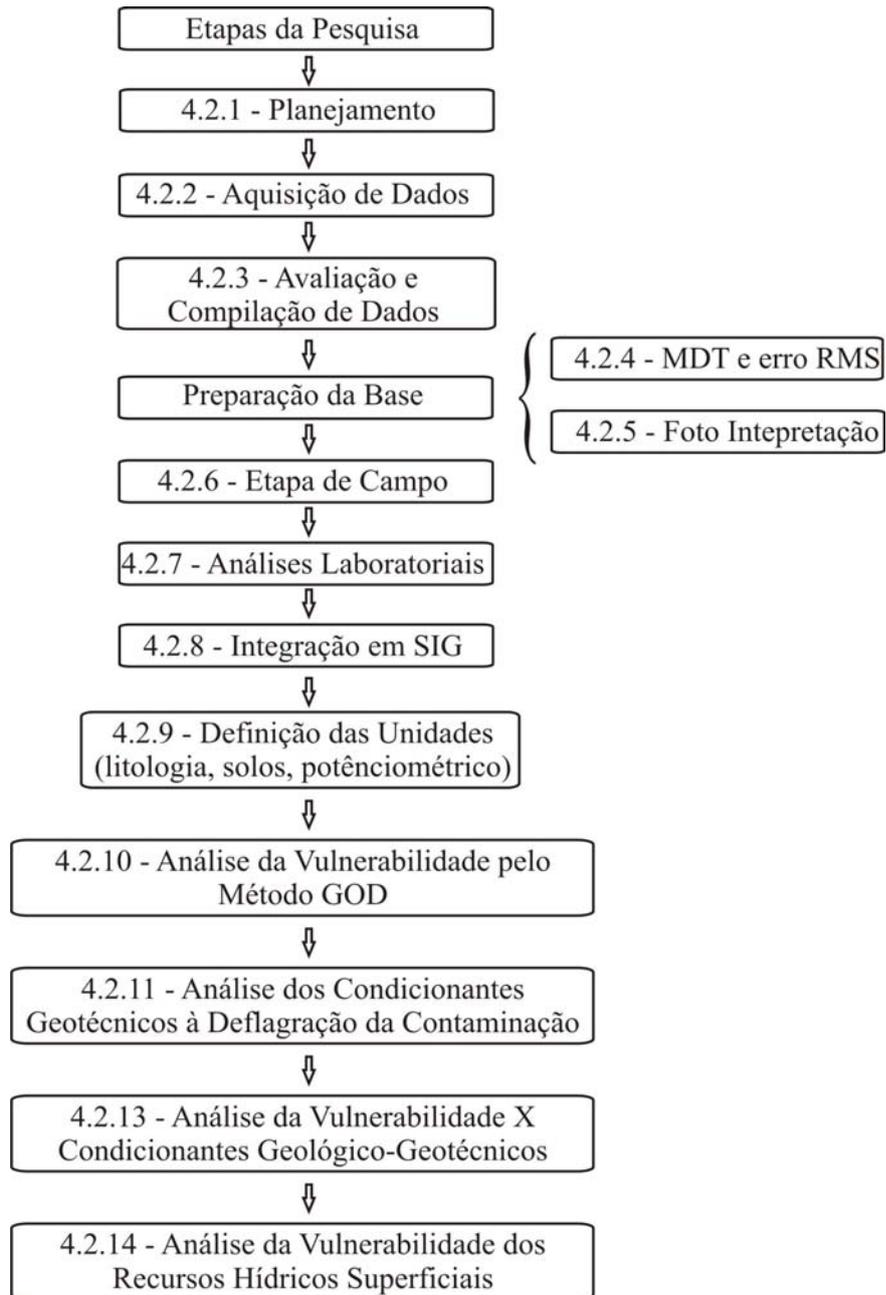


Figura 4.1. Fluxograma com as etapas da pesquisa.

4.2.1 Planejamento

Consiste na análise preliminar da problemática em foco, considerando a distribuição dos postos de combustíveis no município de São Carlos (SP). Análise dos trabalhos anteriores realizados na área até o momento e a definição da área de estudos.

Organização dos materiais disponíveis como mapas, documentos e informações inerentes ao trabalho proposto. Verificação da viabilidade da pesquisa, considerando a temática proposta, estrutura do departamento e o tempo, com posterior elaboração do projeto de pesquisa e cronograma de execução.

4.2.2 Aquisição de Dados (Diretos e Indiretos)

Foi realizada uma revisão bibliográfica, abordando o estado atual da área no que se referem ao meio físico (pedológico, geológico, geotécnico e geomorfológico), características geotécnicas, compilação de dados indiretos, informações do meio socioeconômico, visando uma contextualização da importância econômica e social do estudo. Revisão sobre os conceitos teóricos fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa, abordados no item três.

4.2.3 Avaliação e Compilação de Dados

Os produtos cartográficos definitivos são integrados com as informações laboratoriais, e cruzados com as informações bibliográficas, fornecendo subsídio à análise e as interpretações dos dados de forma mais consistente, utilizando como base o mapa geotécnico gerado.

Posteriormente, procede-se à análise de vulnerabilidade utilizando o método GOD. Com os dados interpretados, procede-se a discussão quanto à capacidade do método em refletir a vulnerabilidade intrínseca que cada unidade geotécnica possui frente à contaminação dos recursos hídricos derivada de postos de combustíveis, tendo como referência os fatores condicionantes desta contaminação nas unidades.

A compilação dos dados foi feita em planilha utilizando o software Excel da Microsoft, podendo ser integrada no software ArcGIS 9.3, os dados serão apresentados no capítulo sobre resultados e discussões de forma estatística e no mapa de documentação.

4.2.4 Preparação da Base (Geração do Modelo Digital do Terreno (MDT) e Cálculo do Erro RMS)

A partir da digitalização das curvas de nível das bases topográficas no software ArcGIS 9.3, foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT), para a área de estudos. Utilizando o método de interpolação que considera as curvas de nível (espaçadas de 5m), os pontos cotados e o sentido da rede de drenagem. O método dentro do software está disponível no comando “*topo to raster by file*” ou “*topo to raster*” do módulo 3D Analyst. O espaçamento utilizado (grid), na interpolação foi de 3,5 metros.

Posteriormente o MDT foi testado, com a obtenção do erro RMS (*Root Mean Square*), o valor representa a quantidade de erro entre as localidades de uma coordenada original e a nova, calculada após o processo de geração do MDT, quanto menor o valor do erro RMS, mais preciso foi o processo de digitalização e a geração do MDT, segundo a ESRI. A escala adotada para o levantamento de dados do trabalho foi de 1:10.000 com um erro admissível de 0,5 metros. No entanto a escala para apresentação dos dados foi determinada em 1:25.000, devido a melhor facilidade de representação cartográfica para o tamanho da área, nesta escala o erro cartográfico admissível é de 5 metros.

O cálculo do erro é feito após a geração do MDT, com a criação de uma malha de pontos, no caso foram criados 139 pontos (n), a malha de pontos pode ser observada na figura 4.2. O mínimo de pontos indicados para este tipo de análise é de 30. A amostragem se deu em uma malha semirregular, com os pontos plotados em cima de curvas de nível ou pontos cotados da base topográfica, onde foram extraídos com exatidão os valores originais, posteriormente foram extraídos os valores de altitude do MDT, e o erro foi calculado utilizando a equação 4.1:

$$\text{eq. 4.1.} \quad \text{RMS ERROR} = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}{n}}$$

Onde, n = número de pontos considerados na análise, e = diferença em metros do valor cotado original e do final.

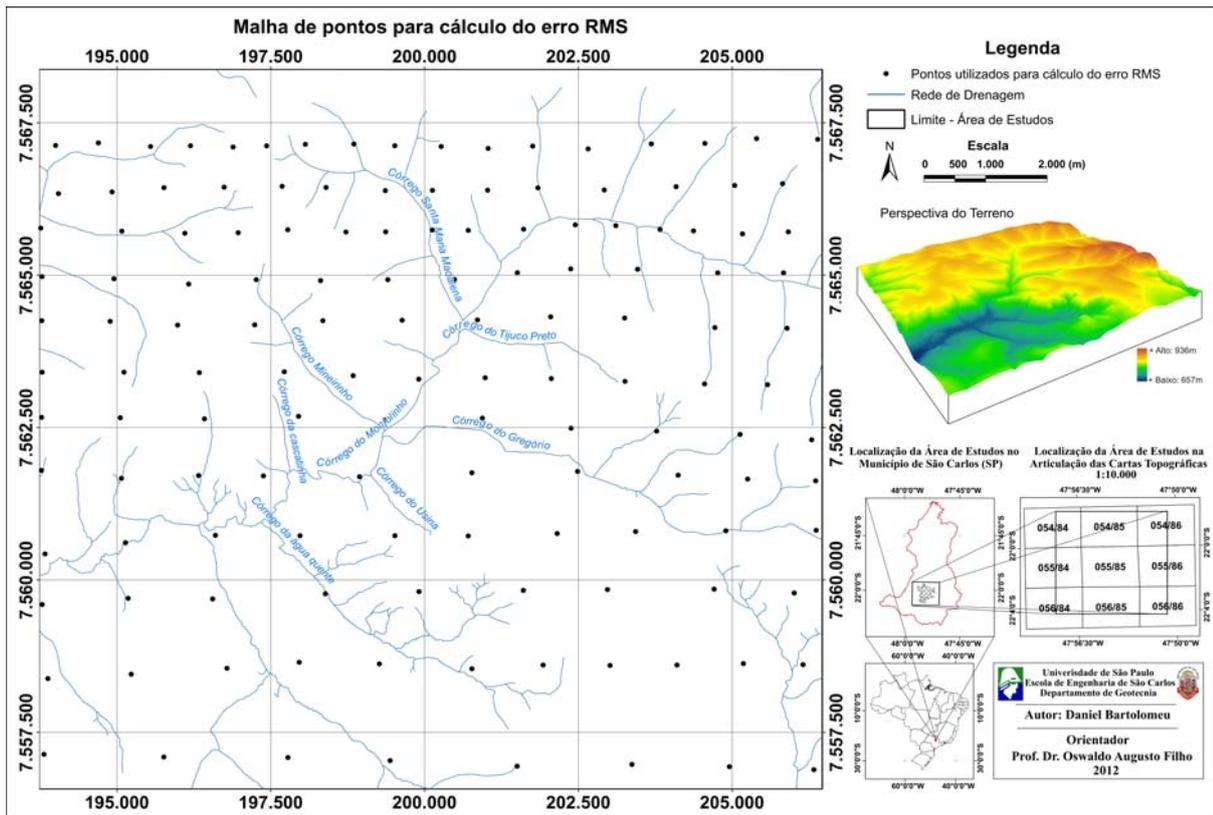


Figura 4.2. Malha de pontos adotada para cálculo do erro RMS.

4.2.5 Preparação da Base (Foto Interpretação)

A foto interpretação foi baseada nos conceitos expostos por Soares e Fiori (1976), utilizando fotografias áreas na escala 1:30.000 e estereoscópios de bolso e espelho da marca Zeiss. Dessa forma a foto interpretação se deu em três etapas:

Fotoleitura: Objetivando o reconhecimento e identificação dos elementos das imagens com os objetos correspondentes e sua repartição.

Foto Análise: Objetivando o estudo das relações entre as imagens, associação e ordenação das partes de imagem.

Fotointerpretação: Objetivando o estudo da imagem fotográfica visando a descoberta e avaliação, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos correspondentes às imagens.

Como feições texturais interessantes para este estudo com base em Soares e Fiori (1976) pode se destacar: elementos de drenagem, superfícies de relevo (quebras positivas e negativas) e formas e limites de vertente, constituindo a propriedade fundamental na análise da imagem o que permite separar feições com significado diferente ou associar feições com o mesmo significado dado por condições naturais. Tais feições no presente trabalho foram definidas, voltadas para delimitar as grandes unidades Geotécnicas em escala 1:25.000.

4.2.6 Etapas de Campo

Para o levantamento de campo, foram adotadas duas etapas, uma de caráter preliminar e um levantamento sistemático. Na etapa de campo preliminar foram realizadas saídas campos de reconhecimento e levantamento prévio. Com os dados obtidos foi possível proceder com uma nova foto interpretação da área. Com base nas observações de campo nesta etapa e na revisão apresentada no item três (Fundamentação Teórica), foram elaboradas fichas de campo, para a etapa de campo sistemática.

A ficha de campo que pode ser observada nas figuras 4.3 e 4.4, foi elaborada com o intuito de realizar uma descrição mais completa de alguns afloramentos e utilização em pontos de amostragem. A ficha da figura 4.5, tem a finalidade de otimizar a descrição de pontos de controle.

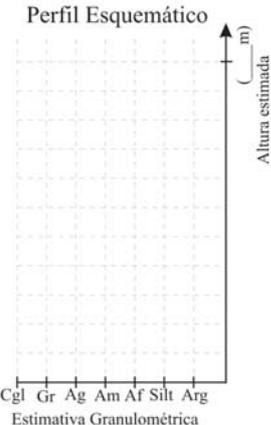
FICHA DE CAMPO - Mapeamento Geológico-Geotécnico - Mestrando: Daniel Bartolomeu		
Data: ___ / ___ / 2011	Ponto: _____	Tipo: Ponto com Descrição Detalhada
GPS: X: _____ Y: _____ Z: _____	Local: _____	
GEOLOGIA: <input type="checkbox"/> Fm. Botucatu <input type="checkbox"/> Fm. Serra Geral <input type="checkbox"/> Gr. Bauru <input type="checkbox"/> Aluvião <input type="checkbox"/> Colúvio Descrição Faciológica: _____ _____ _____		
Estruturas: <input type="checkbox"/> Fraturas <input type="checkbox"/> Falha (s) <input type="checkbox"/> Estratificação Cruzada <input type="checkbox"/> Outra: _____ Descrição Tipológica: _____ _____		
GEOMORFOLOGIA: Forma de Relevo: <input type="checkbox"/> Crista <input type="checkbox"/> Colina <input type="checkbox"/> Ampla <input type="checkbox"/> Vertente <input type="checkbox"/> Côncava (o) <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Talude <input type="checkbox"/> Convexa (o) <input type="checkbox"/> Dissecada <input type="checkbox"/> Retilínea (o) <input type="checkbox"/> Terraço Fluvial <input type="checkbox"/> Leque Coluvial <input type="checkbox"/> Leque Aluvial <input type="checkbox"/> Dique Marginal <input type="checkbox"/> Meandro Abandonado <input type="checkbox"/> Depósito de Morfologia Indistinta <input type="checkbox"/> Outro: _____		
Processos: <input type="checkbox"/> Rastejo <input type="checkbox"/> Escorregamento <input type="checkbox"/> Queda de Bloco <input type="checkbox"/> Inundação <input type="checkbox"/> Erosão <input type="checkbox"/> Laminar <input type="checkbox"/> Sulco <input type="checkbox"/> Linear <input type="checkbox"/> Ravina <input type="checkbox"/> Vossoroça		
Descrição: _____ _____ _____		
SOLOS: <input type="checkbox"/> S1 - S. Residual Maduro <input type="checkbox"/> S2 - S. Residual Jovem <input type="checkbox"/> R3 - R. Alterada Mole <input type="checkbox"/> R2 - R. Alterada Dura <input type="checkbox"/> R1 - R. Sã <input type="checkbox"/> AL - Aluvião <input type="checkbox"/> TR - Terraço Fluvial <input type="checkbox"/> CO - Colúvio <input type="checkbox"/> TT - Tálus <input type="checkbox"/> SM - Sed. Marinhos <input type="checkbox"/> SO - Solos Eólicos <small>Vaz (1996)</small>	Descrição: _____ _____	Perfil Esquemático 
INDICADORES DE CAMPO P/ CONTAMINAÇÃO: Solo/Rocha: <input type="checkbox"/> Ausente <input type="checkbox"/> Odor <input type="checkbox"/> Manchas no Solo ou Fraturas <input type="checkbox"/> Folhagens ou Gramíneas Mortas Água Superficial: <input type="checkbox"/> Ausente <input type="checkbox"/> Odor <input type="checkbox"/> Manchas de Óleo <input type="checkbox"/> Maior Viscosidade Descrição: _____ _____		
USO: <input type="checkbox"/> Zona Urbana <input type="checkbox"/> Zona de Expansão → <input type="checkbox"/> Canavial <input type="checkbox"/> Pastagem <input type="checkbox"/> Laranjal <input type="checkbox"/> Outro: _____		
DOCUMENTAÇÃO ESQUEMÁTICA: <input type="checkbox"/> Perfil <input type="checkbox"/> Fotos: n° _____ <small>(verso)</small>		

Figura 4.3. Ficha de campo detalhada (frente).

Data: ____ / ____ / 2011	Ponto: _____	GPS: X: _____	Y: _____	Z: _____
GEOLOGIA: <input type="checkbox"/> Fm. Botucatu <input type="checkbox"/> Fm. Serra Geral <input type="checkbox"/> Gr. Bauru <input type="checkbox"/> Aluvião <input type="checkbox"/> Colúvio Estruturas: <input type="checkbox"/> Fraturas <input type="checkbox"/> Falha (s) <input type="checkbox"/> Estratificação Cruzada <input type="checkbox"/> Outra: _____ Descrição: _____				
GEOMORFOLOGIA: Forma de Relevo: <input type="checkbox"/> Terraço Fluvial <input type="checkbox"/> Leque Colúvio <input type="checkbox"/> Leque Aluvial <input type="checkbox"/> Colina <input type="checkbox"/> Ampla <input type="checkbox"/> Média <input type="checkbox"/> Dissecada <input type="checkbox"/> Vertente <input type="checkbox"/> Talude <input type="checkbox"/> Côncava (o) <input type="checkbox"/> Convexa (o) <input type="checkbox"/> Retilínea (o) <input type="checkbox"/> Dique Marginal <input type="checkbox"/> Outro: _____ <input type="checkbox"/> Meandro Abandonado <input type="checkbox"/> Depósito de Morfologia Indistinta Processos: <input type="checkbox"/> Rastejo <input type="checkbox"/> Escorregamento <input type="checkbox"/> Queda de Bloco <input type="checkbox"/> Inundação <input type="checkbox"/> Erosão <input type="checkbox"/> Laminar <input type="checkbox"/> Linear <input type="checkbox"/> Sulco <input type="checkbox"/> Ravina <input type="checkbox"/> Vossoroca Descrição: _____				
SOLOS: <input type="checkbox"/> S1 - S. Residual Maduro <input type="checkbox"/> R3 - R. Alterada Mole <input type="checkbox"/> R1 - R. Sã <input type="checkbox"/> TR - Terraço Fluvial <input type="checkbox"/> TT - Tálus <small>Vaz (1996)</small> <input type="checkbox"/> S2 - S. Residual Jovem <input type="checkbox"/> R2 - R. Alterada Dura <input type="checkbox"/> AL - Aluvião <input type="checkbox"/> CO - Colúvio <input type="checkbox"/> Outro: _____ Descrição: _____				
INDICADORES DE CAMPO P/ CONTAMINAÇÃO: Solo/Rocha: <input type="checkbox"/> Ausente <input type="checkbox"/> Odor <input type="checkbox"/> Manchas no Solo ou Fraturas <input type="checkbox"/> Folhagens ou Gramíneas Mortas Água Superficial: <input type="checkbox"/> Ausente <input type="checkbox"/> Odor <input type="checkbox"/> Manchas de Óleo <input type="checkbox"/> Maior Viscosidade Descrição: _____				
USO: <input type="checkbox"/> Zona Urbana <input type="checkbox"/> Zona de Expansão → <input type="checkbox"/> Canavial <input type="checkbox"/> Pastagem <input type="checkbox"/> Laranjal <input type="checkbox"/> Outro: _____				
DOCUMENTAÇÃO ESQUEMÁTICA: <input type="checkbox"/> Fotos: nº _____				

Figura 4.5. Ficha de campo para pontos de controle.

Na campanha de campo sistemática também foi realizada a coleta de amostras. Os locais de amostragem foram selecionados de forma a complementar as amostragens e ensaios geotécnicos já realizados por outros trabalhos de mapeamento geotécnico na área de estudos. A campanha de campo teve como foco o reconhecimento das características do meio físico, com descrição em campo dos solos e relações genéticas. As descrições dos perfis de alteração, feitas conforme indicado por Vaz (1996).

O material litológico de natureza sedimentar foi caracterizado no campo por meio da observação e descrição das fácies sedimentares, mineralogia e granulometria classificando o tipo de rocha e a unidade geológica a qual pertence seguindo as indicações em Suguio (1980), Tucker (1982) e Suguio (2003).

As rochas ígneas foram classificadas conforme a textura, estrutura e mineralogia determinando o tipo de rocha e a unidade geológica a qual pertence segundo os parâmetros disponíveis em Wernick (2004).

4.2.7 Análises Laboratoriais

O material representativo das unidades geotécnicas definidas no trabalho foi caracterizado conforme suas propriedades de interesse para a pesquisa, priorizando a granulometria do material, índice de vazios, limites de plasticidade e liquidez, seguindo as indicações de Nogueira (2005), NBR-7181/ABNT, NBR-6459/ABNT, NBR-7180/ABNT.

4.2.8 Integração em SIG

Está etapa foi realizada, focando o cruzamento e a conferência dos dados levantados, a partir da estruturação de um banco de dados em planilha do Excel. As informações de campo foram plotadas no software ArcGIS 9.3, onde foi possível integrar diferentes camadas de informação, posteriormente procedendo com uma análise da coerência das informações.

4.2.9 Definição e Caracterização das Unidades Geológico-Geotécnicas

O mapeamento geológico-geotécnico realizado se baseia principalmente nos conceitos apresentados por Cerri et al., (1996) e Zaine (2000). Os conceitos foram adaptados conforme o método aplicado pela EESC/USP/São Carlos Zuquette (1987), e Zuquette (1987). A partir dos quais foram mapeadas as unidades litológicas e de alteração intempérica, tomando como base os limites litológicos para a delimitação dos compartimentos geotécnicos. As unidades menores foram delimitadas com base na ocorrência dos materiais de alteração intempérica, que têm uma ocorrência significativa e mapeável, também foram considerados os ensaios de laboratório disponíveis (dados primários e secundários).

Cada uma das unidades geológicas-geotécnicas definidas foram descritas e caracterizadas pelos atributos litologia, tpo de solo e posição do nível d'água, que são os atributos utilizados pelo método GOD. Alguns parâmetros a mais estão sendo incluídos, devido a existência destes no local de estudos, como a tendência do comportamento a apresentar colapsividade dos solos.

Os ensaios de caracterização utilizados a fim de atingir os objetivos foram: índices físicos, granulometria e índices de vazios. A caracterização do meio físico deve permitir o entendimento por quem está procedendo com a análise de como será a capacidade de suporte dos comportamentos geológicos, frente a ótica geotécnica.

Os dados foram trabalhados em plataforma SIG, e cada compartimento geológico-geotécnico, individualizado com suas características típicas. O produto final passou por uma conferência de campo e uma análise da consistência dos dados, considerando a qualidade e consistência dos dados seguiu-se com a próxima fase.

Foi realizado o cadastro das possíveis fontes de poluição e análise dos contaminantes. Esta fase teve como foco a toxicidade para o ser humano e ambiente, assim como a periculosidade e comportamento no meio físico.

Posteriormente foi realizada a análise da vulnerabilidade intrínseca frente a uma previsão de ocorrer à poluição, ou seja, a vulnerabilidade que cada compartimento geológico-geotécnico possui frente à deflagração de um vazamento em posto de combustível.

Também foi realizada a avaliação da colapsividade do solo naquele local, cruzando com dados históricos de chuvas para a região e a possíveis dados relativos ao fenômeno que tenha sido registrado nas imediações.

Sendo possível realizar uma análise consistente, considerando as características geológicas e geotécnicas da área de estudos cruzando com os dados referentes ao contaminante.

4.2.10 Análise de Vulnerabilidade Utilizando o Método GOD

O método GOD utilizado se baseia na obra de Foster et al. (2006). Foi aplicado um sistema de avaliação, que pode ser observado na figura 4.6, foi considerado o grau de confinamento da água subterrânea, ocorrência dos estratos de cobertura, nível freático do aquífero, chegando ao índice de vulnerabilidade.

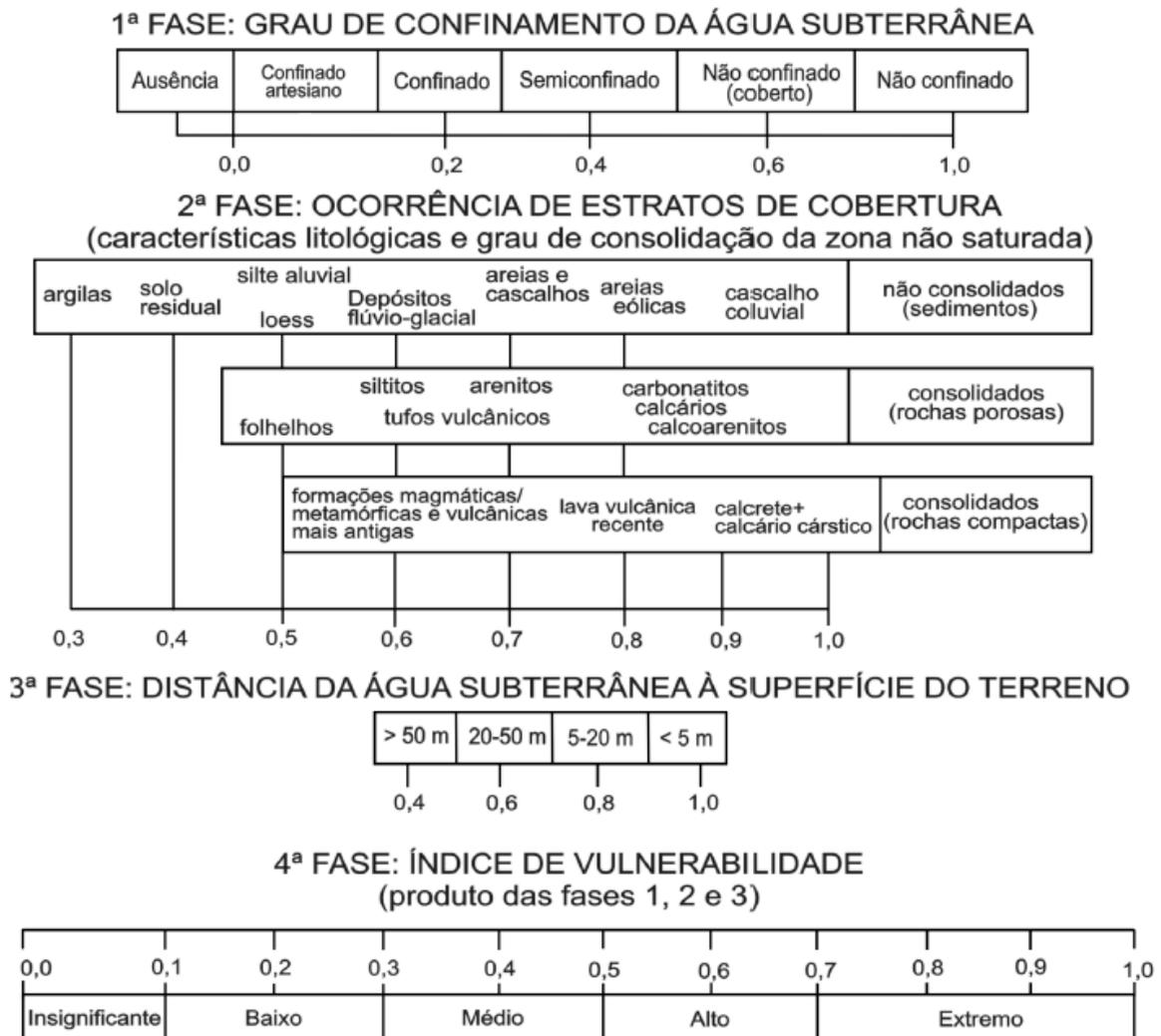


Figura 4.6. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade de recursos hídricos subterrâneos. Traduzido de Foster et al. (2006) por Tavares et al. (2009).

Na figura 4.7 observamos de forma esquemática como o método funciona, considerando as três camadas de informação citadas a cima. Sendo a primeira camada no modelo proposto, a ocorrência das águas subterrâneas, considerando um aquífero semi confinado (peso 0,4) e aquífero confinado (peso 1). A baixo observa-se a classificação do aquífero, com a ilustração de formações geológicas magmáticas, metamórficas e vulcânicas antigas (peso 0,6) e areias eólicas (pelo 0,8).

A ultima camada faz referência à profundidade do topo do aquífero. Posteriormente os pesos são multiplicados, sempre mantendo o mesmo ponto de referência na vertical, chegando

ao índice de vulnerabilidade no ponto, que se refere à vulnerabilidade do topo do lençol freático à poluição.

A análise de vulnerabilidade foi feita utilizando uma malha de pontos, cobrindo as diferentes unidades que aparecem na área de estudos. Para a interpolação dos pontos de análise pelo método GOD, foi escolhido o método no ArcGIS 9.3, de nome *Spline*. Segundo Marcuzzo et al. (2010) este método estima valores utilizando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada, sendo um método muito eficiente para proceder com o tipo de análise proposto.

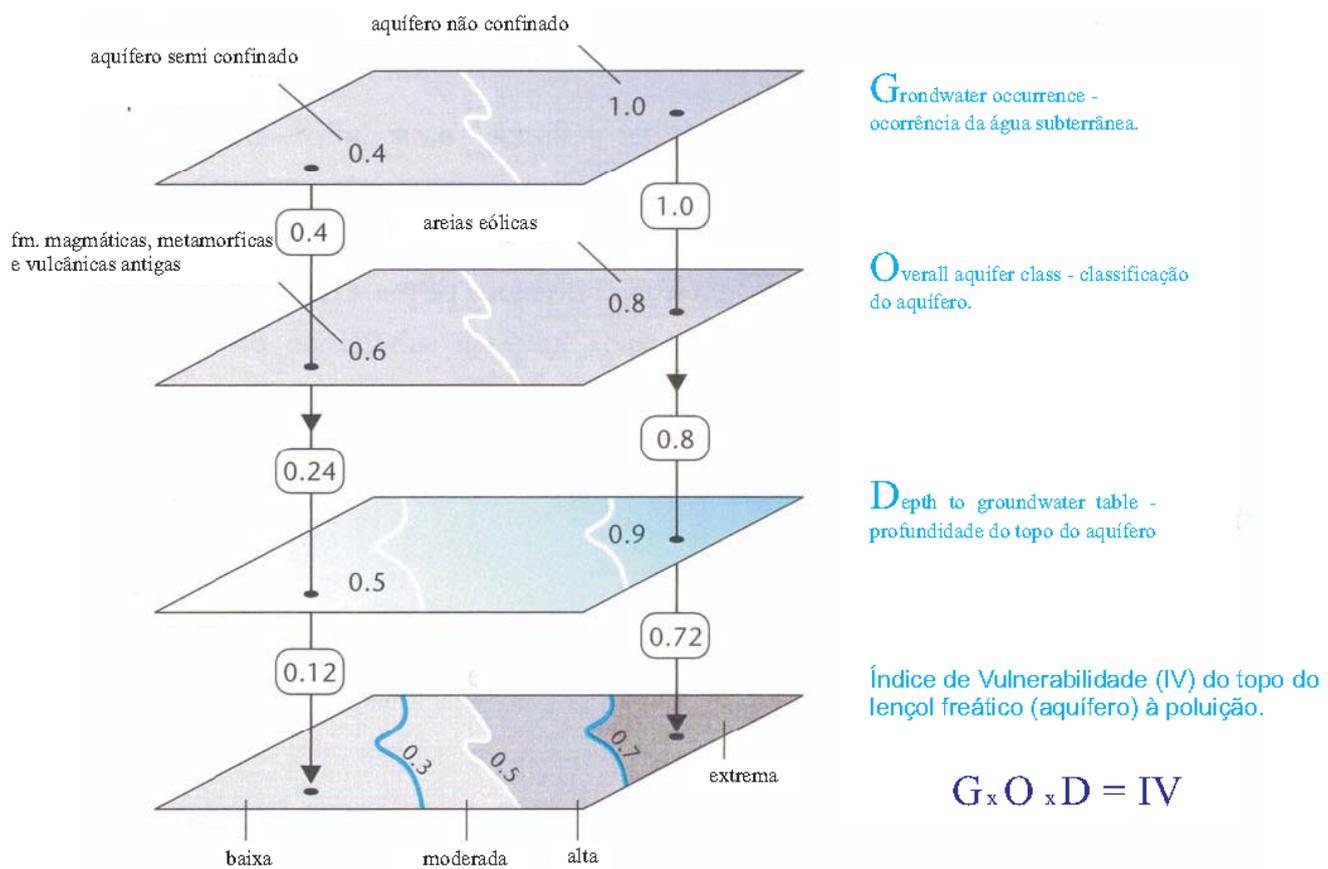


Figura 4.7. Esquema de aplicação do método GOD.

4.2.11 Análise dos Condicionantes Geotécnicos à Deflagração da Contaminação

Foram analisados fatores que podem levar a deflagração de uma possível contaminação dos recursos hídricos, considerando uma estrutura enterrada (tanque de armazenamento de combustíveis).

Dessa maneira, seguindo os critérios apresentados no tópico 3, foram definidas propensões à erosão e a movimentos de massa com base na declividade (item 3.3.6).

A tendência a ocorrência de Colapsividade nos solos também foi analisada, tendo com base o índice de vazios, grau de saturação e granulometria, conforme conceitos que podem ser observados no item 3.3.5.

A possibilidade de ocorrer a corrosão das estruturas enterradas, considera a influência do pH e Eh, procedendo conforme os conceitos apresentados no item 3.4.6.

4.2.12 Análise da Vulnerabilidade versus Condicionantes Geotécnicos

Foi feita uma análise por compartimentos, considerando as classes de vulnerabilidade presentes nos compartimentos e os condicionantes geotécnicos que podem levar a uma deflagração da contaminação nos compartimentos.

Manteve-se o foco da análise nas principais classes de vulnerabilidade presentes e quais são as características geotécnicas do compartimentos onde a classe de vulnerabilidade ocorre.

Também foram consideradas feições observadas em campo que podem influenciar na contaminação dos aquíferos, como características da rocha, principalmente a presença de fraturamento. O perfil de alteração intempérico também foi considerado na discussão.

4.2.13 Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos Superficiais

Nesta análise, devido seu caráter qualitativo, mais simples e interpretativo será considerado somente a vulnerabilidade relativa a uma tendência de o contaminante migrar do posto de combustível até o curso d'água. Onde, uma análise mais complexa demandaria, além da caracterização do comportamento de plumas de contaminação nos compartimentos geotécnicos, uma gama de análises químicas e caracterização das propriedades bio químicas das drenagens, assim como sua capacidade de suporte a agentes contaminantes, DBO, DQO, fauna e flora presentes, também uma caracterização geofísica e utilização de sondagens.

As classes consideraram a divisão do método GOD, modificando os princípios adotados por este método, para atingir de forma consistente o objetivo proposto. Foram definidas a partir de um provável ponto de contaminação (posto de combustível, contaminado ou não já existente), considerando as propriedades do contaminante migrar em sub-superfície, levando em conta uma direção horizontal de migração (vista em planta), partindo de uma fonte de contaminação enterrada. Foi considerada a direção horizontal, ou seja, a direção preferencial, onde o contaminante migra até atingir a rede de drenagem superficial.

Devemos lembrar que as linhas de fluxo subterrâneas seguem uma direção governada pelo gradiente hidráulico atuante no local, migrando geralmente do maior gradiente para o menor, a proposta de análise considerando uma horizontalidade do movimento é simplificada.

Como demonstrado no embasamento teórico, quando o contaminante atinge o solo a partir de um ponto enterrado, ele tende a migrar verticalmente pela zona vadosa até atingir a zona saturada. Onde poderá seguir uma tendência segundo as linhas de fluxo, caso não for um composto denso.

Dessa forma, parte-se de uma análise por linhas de contorno de espaçamento variado (divida em 10 segmentos, do ponto mais próximo ao mais distante da drenagem), representando distâncias simétricas, criadas a partir das linhas de drenagem na escala 1:10.000, a partir do conceito do método GOD, subdividir a vulnerabilidade de 0 a 1, com 10 divisões simétricas, a pesar do resultado ser representado em 5 classes. Este produto é analisado juntamente com a superfície do topo do lençol freático.

A partir destes dois produtos, foi procedida a análise da vulnerabilidade, estando ligada neste caso a possibilidade de que cada posto de combustível contamine os recursos hídricos superficiais.

Foram consideradas então duas camadas de informação: *índice 1*) distância da água subterrânea à superfície do terreno, mantendo o mesmo parâmetro de análise do método GOD; *índice 2*) distância dos possíveis focos de contaminação (sem discriminar se são contaminados ou não) dos cursos d'água, sub dividida em 10 segmentos, atribuindo pesos divididos geometricamente para cada seção, os pesos variaram de 0 a 1.

A subdivisão final de vulnerabilidade foi mantida nos padrões do método GOD para a água subterrânea, subdividindo a área em 5 classes, conforme os pesos adotados para cada atributo que variam de 0 a 1, os parâmetros a e b foram multiplicados entre si para se chegar as classes de vulnerabilidade.

Para se obter o índice de vulnerabilidade foi feita para cada ponto julgado uma multiplicação entre o índice 1 e o índice 2, chegando a um valor, que foi classificado conforme a escala de vulnerabilidade utilizada pelo método GOD.

Na análise também foi levada em conta a declividade da superfície de tendência do lençol freático para a análise devido a tendência de migração da água subterrânea em áreas de declive, devido a maior diferença de nível presente na superfície da água subterrânea no local, gerando uma maior tendência de migração.

5. ÁREA DE ESTUDO

5.1 Localização e Vias de Acesso

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, sendo circundado pelos municípios de Ibaté, Itirapina, Dourado, Américo Brasiliense e Luís Antônio. A área ocupada pelo município é de 1.140,90 km² (OLIVEIRA, 1996 apud PONS, 2006). A área de estudos compreende a região urbana do município e uma porção da área de expansão urbana como pode ser observado na figura 5.1.

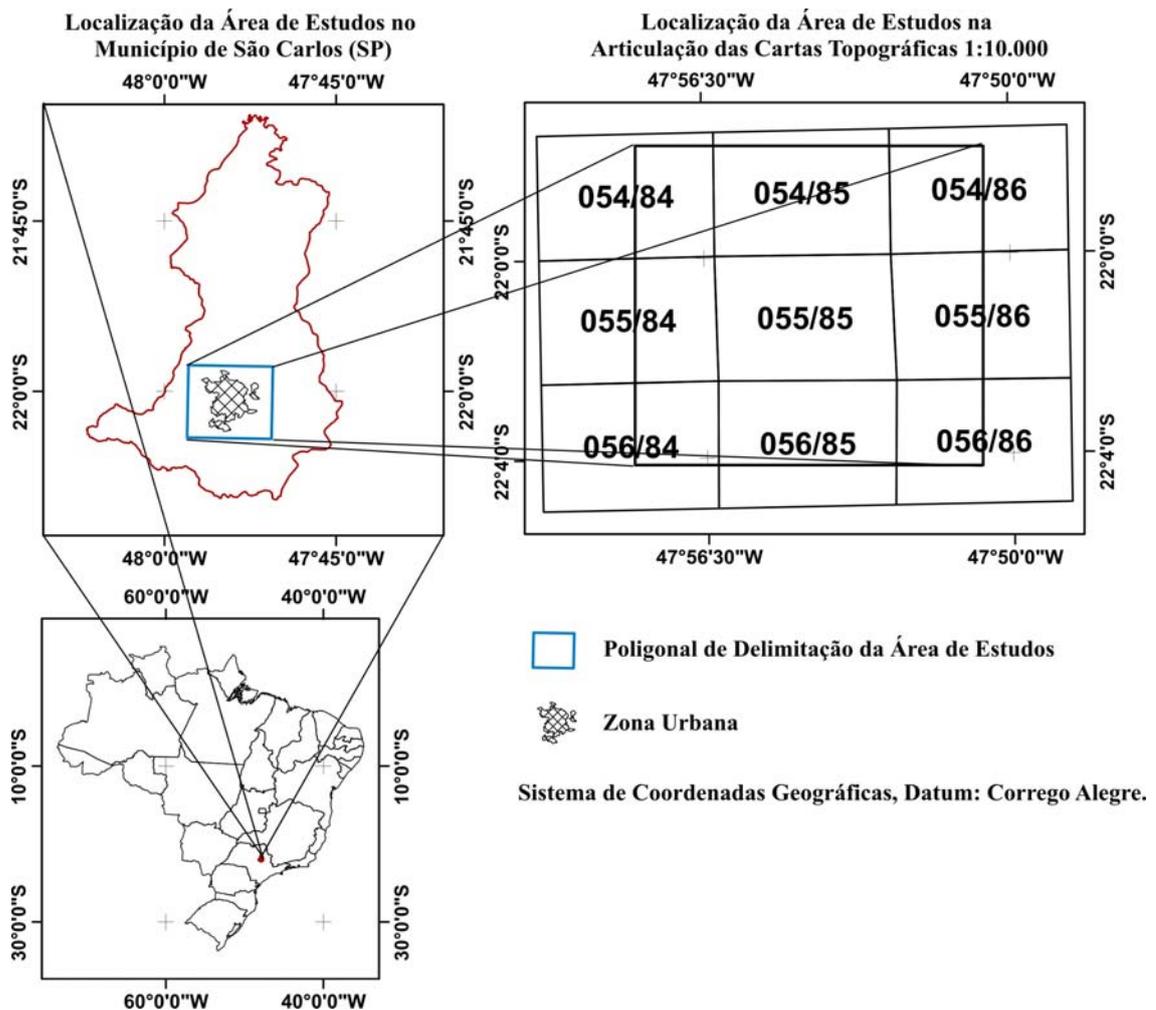


Figura 5.1. Localização da Área de Estudos.

Os acessos para a área de estudos são constituídos principalmente pelas rodovias SP-318 (Eng. Thales de Lorena Peixoto Júnior), SP-310 (Washington Luiz) e pela rodovia Augusto de Oliveira. A área de estudos é privilegiada em acessos, possuindo diversas vias, na área urbana e de expansão.

5.2 Meio Físico

O Meio físico é constituído basicamente por compartimentos geológicos, de suma importância para a pesquisa. De forma que como já foi citado anteriormente constituirá os limites das unidades geológico-geotécnicas que serão utilizadas para a análise de condicionantes geotécnicos que poderão ocasionar uma contaminação. Também utilizados para a análise de vulnerabilidade. A área possui uma característica interessante, tendo em vista que todas as unidades geológicas são aquíferos, desta forma podemos observar abaixo a descrição destas unidades de forma regional e local.

5.2.1 Geologia Regional e Local

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, tratando se de uma unidade geotectônica estabelecida sobre a Plataforma Sul-Americana a partir do período Siluriano, classificada como uma bacia intracratônica IPT (1981a). Esta unidade possui idades relativas ao início e fim da deposição das bacias delimitadas entre o Neo-Ordoviciano e Neo-Cretáceo Milani (1997, 2004). Ocupando uma área de 1.400.000 km², a Bacia do Paraná se estende pelo Brasil (1.100.000 km²), metade oriental do Paraguai (100.000 km²), metade ocidental do Uruguai (100.000 km²) e região ocidental da Argentina (100.000 km²), onde é chamada de Bacia Chaco-Paraná. No Brasil abrange os territórios dos estados do Mato Grosso, Paraná, São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e parte dos estados de Minas Gerais e Goiás. A Bacia do Paraná corresponde a Província Sedimentar Meridional bordejada principalmente pelas Províncias Tocantins e Mantiqueira como mostra a figura 5.2.

Segundo Milani (2004), sucessivos episódios de sedimentação acomodaram os depósitos da Bacia do Paraná o que a torna uma bacia de registro policíclico. Seis unidades constituem seu arcabouço estratigráfico: 1) Supersequência Rio Ivaí; 2) Supersequência Paraná; 3) Supersequência Gondwana I; 4) Supersequência Gondwana II; 5) Supersequência Gondwana III; 6) Supersequência Bauru. Salienta-se que entre estas Supersequência, aparecem importantes lacunas no registro estratigráfico (figura 5.3).

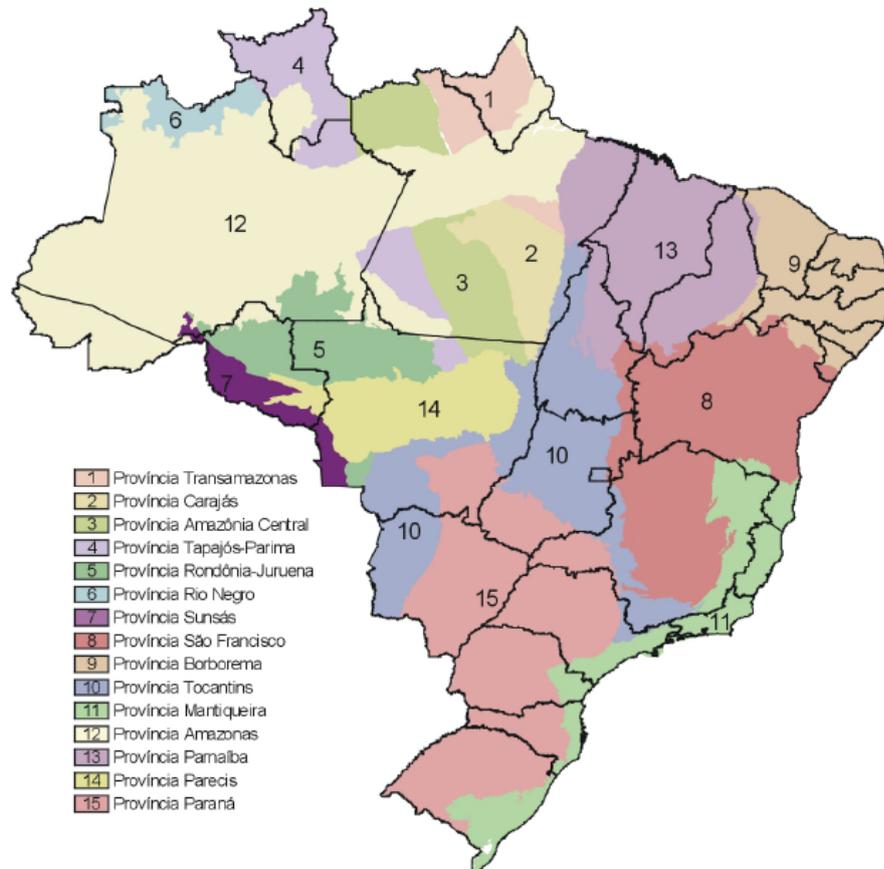


Figura 5.2. Províncias estruturais do Brasil (CPRM, 2003).

De forma geral a Bacia do Paraná possui uma inclinação homoclinal com deflexão na direção aproximada E-W, com mergulho suave de $1,5^\circ$ em direção à calha do rio Paraná. Em alguns locais os valores de mergulho são relativamente altos, decorrentes de tectonismo associado a derrames basálticos e intrusões de sills de diabásio (IPT, 1981b). Estão presentes dois estilos estruturais principais, derivados de deformações associadas a intrusões ígneas e deformações associadas a reativações de elementos tectônicos lineares do embasamento cratônico (figura 5.4) Araújo et al. (2006).

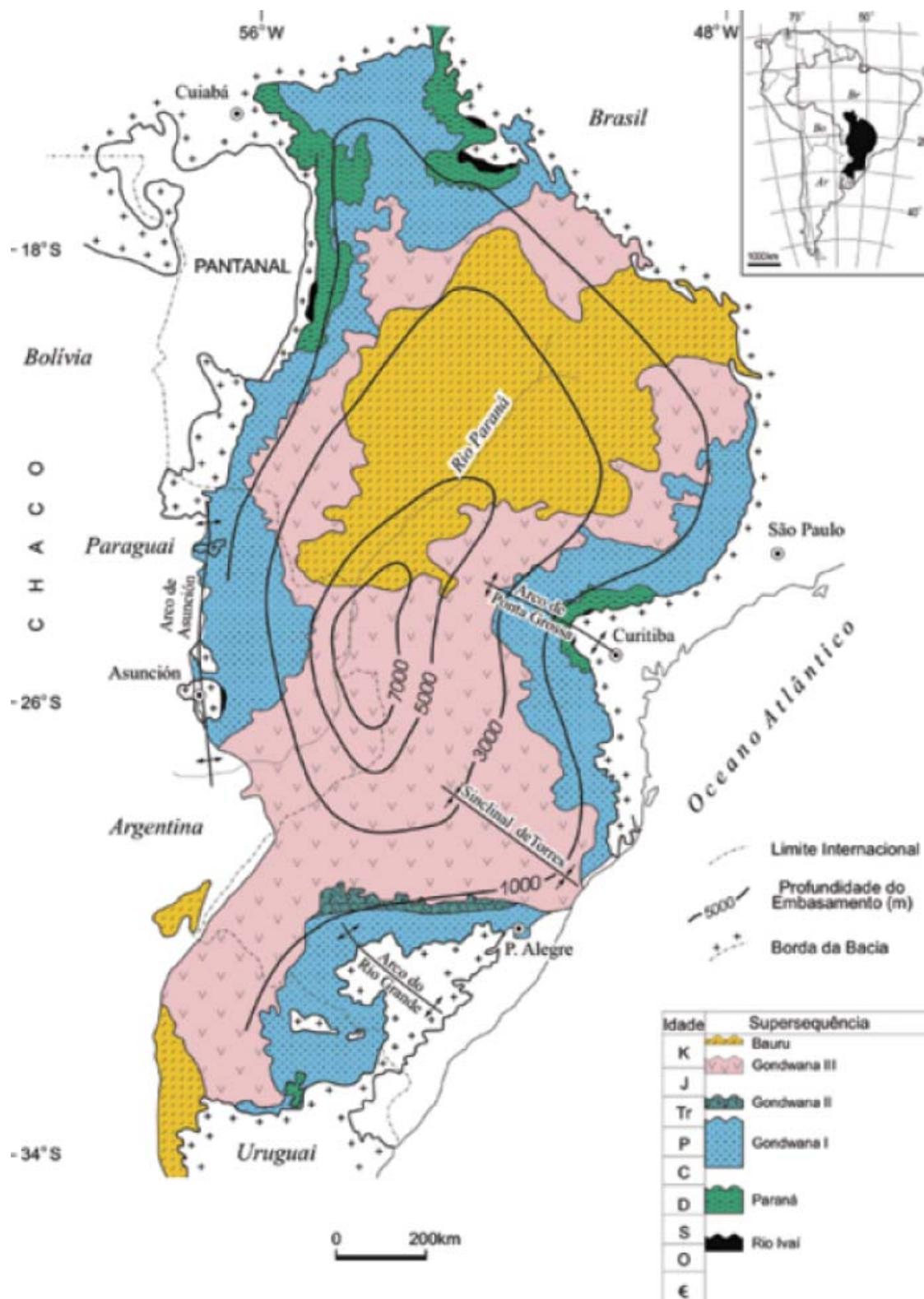


Figura 5.3. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná Milani (2004).

Os tipos básicos de estruturas que ocorrem são: falhas isoladas, sistemas lineares de falhas, horst, e domos. Segundo Soares (1973), as falhas isoladas são bastante frequentes, porém de pequena expressão regional. As falhas mais frequentes são normais, podendo ocorrer falhas inversas. Os rejeitos geralmente são inferiores a 20m, podendo apresentar dobras de arrasto e diques de diabásio associados.

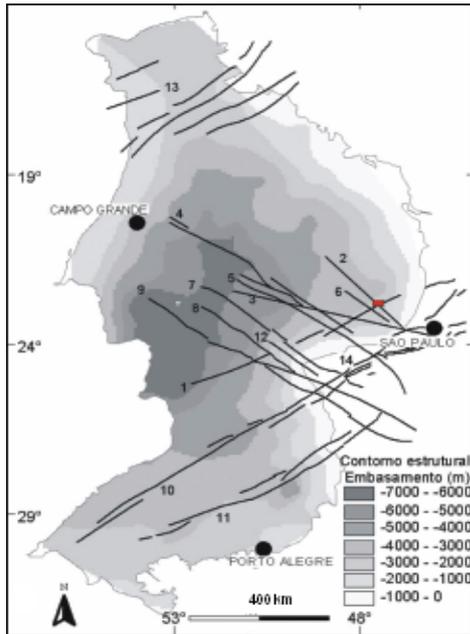
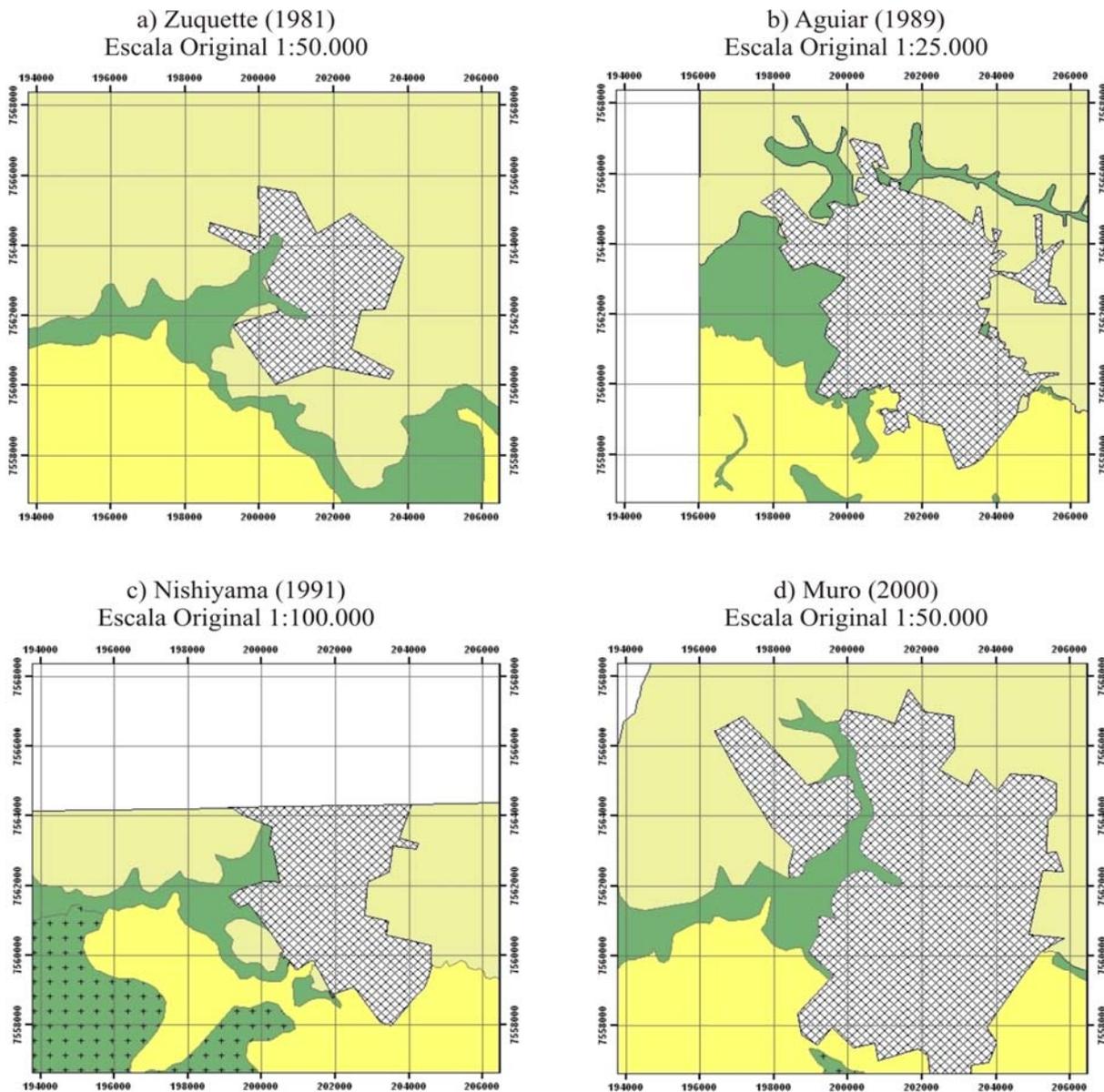


Figura 5.4. Principais estruturas, falhas e lineamentos na Bacia do Paraná com o contorno estrutural (em metros): 1. Falha de Jacutinga. 2. Lineamento Tietê. 3. Lineamento Paranapanema. 4. Falha de Guapiara. 5. Falha Santo Anastácio. 6. Lineamento Barra Bonita - Itu. 7. Falha São Jerônimo - Curiúva. 8. Falha Rio Alonzo. 9. Falha Cândido de Abreu - Campo Mourão. 10. Zona de Falha Lancinha - Cubatão. 11. Zona de Falha Blumenau - Soledade. 12. Arco de Ponta Grossa. 13. Zona de Cisalhamento Transbrasiliano. 14. Zona de Cisalhamento Ribeira. Araújo et al. (2006).

De acordo com Zuquette (1981), Aguiar (1989), Nishiana (1991) e Muro (2000) que apresentaram mapas de cunho geológico na área de estudos, estão presentes as formações Botucatu e Serra Geral (basaltos), Diabásios associados à Formação Serra Geral e o Grupo Bauru, na área de estudos, como podemos observar na figura 5.5. Ressaltamos que as escalas originais destes mapeamentos foram diferentes. Eles apresentam ausência de informação na área urbana, onde estão implantados os postos de combustíveis, observa se também uma certa discrepância entre os contatos e as unidades geológicas identificado nestes mapeamentos, fato provavelmente devido à diferença de escalas de mapeamento e utilização de produtos de sensoriamento remoto diferentes. Alguns autores discordam da ocorrência do Grupo Bauru na área de estudos, entre eles podemos citar o mapeamento executado por Almeida e Barbosa (1953), onde os autores afirmam que ocorre a Formação Itaqueri na região onde os autores citados acima afirmam ocorrer o Grupo Bauru.



Legenda

Unidades Geológicas Reconhecidas pelos Autores

-  Formação Botucatu
-  Grupo Bauru (Nishiyama classifica como Formação Marília, pertencente ao grupo)
-  Formação Serra Geral (Basaltos)
-  Formação Serra Geral (Intrusivas)
-  Área Urbana

Mapas Projetados em UTM, Corrego Alegre, 23S.



Figura 5.5. Mapas com unidades geológicas de diferentes autores dentro do limite da área de estudos do presente projeto.

O Grupo Bauru foi primeiramente cartografado na área por Mezzalira (1959). O mapeamento realizado pela UNESP (Universidade Estadual Paulista), sob a coordenação de Landim (1982), classifica o que os outros autores chamam de Grupo Bauru ou Formação Itaqueri de "Tc" - Depósitos de cimeira, relativos ao Oligoceno-Mioceno. Seriam estes compostos por conglomerados a arenitos imaturos, com cimento ferruginoso, associados a coberturas superficiais Cenozóicas na área (MURO, 2000).

Ainda relativo ao âmbito da ocorrência do Grupo Bauru ou Formação Itaqueri na região norte da área de estudos, Sousa (2002) e Pons (2006) afirmam se tratar da Formação Itaqueri. A seguir, observamos uma descrição das formações geológicas citadas acima.

Formação Botucatu: Geralmente é encontrada em contato basal com o topo da Formação Pirambóia, descrita por Schineider et al. (1974), Milani (1997), Scherer (2000) e Scherer e Lavina (2006) como depósitos de grandes dunas de composição arcossiana, tendo sua gênese relacionada a processos de sedimentação eólicos com influência fluvial na sedimentação mais basal. Os sedimentos arcoseanos possuem granulação fina a média bimodal, uniforme, com boa seleção de grãos, foscos com alta esfericidade, avermelhados, com estratificação cruzada tangencial de médio a grande porte, sendo encontrados arenitos grosseiros a conglomeráticos de até 5 m de espessura na base desta unidade.

A espessura total da Formação Botucatu varia em São Paulo entre 50 a 100 metros. A Formação Botucatu representa os diversos subambientes de um grande deserto climático de aridez crescente, cuja existência se prolongou até a ocasião do vulcanismo basáltico inerente a Formação Serra Geral. No topo da formação ocorre em algumas localidades uma interdigitação dos sedimentos eólicos com os derrames basálticos. Baseado na idade conhecida da Formação Serra Geral, correspondente ao Cretáceo inferior, admitindo uma idade entre o Jurássico médio e o Cretáceo inferior para os arenitos da Formação Botucatu IPT (2005).

Formação Serra Geral: Segundo Milani (1997), deriva de um intenso vulcanismo fissural mesozóico, gerando uma espessa cobertura de lavas toleíticas de até 1000 m. Forma uma intrincada rede de diques que cortam a seção sedimentar pré magmatismo na Bacia do

Paraná. O que produziu múltiplos níveis de sills (soleiras), que estão intrudidos segundo os planos de estratificação dos sedimentos acumulados na bacia.

As lavas basálticas de composição toleítica se intercalam com lavas andesíticas e riódacíticas. As lavas toleíticas possuem textura porfirítica com amígdalas e vesículas (preenchidas por zeólita e raramente albita), portando fenocristais subedrais a eudrais de olivina e plagioclásio, também ocorrem piroxênios (augita e pigeonita) e óxidos de Fe-Ti Schenato et al. (2003) e Petry et al. (2007).

Grupo Bauru: Esta unidade segundo Soares et al. (1973) de idade Aptiano-Maastrichtiana (Cretáceo), é formada da base para o topo pelas formações Caiuá (arenitos muito finos a médios, com boa esfericidade), Santo Anastácio (arenitos de granulação muito fina a média com frequentes nódulos e cimentação calcíferos, lentes de lamito, siltito e argilito), Adamantina (arenitos de granulação muito fina a fina com estratificação cruzada intercalada com lamitos, siltitos e arenitos lamíticos) e Marília (arenitos grossos e conglomeráticos maciços, ricos em feldspato, com lamitos vermelhos e calcários associados).

Formação Itaqueri: A Formação Itaqueri não possui uma definição cronológica e genética clara na literatura. Confundida com depósitos do Grupo Bauru e com depósitos Cenozóicos mais novos. Alguns autores como Almeida & Barbosa (1953), citam estes depósitos como sendo de origem cretácea, inferior ao Grupo Bauru, as relações de contato com estas unidades também não se encontram bem definidas, IPT (1983).

De acordo com Janoni (2007) a Formação Itaqueri ocorre como uma mancha irregular no reverso das cuestas basálticas, isoladas de outras coberturas pós-basálticas, representado em suas partes mais elevadas testemunhos da antiga extensão do Planalto Ocidental. Composta predominantemente por arenitos, geralmente ocorrem corpos lenticulares de siltitos e conglomerados oligomíticos com estruturas hidrodinâmicas, porém, com seixos e calhaus de composição predominantemente quartzítica e quartzosa.

Coberturas Superficiais Cenozóicas: Soares (1973), subdivide as coberturas Cenozóicas em terciárias e quaternárias, atribuindo sua gênese ao retrabalhamento de materiais do Grupo Bauru e outras formações que ocorreram na proximidade dos depósitos, interpretando como coberturas com pouco transporte, porém ocorrendo por grande extensão.

Segundo apresentado por Muro (2000) na região da área de estudos ocorrem sedimentos terciários, arenosos pouco argilosos com conteúdo fossilífero, aparecendo em áreas com altitudes superiores a 900 m, os sedimentos quaternários, arenosos com cascalhos, encontram-se nas bases de encostas, podendo, também ocorrer em terraços de rios.

5.2.2 Materiais Inconsolidados e Perfis de Alteração

Segundo Oliveira e Prado (1984) na região ocorrem vários tipos de solos, tais como Latossolo vermelho-amarelo, Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Roxo, Podzólico vermelho-amarelo, Terra Roxa estruturada, Areias Quartzosas, solos Litólicos, solos Hidromórficos e solos Concrecionários, estes solos são brevemente descritos abaixo:

Latossolos Vermelho-Amarelos: são descritos como solos de textura média a muito argilosa relacionados a alteração de arenitos.

Latossolos Roxos: originados da decomposição de rochas básicas (Formação Serra Geral), apresentam textura argilosa a muito argilosa, com teor de areia grossa inferior a 10%.

Latossolo Vermelho-Escuro: solos de textura média a argilosa, os argilosos originados de sedimentos finos (siltitos e argilitos) podendo ter contribuição de rochas básicas e os de textura média originados de material mais grosseiro, especialmente retrabalhados de arenitos.

Terra Roxa Estruturada: possuem textura argilosa a muito argilosa, originados de rochas básicas.

Areias Quartzosas: associado ao retrabalhamento de rochas arenosas, possuindo uma textura com mais de 70% de areia.

Solos Hidromórficos: ocorrem em planícies de inundação, de alguns cursos d'água, apresentam horizonte glei, cores claras exibindo em geral mosqueamento com bastante matéria orgânica.

Solos Litólicos: espessura do material intemperizado inferior a 40cm, presença de minerais instáveis, com substrato rochoso proeminente, geralmente ocorrem em áreas de maior declividade.

Solos Concrecionários: caracterizados por camadas concrecionárias relativamente espessas, coloração amarela avermelhada, com nódulos centimétricos a decimétricos, esféricos e alongados, apresenta cimentação por óxidos de ferro.

Em um mapeamento posterior executado pela EMBRAPA (1981), foram descritos os solos LV-5 – Latossolo Vermelho Amarelo Álico (alta saturação por alumínio trocável, com valor igual ou superior a 50%), com horizonte A moderado, textura argilosa ou média; LRe+LRd – Latossolos Roxos, Eutrófico (concentrações de nutrientes em níveis ótimos ou quase, para o crescimento de plantas ou animais) e Distrofico (solo que apresenta baixa saturação por bases, ou seja, menor que 50% na CTC a pH 7,0) respectivamente, ambos com horizonte A moderado e AQ – Areias Quartzosas profundas álicas, com horizonte A moderado.

Os trabalhos de caráter geotécnico executados na área anteriormente por Zuquette (1982), Aguiar (1989), Nishiyama (1991) e Muro (2000), apresentam mapas de solos, considerando uma terminologia própria, empregada primeiramente por Zuquette (1981), onde o autor, afirma que na área ocorrem uma cobertura residual da Formação Serra Geral e uma cobertura de *sedimentos arenosos I*. Segundo o autor o solo residual, ocorre tanto em encostas de inclinação acentuada, com pequena espessura e indícios da rocha matriz, também pode ocorrer em áreas planas, com espessura mais acentuada, o mesmo autor afirma que estes solos são bastante colapsíveis quando umedecidos. Já a cobertura retrabalhada é descrita predominantemente por *areia fina, com a presença de silte e argila*, coloração variando de amarelo a avermelhado.

Aguiar (1989), afirma que na área ocorrem *solo residual do Gr. Bauru, solo residual relativo a magmatitos básicos, solo residual da Fm. Botucatu, Material Arenoso Transportado I, II e III, Material Aluvionar, Material Coluvionar dos Magmatitos Básicos, Material Coluvionar do Botucatu e Material Orgânico.*

Nishiyama (1991), por sua vez afirma que ocorrem *solos residuais da Fm. Marília, ocorrendo solo argiloso e arenoso (Grupo Bauru), residuais da Fm. Serra Geral e Magmatitos Básicos, solo retrabalhado Arenoso I, Arenoso III e residuais da Fm. Botucatu.*

Muro (2000), afirma que ocorrem *solos residuais da Fm. Serra Geral, Gr. Bauru e Fm. Botucatu e solos retrabalhados Arenoso I, II e III.*

5.2.3 Geomorfologia

Na área de estudos segundo levantamento realizado pelo IPT (1981c), ocorrem *cuestas basálticas, colinas amplas e médias estendendo-se sobre coberturas cenozoicas e coberturas residuais das formações Botucatu e Pirambóia.*

Também ocorrem *morros arredondados, mesas basálticas, encostas sulcadas por vales subparalelos, encostas com cânions locais, escarpas festonadas e planícies aluviais.*

5.3 Clima

De acordo com Rolim et al. (2007), o clima em São Carlos, pelo sistema THORNTHWAITE é C2rA'a' e Aw no sistema Köppen, ambos equivalendo a um clima tropical, com inverno seco, tendo uma temperatura média pôr mês mais frio maior igual a 18°C, e para o mês mais quente maior igual a 22°C.

De acordo com os dados apresentados pela SIGRH, (2011), podemos observar na figura 5.6 os valores de chuvas mensais em milímetros desde 1959 até 2004, onde é possível observar o total de chuva nos meses de Novembro e Dezembro que chegam até a 1045,2 mm, sendo o valor máximo registrado em um mês no período de 45 anos.

Os valores foram apresentados desta forma preferencialmente, possibilitando uma análise relativa à ocorrência da magnitude máxima de chuva que pode ocorrer em um mês. Com base em dados históricos disponíveis, sendo que para a análise de condicionantes geotécnicos, uma abordagem por valores médios entre todos os meses podem mascarar a possibilidade de ocorrer um evento mais crítico.

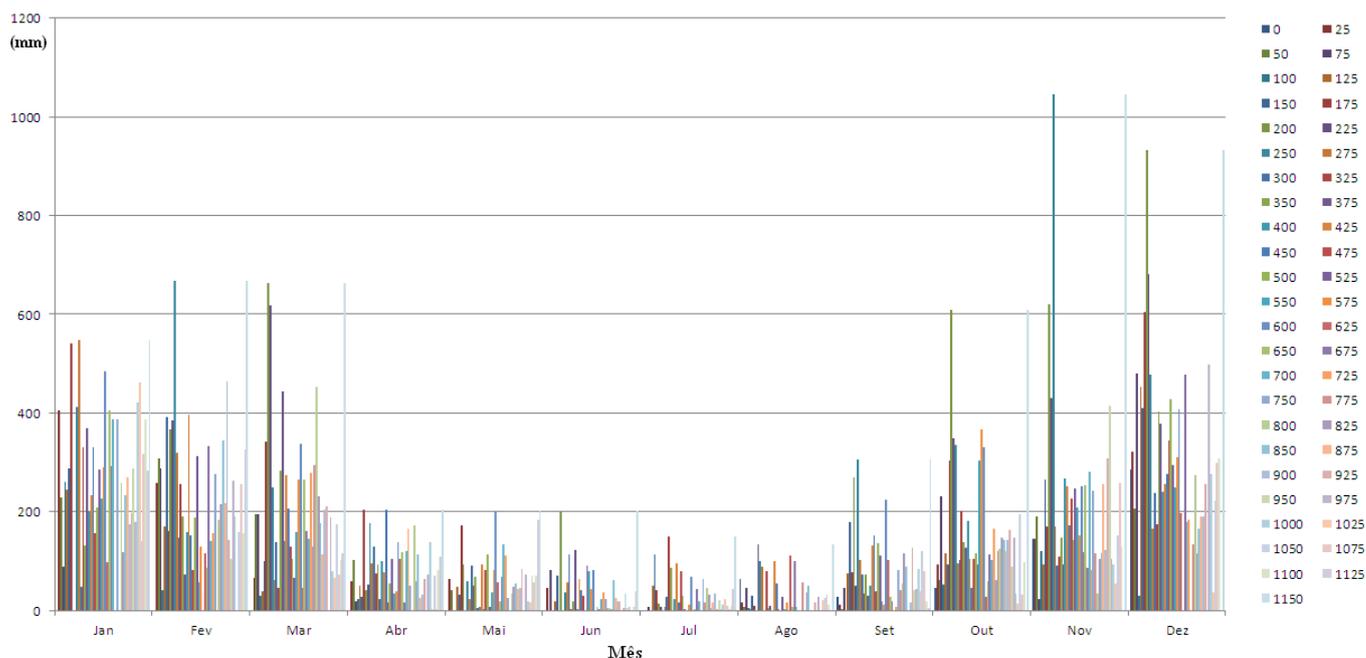


Figura 5.6. Pluviograma mensal contendo os valores em milímetros das chuvas de 1959 a 2004 (SIGRH, 2011).

5.4 Recursos Hídricos

A área de estudos é de certa forma privilegiada em relação a recursos hídricos, onde como já foi apresentado anteriormente na área está presente em sessão aflorante a Formação Botucatu, que do ponto de vista de água subterrânea constitui o aquífero guarani, juntamente com a Formação Pirambóia (não aflorante na área).

Também está presente o aquífero Itaqueri, constituído pela formação geológica de mesmo nome, também aflorante na área. A presença da Formação Serra Geral constituída por basaltos fraturados também forma um aquífero, cujo reservatório de água é constituído pelas fraturas da rocha.

Do ponto de vista de recursos hídricos superficiais, ocorrem na área de estudos, nove córregos e um rio, a saber: Córrego Monjolinho, Pombas, Água Quente, Gregório, Cascatinha, Mineirinho, Ponta da Taboa, Rancho Alegre, Santa Maria. Como curso de drenagem mais expressiva temos o Rio Monjolinho.

A área de estudos, possui uma rede hídrica considerável na zona urbana e de expansão e está sobre um dos mais importantes aquíferos do mundo. Do ponto de vista de recursos hídricos é um excelente local para a realização da pesquisa proposta.

5.5 Meio Socioeconômico

Segundo Pons (2006), a urbanização em São Carlos (SP) ocorreu de forma bastante rápida, como na maioria das cidades de porte médio. Podemos observar que a distribuição da população, no espaço urbano, ocorreu de forma irregular, gerando o agravamento dos problemas ambientais.

Segundo o IBGE (2011), em 2010 o município de São Carlos (SP) possuía uma população de 221.950 mil habitantes, um área da unidade territorial de 1.137,303 Km² com uma densidade demográfica de 195,15 hab/Km².

O município ainda conta com um eleitorado de 147.395 eleitores, o PIB per capita em 2010 relativos a preços correntes foi um montante igual a 17.941,42 (Reais) e o FPM (Valor do Fundo de Participação dos Municípios) foi de 3.616.336.481 Reais.

Temos ainda, um total de endereços urbanos de 97.041 endereços e ruais de 5.782, onde temos 71.602 domicílios, sendo que dentre estes 69.432 possuem abastecimento de água, pela rede pública geral e 71.503 possuem energia elétrica (IBGE, 2011).

5.6 Problemas Geoambientais

Podemos destacar o trabalho realizado por Pons (2006), que estudou a região urbana de São Carlos (SP), apresentando uma proposta metodológica para levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas e em processo de degradação em ambientes urbanos, utilizando o geoprocessamento como ferramenta principal.

A autora identificou na região urbana de São Carlos, 10 áreas apresentando problemas de erosão, 30 nascentes apresentando problemas de desmatamento de cabeceira de rio, aproximadamente 109 km apresentando retirada da mata ciliar (em relação ao comprimento total dos canais analisados - 150 km), 5,91 km apresentando problemas de assoreamento, e cerca de 1,83 km² com atividades de mineração, principalmente retirada de areia.

5.7 Focos de Poluição (Postos de Combustíveis) em São Carlos (SP)

Um trabalho recentemente realizado na região por Hamamoto (2010a,b), se propôs a cartografar o perigo de contaminação gerada por posto de combustível em uma parte da área urbana de São Carlos (SP), porém não levou em consideração uma cartografia geológico-geotécnica e nem a avaliação pelo método proposto neste trabalho, que está sendo uma das metodologias mais utilizadas para a análise de vulnerabilidade em recursos hídricos.

O autor utilizou outros critérios sob a ótica da engenharia ambiental, focando principalmente no cadastro das fontes de poluição, levando em conta a publicação da CETESB (2010), que classifica os postos de combustíveis de São Carlos em apresentando ou não poluição, como pode ser observado na figura 5.7.

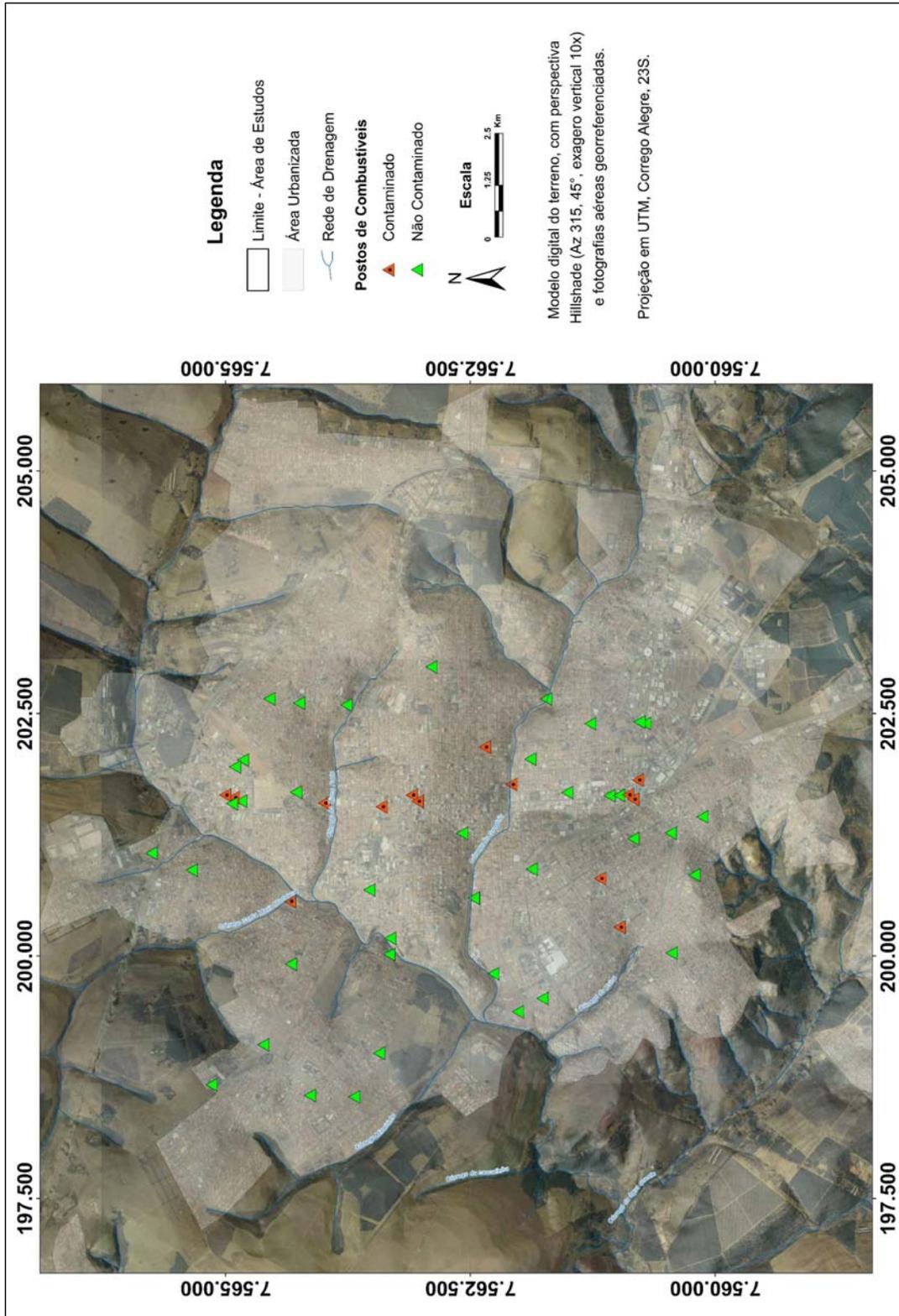


Figura 5.7. MDT com fotos aéreas georreferenciadas, área urbana e postos de combustíveis identificados como contaminados e não contaminados. Localização e estado de contaminação dos postos compilados de CETESB (2010) e Hamamoto (2010a,b).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, estão descritos os resultados da pesquisa, iniciando pela compartimentação geológico-geotécnica. Seguida pela análise de vulnerabilidade a partir do método GOD. Posteriormente é apresentada a análise simplificada da vulnerabilidade de contaminação das águas superficiais e a análise dos possíveis condicionantes Geotécnicos à deflagração da contaminação em postos de combustíveis na área de estudos.

Finalizando o capítulo, procede-se com uma discussão, envolvendo a vulnerabilidade versus os condicionantes Geotécnicos nos compartimentos.

6.1 Compartimentação Geológico-Geotécnica

Para auxiliar o trabalho foram compilados dados de trabalhos anteriores, sintetizados no anexo 1 e apêndice 1. O mapeamento gerou como produto 364 pontos de campo e 8 pontos de amostragem, ambos apresentados no apêndice 1. Os produtos utilizados na compartimentação geológico-geotécnica, foram interpretados a partir do anexo 1 e do apêndice 1, também foi utilizado o apêndice 2, que contém fotos aéreas da área em alta qualidade e a superfície do terreno interpolada e apresentada em forma de modelo digital do terreno.

Conforme os critérios adotados para a subdivisão em compartimentos Geotécnicos, estes foram definidos de acordo com os limites litológicos mapeados na área (Apêndice 3) e os materiais inconsolidados (Apêndice 4). Foram delimitados assim as formações geológicas Botucatu, Serra Geral, Itaqueri, Aluviais e Coluvionar.

Para facilidade de compreensão e correlação, os compartimentos foram nomeados respectivamente como suas formações geológicas correspondentes, ou seja, por exemplo os limites geológicos da Formação Botucatu, recebe o nome de Compartimento Botucatu, onde, o compartimento é discutido não somente quanto às suas características geológicas, mas de acordo com aspectos relacionados aos materiais inconsolidados e às características geotécnicas.

O compartimento Botucatu ocorre em uma área de aproximadamente 40,14 km², presente na porção sul da área. Constituído basicamente por areias quartzosas com teor de finos incipiente, constitui uma importante área de recarga do aquífero guarani, atualmente está instalado apenas um posto de combustível na área de afloramento desta formação.

O compartimento Serra Geral aflora área de aproximadamente 4,00 km², ocorre em alguns leitos de rios e na *cuesta* basáltica, estando presente nas regiões central e oeste da área de estudos. Constituí uma importante unidade na área de estudos. Sua posição estratigráfica o coloca acima do compartimento Botucatu, perfazendo um conduto hídrico eficiente até esta unidade quando a rocha está sã e fraturada. Quando esta unidade está alterada, se faz uma importante camada selante, devido sua alteração ter uma textura argilosa, com reduzida condutividade hidráulica.

O compartimento Itaquerí, possui a maior área aflorante no perímetro estudado, perfazendo 104,10 km². Estratigráficamente recobre os dois compartimentos anteriores, é possível observar o contato com o compartimento Botucatu, na porção leste da área de estudos.

Foi descrito na área de estudos contendo camadas distintas, separadas por linha de seixos de composição variada (lateritas e quartzo leitoso principalmente). Abaixo da linha de seixos na porção nordeste da área encontramos uma camada de textura mais silto-argilosa e acima mais arenosa, com uma porcentagem considerável de argilas.

O compartimento Aluvionar, possui uma área aflorante de aproximadamente 1,03 km², constituído por material predominantemente de textura arenosa, saturada, com ocorrência restrita a imediações de canais de drenagem, não há nenhum posto de combustível locado neste compartimento.

O compartimento Coluvionar, possui área aflorante de aproximadamente 0,83 km², estando restrito à porção imediatamente inferior às *cuestas* basálticas, constituído visualmente de uma mistura dos compartimentos Serra Geral, Itaquerí e Botucatu.

A caracterização dos compartimentos acima mencionados está detalhada a baixo, sumarizada de acordo com os compartimentos.

6.1.1 *Compartimento Botucatu*

O compartimento Botucatu é definido pela área aflorante da formação de nome homólogo, a rocha é constituída por arenitos quartzosos com teor de finos que varia de baixo a incipiente, os grãos minerais exibem bom arredondamento e boa seleção, aparecendo por vezes bimodais e geralmente foscos (figura 6.1). Na figura também é possível observar a presença de alguns minerais máficos.

Este compartimento exhibe na área mapeada uma geomorfologia predominantemente classificada como colinas médias. Também ocorre em vertentes de inclinação elevada na face da cuesta basáltica que aparece mais ao centro da área de estudos, em contato com os basaltos da Formação Serra Geral. O compartimento Botucatu, apresenta um grau de alteração relativamente elevador, seus materiais inconsolidados ficam na classificação de Vaz (1996) como solo residual maduro na área de colinas e solo residual jovem na área de afloramento das cuestas.



Figura 6.1. Fotos de grãos lavados com defloculante da Fm. Botucatu na lupa.

Podemos observar na figura 6.2 um exemplo de afloramento do compartimento, apresentando o padrão que mais se repete nos pontos observados em campo (solo residual maduro).

Na etapa de amostragem, foi coletada uma amostra denominada de 03 (deformada). Foi coletado em um anel de PVC, constituindo uma amostra indeformada, denominado P3. As coordenadas referentes a esta coleta são: X – 199.966 e Y – 7.556.920. As amostras foram coletadas próximo ao bairro Cidade Aracy, utilizada para a caracterização geotécnica do compartimento. Foram determinados os índices físicos (tabela 6.1), os limites de consistência e foi realizada uma análise granulométrica conjunta (figura 6.3) e análise de pH e Eh.

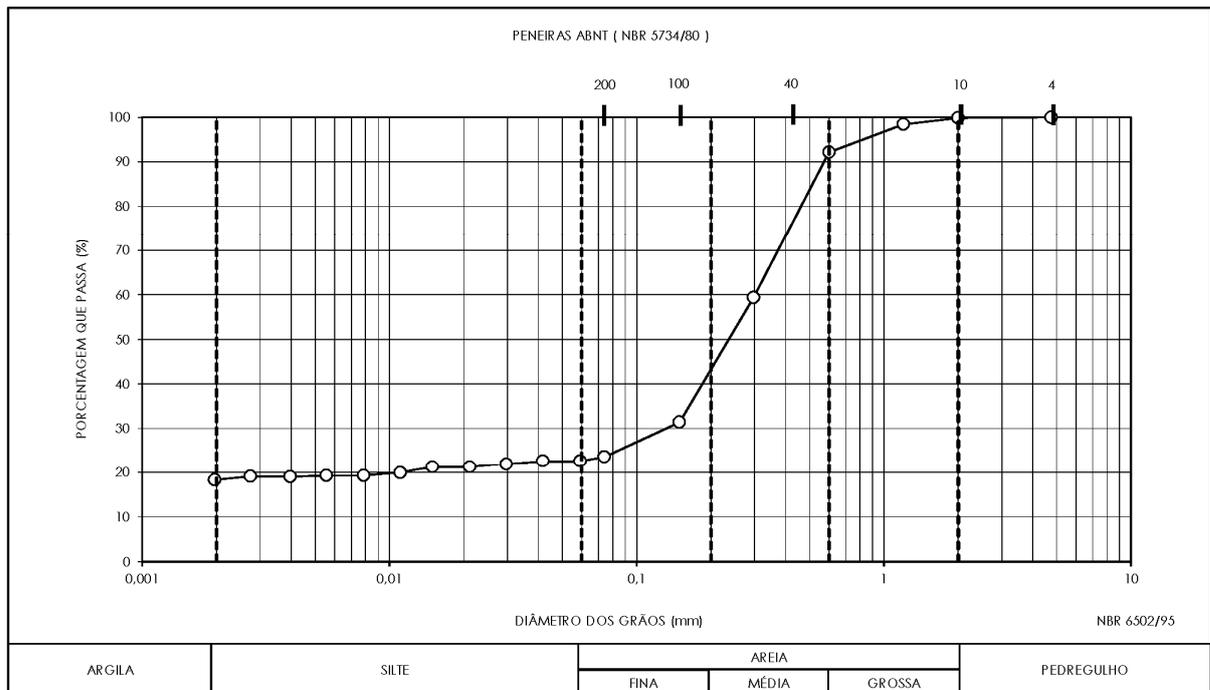


Figura 6.2. Afloramento da Fm. Botucatu (Ponto 187 - Coordenadas: X - 202.379, Y - 7.556.939).

Tabela 6.1. Índices físicos determinados em uma amostra do compartimento Botucatu.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ	1,885	g/cm^3
$W(\text{média})$	5,07	%
ρ_d	1,794	g/cm^3
ρ_s	2,687	g/cm^3
e	0,50	
n	33	%
S_f	27	%

Os limites de consistência determinados foram: $LL = 28$; $LP = 17$; $IP = 11$.

**Figura 6.3.** Análise granulométrica conjunta de uma amostra do compartimento Botucatu.

A análise granulométrica da amostra selecionada mostrou um nível considerável de silte (aproximadamente 18%). Enquanto que todo o restante da amostra é composta por areias, em sua maior parte areia média, e posteriormente areia fina. Desta forma com cerca de 80% de areia, podemos supor que a condutividade hidráulica do material é consideravelmente elevada.

O pH determinado para a amostra foi de 6,63 e o Eh foi de 344 (mV).

São apresentados aqui alguns dados obtidos em trabalhos anteriormente realizados na área de estudos, foi dada importância para os trabalhos considerados mais relevantes. O trabalho mais significativo para a área em estudos em termos de dados referentes a análises laboratoriais foi o executado por Aguiar (1989), onde o autor caracterizou dezoito amostras correspondentes à área de afloramento da Fm. Botucatu mapeada neste trabalho. Os dados de Aguiar (1989) correspondem a análises granulométricas (tabela 6.2) e índices físicos (tabela 6.3).

Tabela 6.2. Análises granulométricas da Fm. Botucatu Aguiar (1989).

Ponto	Cordenadas		Profundidade (m)	Granulometria - ABNT (%)					
	X	Y		Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila
RA014	196043	7560425	0,80	0,00	0,10	27,50	60,80	3,90	7,70
RA025	197767	7558262	0,80	0,00	0,90	26,10	60,80	3,60	8,60
RA027	198083	7559955	0,80	0,00	0,20	16,60	73,10	3,30	6,80
RA035	196962	7559137	0,80	0,00	0,10	25,70	61,20	4,20	8,70
RA042	197107	7557171	1,00	0,00	0,30	18,30	65,40	3,20	12,70
RA047	197714	7558086	1,00	0,00	0,70	31,70	56,40	2,40	8,90
RA060	199653	7557021	0,80	0,00	0,40	14,10	52,70	8,00	24,90
RA062	199064	7557694	0,80	0,00	0,40	18,20	62,30	5,90	13,20
RA074	200647	7557831	0,80	0,00	0,20	19,10	67,90	2,30	10,50
RA083	199715	7558675	1,00	0,00	0,40	15,60	73,00	4,40	6,60
RA159	203598	7557356	0,80	0,00	0,00	14,60	77,50	3,50	4,50
RA191	205468	7557400	0,80	0,00	0,00	8,30	73,50	5,00	13,20
RA246	206074	7558108	1,00	0,00	0,10	8,60	73,40	7,20	10,60
RA747	198558	7558737	0,80	0,00	0,30	13,20	78,80	2,30	5,40
RA753	198928	7557008	2,00	0,00	0,00	5,30	23,50	17,60	53,60
RA760	205881	7556718	2,00	0,00	0,00	9,60	81,70	3,50	5,20
RA770	196293	7558635	0,80	0,00	0,30	23,40	68,70	3,10	4,50

Outros autores significativos para o trabalho estão citados a baixo, com dados complementares ou que confirmam as análises apresentadas anteriormente.

De acordo com Oliveira e Prado (1984), a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) da unidade corresponde à faixa de variação de 16,2 a 29,8 Cmol/kg.

A análise granulométrica apresentada por Aguiar (1989) mostra um teor maior de areia fina, em média 65% e de areia média 17%. Enquanto que os finos representam em termos médios 8,5%, chegando até a 53,6% em uma das amostras. Os valores predominantes estão na granulometria areia, concordando com a análise realizada neste trabalho, sendo que o teor predominante da análise corresponde a areia média, em concordância com Nishiyama (1991).

Nishiyama (1991) determinou valores de massa específica seca máxima variando de 1,83 a 1,98 g/cm³, a umidade ótima variou de 8,5 a 11,5%, a condutividade hidráulica determinada por este autor foi da ordem de 10⁻³ a 10⁻² cm/s.

Tabela 6.3. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Botucatu Aguiar (1989).

Ponto	Profund. (m)	Massa Específica (g/cm ³)			Índice de Vazios	Úmidade (%)		Limites de Attemberg (%)		
		Sólido	Seca	Solo		Natural	Higroscópica	LL	LP	IP
RA014	0,80	2,631	1,554	1,711	0,693	10,10	2,10	np	np	np
RA025	0,80	2,655	Ne	ne	ne	7,30	2,00	np	np	np
RA027	0,80	2,636	1,416	1,533	0,862	8,20	1,50	np	np	np
RA035	0,80	2,669	Ne	ne	ne	8,50	2,60	np	np	np
RA042	1,00	2,641	1,500	1,635	0,761	9,00	2,10	np	np	np
RA047	1,00	2,648	1,649	1,739	0,606	5,40	1,70	np	np	np
RA060	0,80	2,716	1,590	1,834	0,708	15,40	6,10	32,40	23,80	8,60
RA062	0,80	2,655	Ne	ne	ne	9,60	4,40	np	np	np
RA074	0,80	2,620	1,598	1,710	0,640	7,00	2,80	np	np	np
RA083	1,00	2,631	1,606	1,731	0,638	7,80	1,10	np	np	np
RA159	0,80	2,623	Ne	ne	ne	5,80	1,10	np	np	np
RA191	0,80	2,623	1,548	1,695	0,694	9,50	3,00	np	np	np
RA246	1,00	2,648	1,522	1,669	0,740	9,70	2,50	np	np	np
RA747	0,80	2,627	Ne	ne	ne	7,00	2,10	np	np	np
RA753	2,00	2,928	1,407	1,611	1,081	14,50	13,40	46,70	35,50	11,20
RA760	2,00	2,663	Ne	ne	ne	4,60	0,80	np	np	np
RA770	0,80	2,629	Ne	ne	ne	8,00	3,00	np	np	np

Muro (2000) constatou uma granulometria predominantemente constituída por areias médias correspondendo à faixa de 70 a 80% da granulometria, a fração areia fina situada em uma faixa de 2 e 20%, e a fração argila variando até 10%. A massa específica dos sólidos varia de 2,61 a 2,64 g/cm³, a massa específica seca de 1,48 a 1,74 g/cm³ e o índice de vazios varia de 0,51 a 0,74.

Com base nos dados apresentados anteriormente, podemos afirmar que o compartimento é considerado o mais crítico do ponto de vista hídrico, aflorante em uma porção considerável da área. Consiste em uma zona de recarga de um importante aquífero da região. As rochas do compartimento em questão são denominadas de Aquífero Guarani, juntamente com as rochas da Formação Pirambóia que não aparece em sessão aflorante na área. Ressalta-se que este é um dos aquíferos mais importantes do planeta.

Analisando os dados apresentados anteriormente podemos discutir, que o valor médio encontrado por Aguiar (1981), para a massa específica dos sólidos foi de $2,661 \text{ g/cm}^3$, muito próximo ao valor encontrado neste trabalho ($2,687 \text{ g/cm}^3$), coerentes também com os valores apresentados por Muro (2000). A média encontrada para o índice de vazios no trabalho de Aguiar (1981) foi de 0,743, na análise feita para este trabalho foi de 0,50. Coerentes com os valores apresentados por Muro (2000), que propõe uma variação de 0,51 a 0,74. No trabalho de Aguiar (1989), os valores de índices de vazios variam de 0,638 a 1,081. A variação pode se dar devido ao teor de finos das amostras, na amostra analisada neste trabalho o teor de finos era maior que a média apresentada por Aguiar (1981), dando um índice de vazios menor.

Aguiar (1989), realizou os ensaios de limites de Atterberg em apenas duas das amostras coletadas nesta unidades, tendo os valores para o IP de 8,60 e 11,20. Ambas as amostras tinham mais de 20% de finos. Na amostra ensaiada neste trabalho foi encontrado o IP equivalente a 11. Esta amostra foi caracterizada com um teor de finos maior que 20%, permitindo realizar o ensaio. De forma geral podemos considerar as areias da Fm. Botucatu não plásticas, com algumas exceções em pontos específicos.

6.1.2 *Compartimento Serra Geral*

O compartimento Serra Geral, referente à área aflorante da Fm. Serra Geral, está relacionado à zona próxima a leitos de rios e a área de cuevas basálticas. As rochas que constituem o compartimento são principalmente basaltos de textura afanítica fina, coloração cinza a negra. Aparecem em locais específicos alguns afloramentos de diques de diabásio, cuja sessão aflorante está inserida principalmente em taludes de corte, os diabásios exibem coloração cinza a negra, com grau de alteração insipiente a médio e textura fanerítica fina a média. Referente aos materiais de alteração, encontra-se afloramentos, exibindo diferentes

graus de alteração, desde rocha sã como mostra a figura 6.5, representando basaltos com disjunção colunar, solo residual jovem representado pela figura 6.6, ainda com fragmentos da rocha de origem e amostras em estado avançado de alteração, possuindo coloração predominantemente marrom. Também encontramos solos residuais maduros, onde podemos observar fotos tiradas com uma lupa na figura 6.4, estes solos exibem elevado grau de alteração intempérica, de coloração predominantemente marrom escura.

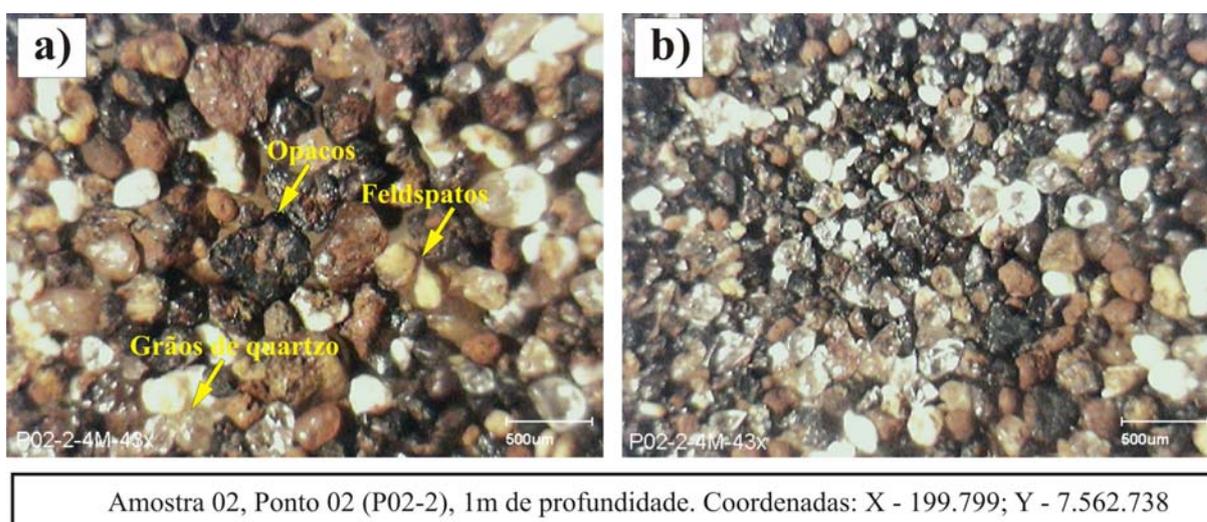


Figura 6.4. Fotos de grãos lavados com defloculante da Fm. Serra Geral na lupa.

É possível observar na figura 6.4 grãos minerais atribuídos a um horizonte de solo maduro, nota-se uma quantidade considerável de minerais opacos, consistindo em óxidos de ferro (hematita e magnetita), feldspatos e um certo teor de quartzo.

Nas porções mais superficiais, como se trata de um talude inclinado pode ocorrer uma mistura de material, a amostra foi coletada a 0,2 m, para dentro da face do talude, procurando evitar a coleta de material contaminado. Mesmo assim o material atribuído a alteração de rochas básicas, apresentou quartzos arredondados, dando a interpretação de que a profundidade de coleta não foi suficiente para amostrar um material puro, ou trata-se de um depósito retrabalhado com “contaminação” por quartzo sedimentar.

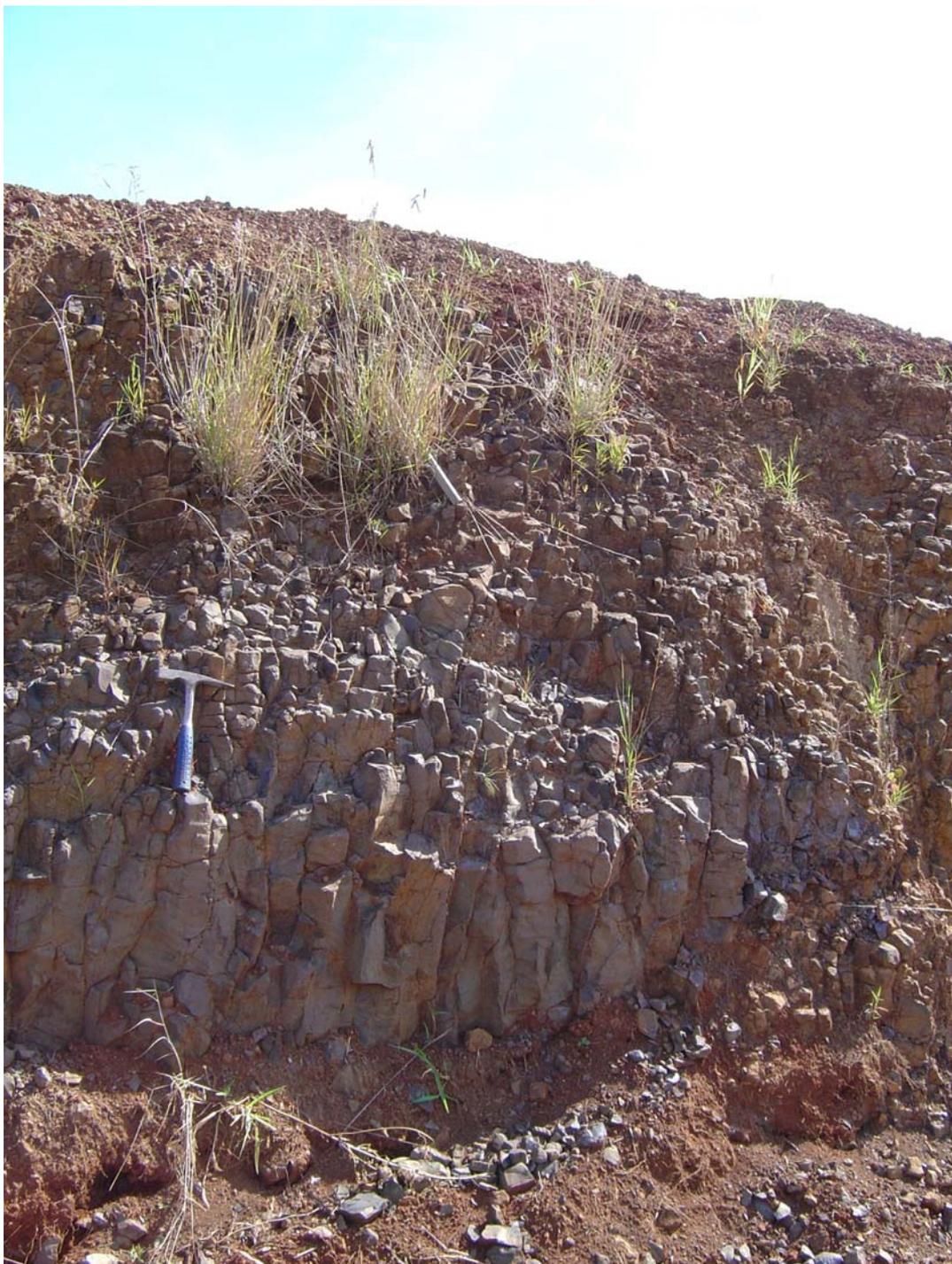


Figura 6.5. Afloramento da Fm. Serra Geral (Ponto 126 - Coordenadas: X - 202.533, Y - 7.561.799).



Figura 6.6. Afloramento da Fm. Serra Geral (Ponto 150 - Coordenadas: X - 198.536, Y - 7.560.855).

Foram realizadas diversas análises laboratoriais para caracterizar os materiais inconsolidados do compartimento no ponto de vista geotécnico. Na amostra classificada como

solo residual maduro, na tabela 6.4 podemos observar os índices físicos da amostra denominada 02-2.

Tabela 6.4. Índices físicos de uma amostra da Fm. Serra Geral.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ	1,572	g/cm^3
$W(média)$	21,08	%
ρ_d	1,298	g/cm^3
ρ_s	3,042	g/cm^3
e	1,34	
n	57	%
S_r	48	%

Os Limites de Consistência encontrados foram: LL = 49; LP = 33; IP = 16.

Na figura 6.7 observa-se a análise granulométrica referente à amostra, que apresenta um elevado teor de finos, com 45% da fração argila, 30% da fração silte, o restante é foi determinado como uma porção ínfima de areia grossa e pedregulho, tendo uma divisão equilibrada entre as frações areia fina e média.

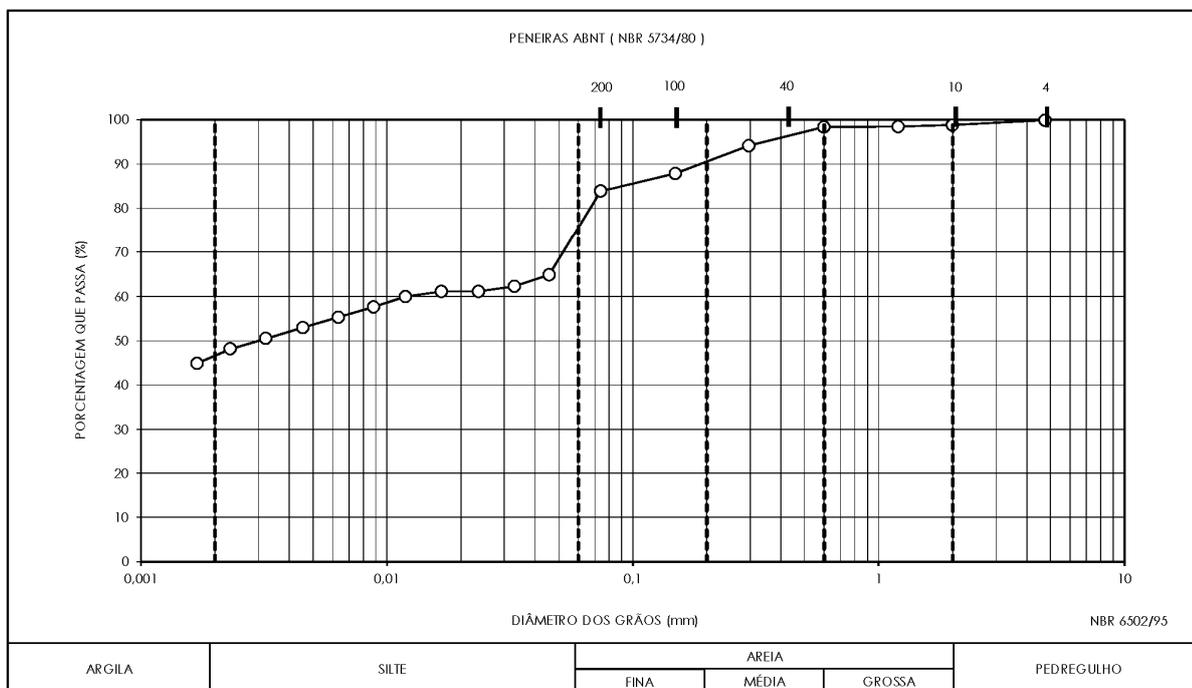


Figura 6.7. Análise granulométrica conjunta de uma amostra do compartimento Serra Geral.

O pH da amostra foi medido em 6,38 e o Eh em 359 mV.

São apresentados a seguir alguns dados obtidos em trabalhos anteriormente realizados na área de estudos, dando maior importância para os trabalhos considerados mais relevantes.

Destacamos os resultados do trabalho executado por Aguiar (1989), onde o autor caracterizou quatro amostras correspondentes à área de afloramento da Fm. Serra Geral mapeada neste trabalho. Os dados de Aguiar (1989) correspondem a análises granulométricas (tabela 6.5) e índices físicos (tabela 6.6).

Oliveira e Prado (1984) determinaram uma CTC entre 7,6 e 10,5 Cmol/kg, de acordo com Oliveira e Prado (1984) e Pons (2006) os solos da Fm. Serra Geral não apresentam problemas com expansibilidade.

Nishiyama (1989) determinou a massa específica seca variando de 1,49 g/cm³ a 1,65 g/cm³, a umidade ótima para compactação dos solos varia de 23,4 a 31,6%, a condutividade hidráulica foi determinada em uma faixa que varia de 10⁻⁶ a 10⁻³ cm/s, os valores diminuem com a profundidade no perfil.

Tabela 6.5. Análises granulométricas da Fm. Serra Geral Aguiar (1989).

Ponto	Coordenadas		Profundidade (m)	Granulometria - ABNT (%)					
	X	Y		Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila
RA017	198528	7560645	0,80	0,00	0,10	1,10	52,80	16,50	29,50
RA077	199086	7559959	0,80	0,40	0,10	2,60	26,80	24,80	45,20
RA108	198127	7561419	0,80	0,90	1,20	4,90	31,20	35,80	26,00
RA741	199205	7562053	0,80	0,00	0,00	3,70	20,70	25,60	50,00

Tabela 6.6. Índices físicos e limites de Atterberg da Fm. Serra Geral Aguiar (1989).

Ponto	Massa Específica (g/cm ³)			Índice de Vazios	Úmidade (%)		Limites de Atterberg (%)		
	Sólido	Seca	Solo		Natural	Higroscópica	LL	LP	IP
RA017	2,765	1,340	1,593	1,063	18,90	10,10	30,10	21,20	9,00
RA077	3,004	1,375	1,774	1,185	29,00	17,70	42,40	33,00	9,40
RA108	2,840	ne	Ne	ne	25,00	14,40	37,60	29,70	7,90
RA741	2,946	1,372	1,711	1,147	24,70	14,40	42,30	32,90	9,40

Muro (2000) apresenta dados granulométricos, do compartimento com a fração areia fina entre 10 e 35%, silte entre 20 e 45%, e argila entre 25 e 60%. A coloração é predominantemente avermelhada a marrom. O IP encontrado pelo autor é de 20%. A massa específica dos sólidos ocorre entre 2,72 a 2,92 g/cm³, e o índice de vazios varia de 0,80 a 1,59.

Este compartimento ocorre estratigraficamente acima do compartimento Botucatu, exibindo textura predominantemente argilosa, com presença de minerais na fração areia, como pode ser observado nas análises granulométricas apresentadas.

Os valores encontrados por Aguiar (1989) são coerentes com o valor encontrado na análise realizada neste trabalho, coerente também com os valores encontrados por Muro (2000).

O IP encontrado (16%) se aproxima do valor que Muro (2000) da ordem de 20%. Valores elevados comparados com os encontrados por Aguiar (1989), cuja média dos valores apresentados foi de 9 %.

A condutividade hidráulica apresentada por Nishiyama (1989), varia da ordem de 10⁻⁶ a 10⁻³ cm/s. A variação ocorre possivelmente devido ao teor de finos ser maior em algumas porções do que em outras.

Devido o solo proveniente da alteração intempérica ter uma textura mais argilosa, a unidade apresenta uma boa resistência quanto a ação do contaminante, devido sua menor condutividade hidráulica.

Porém como a rocha está intensamente fraturada, exibindo um padrão de disjunção colunar com fraturas praticamente verticais, consiste em um padrão mais crítico, devido à condutividade hidráulica em fraturas ser mais elevada. Caso o contaminante atinja essas áreas, pode migrar mais rapidamente até o aquífero Guarani, estratigraficamente abaixo desta unidade.

6.1.3 Compartimento Itaqueri

Este compartimento aparece recobrendo o compartimento Serra Geral, tem sua transição marcada por uma porção de coloração mais escura, com tons vermelho escuro a marrom, possui um alto índice de óxidos e feldspatos intemperizados (figura 6.8), também aparecendo quartzo imaturo, estes materiais tratam-se de materiais inconsolidados.

Logo acima desta camada basal, podemos observar a feição que mais se repete na área de estudos, representada pelas figuras 6.9, 6.10 e 6.11. As duas primeiras figuras representam amostras observadas em lupa após lavagem com defloculante e a figura 6.11 um afloramento típico desta unidade na área de estudos.

As figuras 6.9 e 6.10 estão representando um perfil da Fm. Itaqueri, coletadas no mesmo local, a primeira a 1 (um) metro de profundidade e a segunda a dois metros, as amostras são separadas por uma linha de seixos. O perfil apresenta uma textura de coloração variegada, com manchas acinzentadas em uma matriz marrom clara.

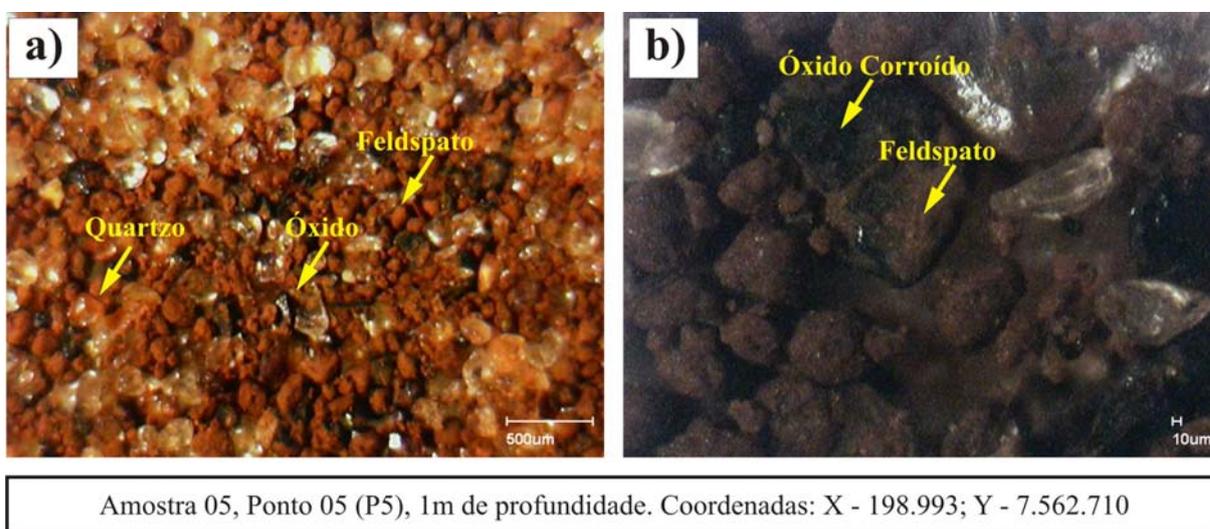


Figura 6.8. Amostras lavadas com defloculante da porção basal da Fm. Itaqueri, vista em lupa.

É possível observar uma composição predominantemente quartzosa com feldspatos e óxidos, os quartzos aparecem claros e imaturos em sua maioria, aparecendo alguns grãos mais

arredondados e foscos, semelhantes aos grãos característicos da Fm. Botucatu. Podendo estar relacionado ao retrabalhamento desta em uma possível área fonte soerguida nas imediações.

Os sedimentos desta unidade são importantes. Levando-se em conta que a maioria dos postos de combustíveis analisados encontra-se neste compartimento.

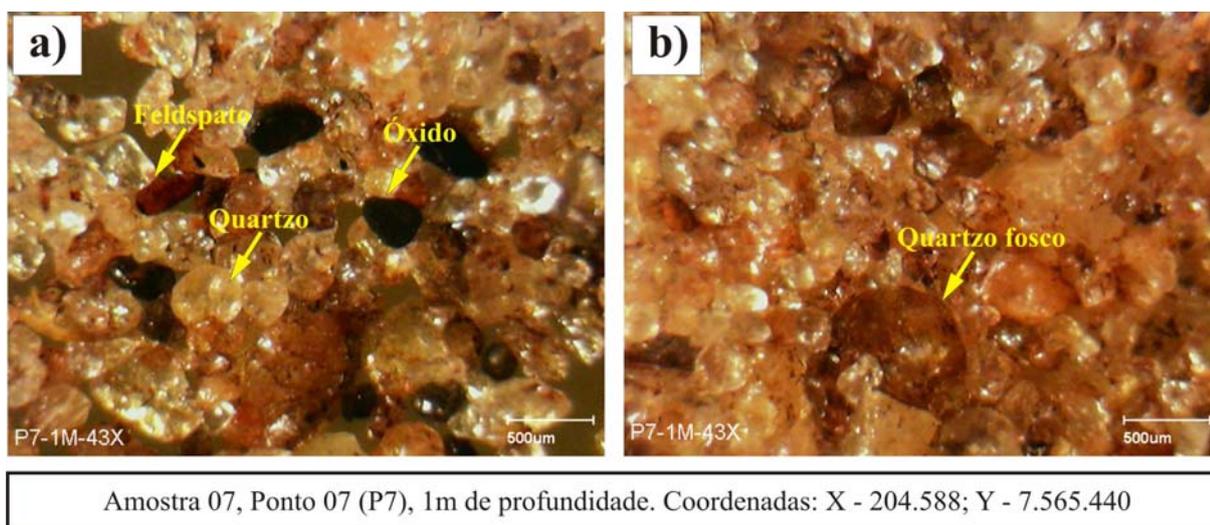


Figura 6.9. Amostras lavadas com defloculante da porção superior da Fm. Itaquerí, vista em lupa.

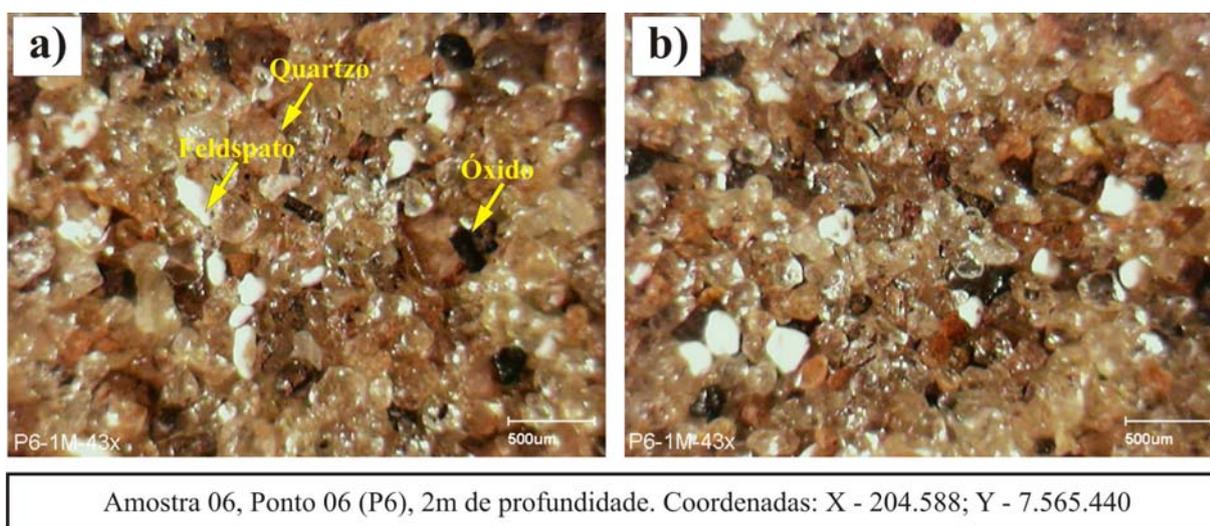


Figura 6.10. Amostras lavadas com defloculante da porção superior da Fm. Itaquerí, vista em lupa.



Figura 6.11. Feição característica da Fm. Itaqueri na área de estudos (afioramento da Fm. Itaqueri - Ponto 99 - Coordenadas: X - 158.157, Y - 7.564.882).

Abaixo observamos o resultado da caracterização de algumas amostras. A amostra 05 (Coordenadas: X – 198.993; Y – 7.562.710), referente à base da Fm. Itaqueri teve a porção indeformada rompida, impossibilitando a determinação de alguns índices físicos, podemos observar o resultado da massa específica seca na tabela 6.7.

Tabela 6.7. Índices Físicos da amostra 05.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ_s	2,835	g/cm^3

Os limites de consistência determinados foram: LL = 38; LP = 27; IP = 11.

A análise granulométrica da amostra 05 pode ser observada na figura 6.12.

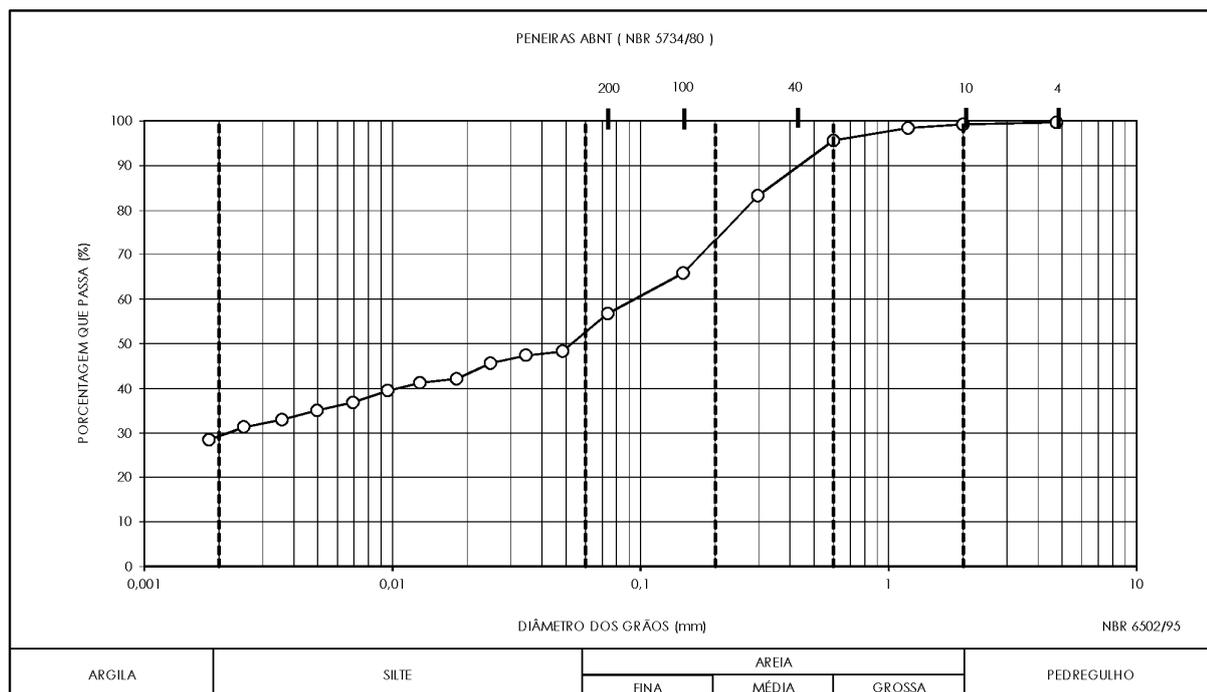


Figura 6.12. Análise granulométrica da porção basal da Fm. Itaqueri.

O pH da amostra 05 foi determinado em 5,80 e o Eh em 349 (mV).

A seguir são apresentados os resultados das análises das amostras 06 e 07 coletadas nas coordenadas: X – 204.588 e Y – 7.565.440. Os índices físicos da amostra 06 podem ser observados na tabela 6.8 e a análise granulométrica na figura 6.13. Amostra 06 corresponde ao material argiloso mosqueado, a 2 metros de profundidade e a 07, material sobre a linha de seixos (também amostrada), de textura areno-argilosa, ambos correspondentes a Fm. Itaqueri. A linha de seixos é constituída predominantemente por quartzo leitoso e vítreo, aparecendo também seixos de laterita.

Tabela 6.8. Índices físicos da amostra 06.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ	1,990	g/cm^3
$W(\text{média})$	30,36	%
ρ_d	1,527	g/cm^3
ρ_s	2,997	g/cm^3
e	0,96	
N	49	%
S_f	94	%

Os limites de consistência determinados foram: $LL = 70$; $LP = 44$; $IP = 26$.

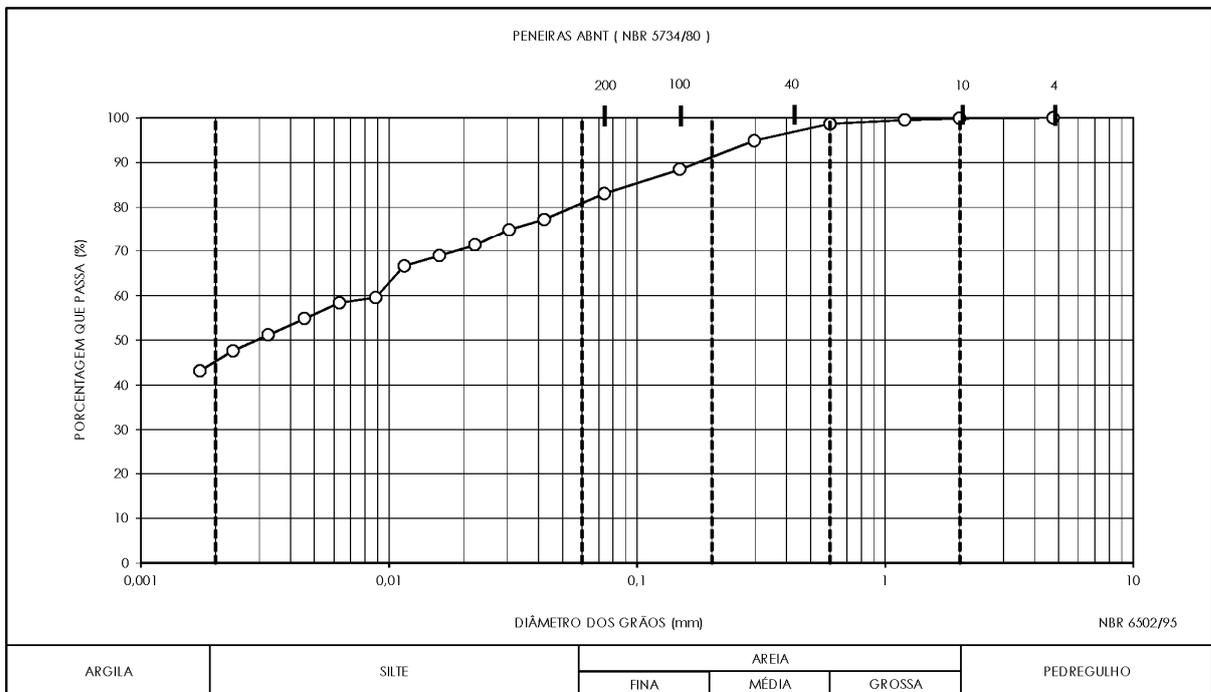


Figura 6.13. Curva granulométrica da amostra 06.

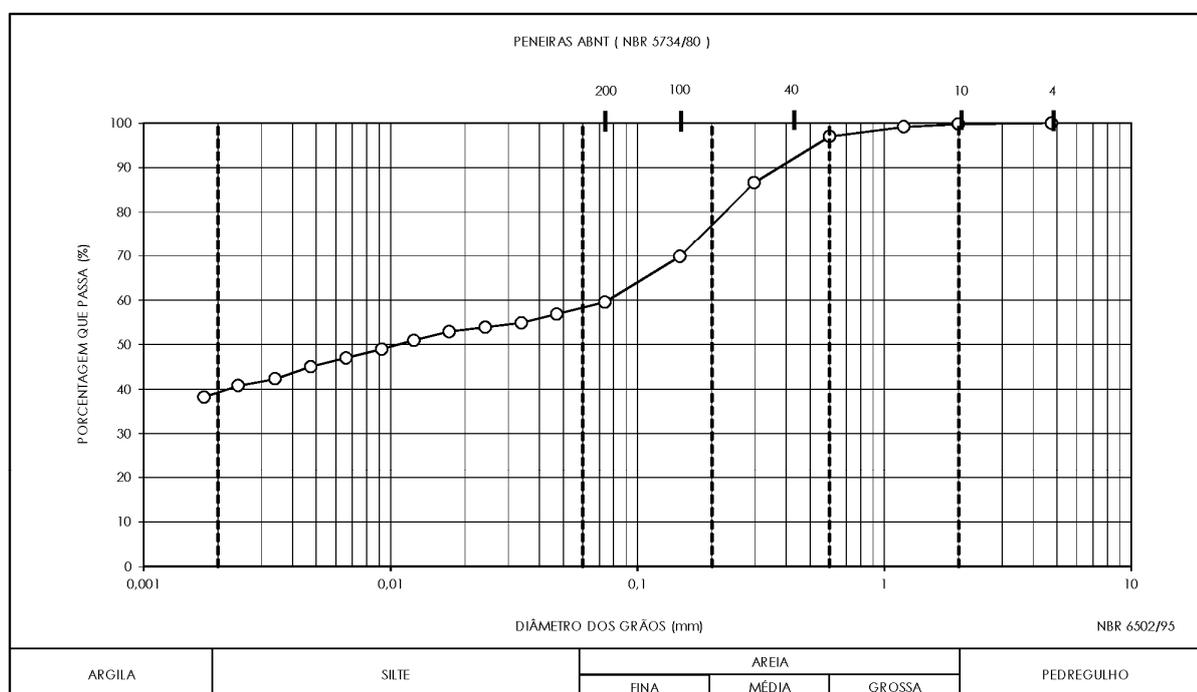
O pH da amostra 06 foi determinado em 6,01 e o Eh em 356 (mV).

A seguir observamos os resultados das análises da amostra 07, os índices físicos podem ser observados na tabela 6.9, e a curva granulométrica na figura 6.14.

Tabela 6.9. Índices físicos da amostra 07.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ	2,014	g/cm^3
$W(\text{média})$	15,66	%
ρ_d	1,742	g/cm^3
ρ_s	2,801	g/cm^3
e	0,61	
N	38	%
S_r	72	%

Os limites de consistência determinados foram: $LL = 53$; $LP = 24$; $IP = 28$.

**Figura 6.14.** Curva granulométrica da amostra 07.

O pH da amostra 07 foi determinado em 6,28 e o Eh em 334 (mV).

Novamente os dados secundários disponíveis de maior relevância são os dados obtidos por Aguiar (1989), onde o autor apresenta 45 amostras analisadas na área aflorante da Fm. Itaqueri. Apresentando resultados de análise granulométrica (tabela 6.10) e índices físicos (tabela 6.11).

Tabela 6.10. Análises Granulométricas da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).

Ponto	X	Y	Profund.	Granulometria - ABNT (%)					
				(m)	Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte
RA003	197147	7563522	0,80	0,00	0,00	15,90	44,90	6,30	32,90
RA005	197446	7562127	0,80	0,00	0,00	4,80	22,90	23,60	48,70
RA124	196381	7563728	0,80	0,00	0,00	15,00	47,40	9,20	28,30
RA132	197912	7562330	0,80	0,00	0,10	10,70	37,60	15,30	36,30
RA309	205907	7562268	0,80	0,00	0,00	10,20	44,00	10,80	35,00
RA316	205745	7564120	0,80	0,00	0,00	13,40	52,80	6,40	27,40
RA434	204109	7567678	0,80	0,00	0,00	30,80	45,60	4,60	18,90
RA446	202363	7567752	1,50	0,00	0,00	11,20	40,60	15,00	33,10
RA447	202657	7566921	0,80	0,00	0,10	19,80	41,60	7,10	31,40
RA478	206400	7567876	1,00	0,00	0,20	12,30	51,50	7,60	28,40
RA492	206387	7565993	0,80	0,00	0,00	10,90	40,70	9,50	38,90
RA527	204117	7566231	0,80	0,00	0,10	6,90	58,50	13,60	20,90
RA533	203418	7565927	2,00	0,00	0,90	4,10	24,40	27,80	42,70
RA540	204597	7563953	0,80	0,00	0,10	12,70	56,20	11,80	19,20
RA546	204368	7565474	1,00	0,20	0,60	9,40	24,10	22,20	43,40
RA557	204966	7562453	5,20	0,00	0,20	11,00	42,60	22,30	23,80
RA564	201800	7566446	0,80	0,00	0,00	4,50	32,10	21,40	42,00
RA578	199952	7568157	0,80	0,00	0,20	18,40	42,60	9,30	29,50
RA621	198611	7566605	0,80	0,00	0,10	12,20	51,00	9,60	27,10
RA625	196223	7567924	0,80	0,00	0,10	16,00	54,70	7,40	21,80
RA645	197586	7567343	0,80	0,00	0,10	12,10	47,30	14,50	26,00
RA655	199372	7567357	0,80	0,00	0,00	12,20	45,80	9,60	32,50
RA662	199579	7566605	0,80	0,00	0,00	9,20	47,40	12,80	30,50
RA665	197142	7566802	0,80	0,00	0,00	12,30	46,50	10,20	31,00
RA667	198050	7565762	1,00	0,00	0,00	14,30	42,60	10,80	32,20
RA671	201008	7567651	0,80	0,00	0,30	15,10	45,20	15,20	24,20
RA704	196201	7566099	0,80	0,00	0,10	14,80	50,80	9,80	24,50
RA709	196689	7565936	0,80	0,00	0,00	14,30	51,50	15,90	18,30
RA710	196386	7565140	0,80	0,00	0,30	12,70	46,50	9,70	30,90
RA717	199086	7565633	0,80	0,00	0,30	9,90	49,80	11,30	28,60
RA720	199702	7565575	0,80	0,00	0,00	15,30	50,40	17,60	16,70
RA724	197644	7564784	0,80	0,00	0,10	14,50	47,00	17,30	21,10
RA726	196663	7564515	0,80	0,00	0,00	15,50	48,10	15,50	20,90
RA727	197617	7563873	0,80	0,00	0,10	28,30	42,10	8,70	20,80
RA731	198013	7562871	0,80	0,00	0,10	13,00	54,60	10,90	21,40
RA734	199117	7563135	0,80	0,00	0,10	13,60	46,10	20,00	20,20
RA736	198514	7562756	0,80	0,00	0,10	13,40	40,00	13,50	33,10
RA738	197762	7563319	0,80	0,00	0,10	15,80	55,20	6,90	22,00
RA743	197028	7561564	0,80	2,00	3,50	6,60	36,30	40,50	11,10

Continuação - Tabela 6.10. Análises Granulométricas da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).

Ponto	X	Y	Profund.	Granulometria - ABNT (%)					
				(m)	Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte
RA761	206132	7564995	0,80	0,00	0,30	6,40	30,10	15,80	47,70
RA764	205124	7567299	0,80	0,00	0,80	11,50	37,60	10,00	40,10
RA769	196526	7567079	0,80	0,00	0,00	15,20	43,70	10,60	30,50
RA774	202116	7565540	0,80	0,00	0,00	13,10	54,60	15,30	17,00
RA775	202780	7565316	0,80	0,00	0,00	15,40	57,10	7,80	19,70
RA779	197432	7562611	0,80	0,00	0,00	12,60	45,60	10,60	31,20

Tabela 6.11. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).

Ponto	Massa Específica (g/cm ³)			Índice de Vazios	Úmidade (%)		Limites de Attemberg (%)		
	Sólido	Seca	Solo		Natural	Higroscópica	LL	LP	IP
RA003	2,693	1,208	1,471	1,229	21,80	8,70	30,30	24,80	5,50
RA005	2,899	1,128	1,419	1,570	25,80	12,70	41,90	30,80	11,10
RA124	2,661	ne	ne	Ne	17,60	9,10	33,00	22,80	10,20
RA132	2,739	1,449	1,742	0,890	20,20	9,80	30,70	19,10	11,60
RA309	2,694	1,577	1,870	0,708	18,60	13,80	30,60	23,10	7,50
RA316	2,647	1,384	1,586	0,913	14,60	9,90	np	np	np
RA434	2,631	1,404	1,680	0,874	19,70	10,00	np	np	np
RA446	2,724	1,242	1,537	1,193	23,80	16,80	33,70	27,10	6,60
RA447	2,629	1,439	1,725	0,827	19,90	11,40	31,30	22,00	9,30
RA478	2,670	ne	ne	Ne	17,30	9,90	30,20	20,20	10,00
RA492	2,670	ne	ne	Ne	20,80	12,40	35,90	25,50	10,40
RA527	2,656	ne	ne	Ne	15,50	8,40	25,60	16,90	8,80
RA533	2,906	1,309	1,701	1,220	29,90	27,10	53,30	40,40	12,90
RA540	2,682	1,641	1,880	0,634	14,60	13,40	np	np	np
RA546	2,864	ne	ne	Ne	30,10	23,50	48,90	34,80	14,10
RA557	2,669	1,397	1,680	0,911	20,30	9,20	37,40	28,10	9,30
RA564	2,867	1,227	1,555	1,337	26,70	15,00	44,20	35,30	8,90
RA578	2,660	1,383	1,589	0,923	14,90	8,60	31,20	25,00	6,20
RA621	2,636	ne	ne	Ne	18,00	9,60	39,70	27,00	12,70
RA625	2,659	1,486	1,727	0,789	16,20	5,10	np	np	np
RA645	2,680	ne	ne	Ne	15,70	8,90	31,90	23,90	8,00
RA655	2,668	ne	ne	Ne	15,10	8,50	32,20	23,70	8,50
RA662	2,781	ne	ne	Ne	23,10	13,90	np	np	np
RA665	2,650	1,352	1,591	0,960	17,70	11,30	30,90	24,90	6,00
RA667	2,682	1,306	1,546	1,054	18,40	11,80	np	np	np
RA671	2,617	ne	ne	Ne	16,40	8,90	29,40	21,10	8,30
RA704	2,665	ne	ne	Ne	18,90	10,30	28,20	24,10	4,10

Continuação - Tabela 6.11. Índices físicos e limites de Attemberg da Fm. Itaqueri Aguiar (1989).

Ponto	Massa Específica (g/cm ³)			Índice de Vazios	Úmidade (%)		Limites de Attemberg (%)		
	Sólido	Seca	Solo		Natural	Higroscópica	LL	LP	IP
RA709	2,673	ne	ne	Ne	14,70	7,40	27,40	21,00	6,40
RA710	2,663	1,410	1,688	0,889	19,70	12,60	36,70	28,30	8,40
RA717	2,687	1,301	1,562	1,065	20,00	7,30	42,00	27,70	14,30
RA720	2,666	ne	ne	Ne	16,10	8,80	35,80	25,40	10,40
RA724	2,663	ne	ne	Ne	18,30	10,80	31,80	25,60	6,20
RA726	2,642	ne	ne	Ne	20,20	12,30	33,30	26,10	7,20
RA727	2,562	1,572	2,317	0,630	13,50	9,20	np	np	np
RA731	2,658	ne	ne	Ne	16,00	8,80	30,20	19,60	10,60
RA734	2,703	1,403	1,685	0,927	20,10	11,40	34,40	24,30	10,10
RA736	2,739	1,649	1,860	0,661	12,80	11,40	32,80	23,80	9,00
RA738	2,667	1,459	1,733	0,828	18,80	7,20	30,60	21,40	9,20
RA743	2,871	ne	ne	Ne	38,50	25,50	49,30	40,10	9,20
RA761	2,784	ne	ne	Ne	29,60	23,40	46,10	30,20	15,90
RA764	2,667	ne	ne	Ne	19,40	10,70	40,10	26,90	13,20
RA769	2,656	ne	ne	Ne	16,50	8,60	np	np	np
RA774	2,677	1,429	1,624	0,873	13,70	7,90	np	np	np
RA775	2,665	1,428	1,623	0,866	13,70	7,30	25,70	19,00	6,70
RA779	2,649	ne	ne	Ne	18,00	9,90	31,80	25,10	6,70

Podemos observar em trabalhos de outros autores como Muro (2000), alguns dados granulométricos das amostras de solo da área, mostrando na granulometria que a areia fina é a principal fração (aproximadamente 60%), seguido da areia média (de 2 a 20%), silte (de 5 a 28%) e argila (10 a 63,5%). A massa específica dos sólidos segundo o autor varia entre 2,57 a 2,80 g/cm³, índice de vazios entre 0,74 a 1,06, e massa específica seca entre 0,74 a 1,72 g/cm³ e o IP gira em torno de 17%.

Bortolucci (1983) apresenta como resultados a massa específica seca máxima variando de 1,31 a 1,99 g/cm³, a umidade ótima varia de 8,70 a 25,8%, conforme Bortolucci (1983), a condutividade hidráulica varia desde 10⁻⁵ a 10⁻² cm/s. A CTC está entre 9,5 a 10,1 Cmol/kg, de acordo com Oliveira e Prado (1984).

Deve se ressaltar que os autores Muro (2000) e Aguiar (1989) interpretaram a unidade Itaqueri como Grupo Bauru, porém em trabalhos mais recentes como o de Pons (2006) já vem sendo utilizada a terminologia Fm. Itaqueri para esta unidade.

A unidade é de grande importância para o estudo, devido ao fato de que nela está inserida a maior parte da área urbanizada do município, local onde também se encontram implantados a maioria dos postos de combustíveis analisados.

A amostra coletada na porção basal da Fm. Itaqueri apresenta um teor de argila de aproximadamente 28%, com cerca de 20% de silte e o restante composto por areias (fina e média). Esta porção basal aparece parcialmente em alguns mapas, mapeada como Fm. Serra Geral, provavelmente devido a sua coloração em campo ser mais escura. Porém o teor de grãos de quartzo, quando as amostras são lavadas com defloculante, ou até mesmo sem a utilização deste. Mostra um teor de areias quartzosas considerável, estas exibem um padrão predominantemente arredondado, aparecendo alguns grãos com porções facetadas, por vezes aparecem foscos, aparecendo também translúcidas.

Encontramos na porção NE da área de estudos, uma linha de seixos cuja espessura varia de 0,10m até 0,50m, como foi observado em campo. A linha de seixos apresenta uma composição predominantemente quartzosa. As amostras coletadas a baixo e a cima da linha de seixos, revelaram um índice de vazios maior na porção inferior (0,96) do que na superior a linha de seixos (0,61). Ambas possuem IP semelhante, a amostra inferior a linha de seixos aparece com 80% de finos, sendo 42% de argila e a amostra acima da linha de seixos possui aproximadamente 58% de finos, sendo 38% de argila, o restante de ambas as amostras é constituído por areias quartzosas. Certamente o maior índice de vazios da amostra que se encontra a baixo da linha de seixos, foi maior devido ao elevado teor de argilas.

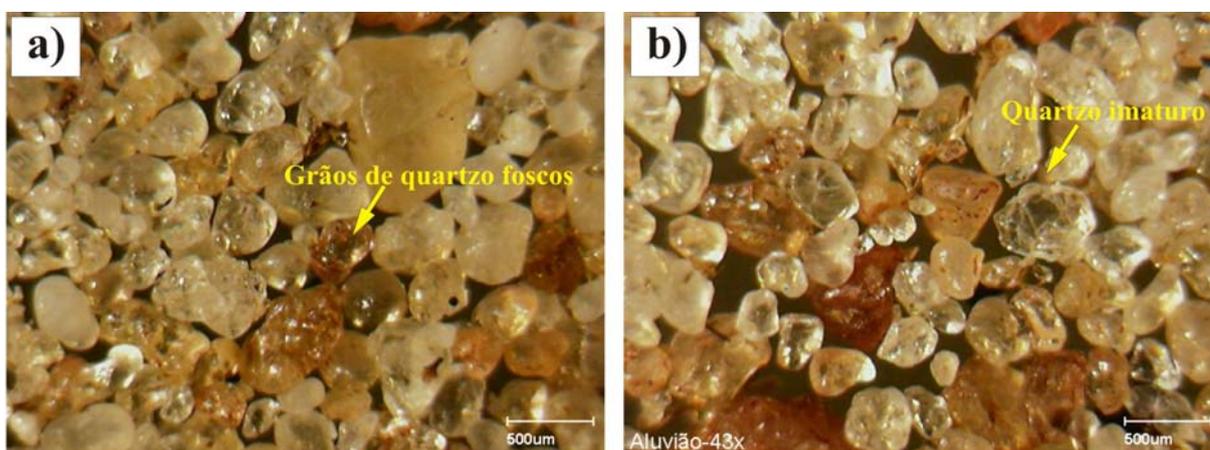
Podemos observar um grau de alteração elevado em ambas as amostras, tanto a cima quanto a baixo da linha de seixos. Indicando que a deposição foi formada a um tempo considerável e posteriormente o pacote sedimentar foi alterado. Os dados secundários compilados de Aguiar (1989) indicam um índice de vazios médio de 0,94, variando de 0,661 a 1,570. O IP médio é igual a 9,26, variando de 4,10 a 15,90.

O teor médio de argila encontrado por Aguiar (1989) foi de 28%, dentro de uma faixa de variação que vai de 20,20 a 48,7. O valor médio de silte é igual a 13,36, variando de 6,30 a 40,50. De forma significativa as areias finas predominam sobre as areias grossas, análise corroborada por Muro (2000).

Podemos considerar os valores de condutividade hidráulica (10^{-5} a 10^{-2} cm/s) apresentados por Bortolucci (1983), característicos de areias argilosas, ou areias siltosas. São valores que podem representar uma certa fragilidade, que o compartimento apresenta em relação a um possível derramamento de poluentes. Conferindo uma velocidade relativamente alta de percolação.

6.1.4 *Compartimento Aluvial*

Este compartimento possui sua faixa de ocorrência restrita principalmente a região Sul da área de estudos, aparecendo relacionado a planícies de inundação e margens do rio Monjolinho. Podemos observar na figura 6.15, areias lavadas com defloculante, representando o compartimento Aluvial, observamos praticamente grãos de quartzo, aparecendo tanto imaturos texturalmente, quanto exibindo um bom arredondamento e esfericidade. Indica ser um material com duas áreas fontes. Em campo a coloração do material é predominantemente amarelada, por vezes aparecendo cinza clara. Podemos observar na figura 6.16, um afloramento típico deste compartimento, localizado às margens do rio monjolinho.



Amostra retirada de um Aluvião, 1m de profundidade. Coordenadas: X - 196.552; Y - 7.560.452

Figura 6.15. Areias de aluvião lavadas com defloculante representando o compartimento Aluvial.

Devido a morfologia atual do canal de drenagem, podemos inferir que os grãos foscos são provenientes da Fm. Botucatu, onde o aluvião está inserido e os grãos imaturos provém da

Fm. Itqueri, que está estratigraficamente acima e abriga diversas nascentes dos cursos d'água que são tributários ao Monjolinho.



Figura 6.16. Afloramento de Aluvião foto no córrego Monjolinho (Ponto 285 - Coordenadas: X - 200.175, Y - 7.563.614).

Na tabela 6.12, observamos os índices físicos deste compartimento, foi coletada amostra indeformada (Coordenadas: X – 196552, Y – 7560452) , porém, ao manusear a amostra em laboratório está rompeu. A curva granulométrica determinada a partir da amostra a cima pode ser observada na figura 6.17. Observamos que a amostra apresenta um teor de argila de aproximadamente 11%, silte 9% e à uma predominância de areias, com aproximadamente 50% de areias finas e 30% de areias grossas.

Tabela 6.12. Índices físicos do compartimento Aluvionar.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ_s	2,625	g/cm^3

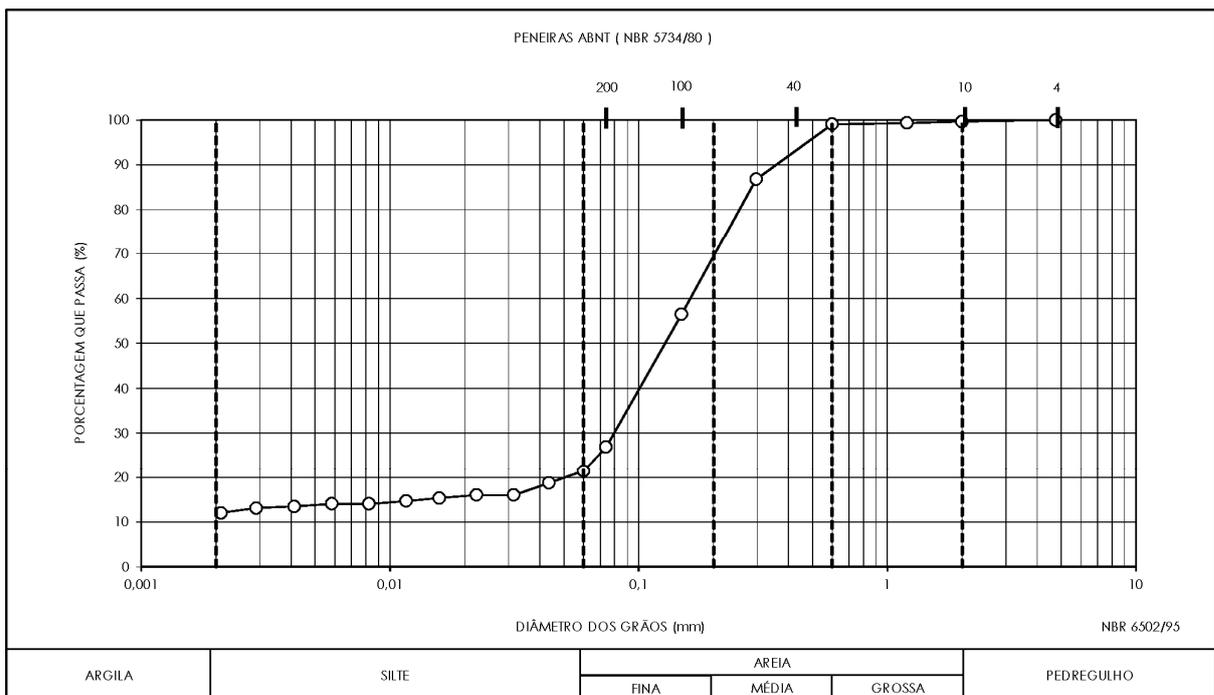


Figura 6.17. Curva granulométrica determinada no compartimento Aluvionar.

Os limites de consistência determinados foram: LL = 19; LP = np; IP = np.

O pH determinado foi de 5,98 e o Eh de 343 (mV).

Na tabela 6.13 consta a análise granulométrica apresentada por Aguiar (1989), no local em que foi definido o compartimento aluvionar neste trabalho. Na tabela 6.14 observamos as análises (nos mesmos pontos), dos índices físicos e limites de Attemberg.

Tabela 6.13. Análise granulométrica no compartimento Aluvionar (Aguiar 1989).

Ponto	X	Y	Profund. (m)	Granulometria - ABNT (%)					
				Pedr.	Ar. Grossa	Ar. Média	Ar. Fina	Silte	Argila
RA011	197600	7560808	2,00	0,60	0,40	0,90	23,70	26,60	47,80
RA071	200691	7558367	1,8	0,00	2,70	11,10	35,90	12,40	37,90

Tabela 6.14. Índices físicos e limites de Attemberg de amostras do compartimento Aluvionar (Aguiar 1989).

Ponto	Massa Específica (g/cm ³)			Índice de Vazios	Úmidade (%)		Limites de Attemberg (%)		
	Sólido	Seca	Solo		Natural	Higroscópica	LL	LP	IP
RA011	2,908	1,146	1,588	1,538	38,60	17,30	52,40	38,20	14,20
RA071	2,79	1,313	1,647	1,123	25,400	11,40	48,40	32,80	15,60

De acordo com Pons (2006) estes materiais têm ocorrência restrita na área, esta unidade compreende materiais arenosos, argilosos, e siltosos de deposição recente, restrita às planícies aluvionares.

São ricos em matéria orgânica, apresentam baixa declividade e espessuras variadas, de difícil identificação. A coloração varia na sua extensão permanecendo as tonalidades amarela clara a cinza clara.

Em campo as amostras desta unidade são inconsolidadas e aparecem saturadas, de coloração predominantemente amarelada, a composição é praticamente quartzosa. Os materiais desta unidade, conforme foi apresentado anteriormente possuem um pH que oferece baixa tendência a corrosividade (5,98), assim como o Eh.

Não foi constatado nenhum posto de combustível nesta área, também tratam se de áreas de APPs (Áreas de Proteção Permanente).

Devido ao elevado grau de saturação, não é uma área indicada para construir um posto de combustível. Apesar da área estar em um local de baixa declividade, movimentações verticais no terreno, devido a consolidação do material podem causar danos em tubulações relacionadas aos tanques de armazenamento.

6.1.5 *Compartimento Coluvionar*

O compartimento aparece associado a movimentos de massa, nas encostas das cuestas basálticas. Os afloramentos possuem morfologia típica de leque coluvial. Aparecem em diversos pontos, ao longo da linha de cuesta basáltica. Esta unidade está sobre os arenitos da Fm. Botucatu, possuindo também uma contribuição deste material. Porém a constituição textural principal desta unidade está relacionada as areias da Fm. Itaqueri.

Podemos observar na figura 6.18 grãos de quartzo foscos e bem arredondados, relacionados a Fm. Botucatu e grãos de quartzo hialinos relacionados a Fm. Itaqueri, também é possível observar um teor considerável de óxidos (provavelmente hematita e magnetita), correlacionados a basaltos da Fm. Serra Geral. Devido ao padrão facetado dos óxidos, podemos supor que o material teve um curto transporte.

Na figura 6.19 observamos um afloramento do compartimento Coluvionar, em processo de coleta de amostra indeformada, na foto observamos o técnico de Geologia da EESC/USP auxiliando na coleta das amostras.

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, para caracterização. A amostra indeformada rompeu no laboratório. As amostras foram coletadas nas coordenadas: X – 198673 e Y – 7560137. O resultado da análise de índices físicos pode ser observado na tabela 6.15. Na figura 6.20 é possível observar a curva granulométrica da amostra coletada na área.

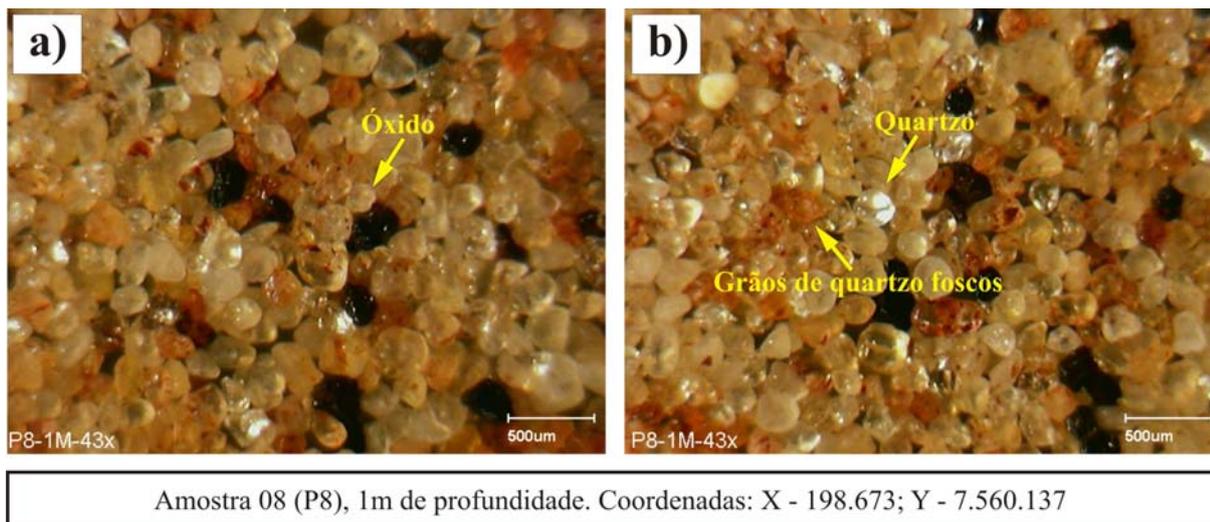


Figura 6.18. Amostra de leque coluvial lavada com defloculante representando o compartimento Coluvionar.

Tabela 6.15. Índices físicos do compartimento Coluvionar.

ÍNDICES FÍSICOS		
ρ_s	2,953	g/cm^3

Os limites de consistência determinados foram: $LL = 32$; $LP = 21$; $IP = 11$.

De acordo com Pons (2006) Os materiais desta unidade são provenientes das encostas do basalto onde ocorre a mistura com areias relacionadas à alteração da Formação Botucatu. São áreas de instabilidade ocasionadas por diversos fatores, como as declividades acentuadas e a heterogeneidade do material, associado a ação antrópica. Apresentam colorações avermelhadas e espessuras variando entre 10 a 20 metros.

Foi observado em campo um avanço do processo de urbanização nesta área, com a formação de loteamentos. Por se tratar de um material coluvionar, relacionado a depósitos recentes, o material não apresenta uma boa consolidação, podendo gerar futuros problemas estruturais nas construções apoiadas nele.



Figura 6.19. Afloramento de Colúvio (Ponto de Amostragem P08 - Coordenadas: X - 198.673, Y - 7.560.137).

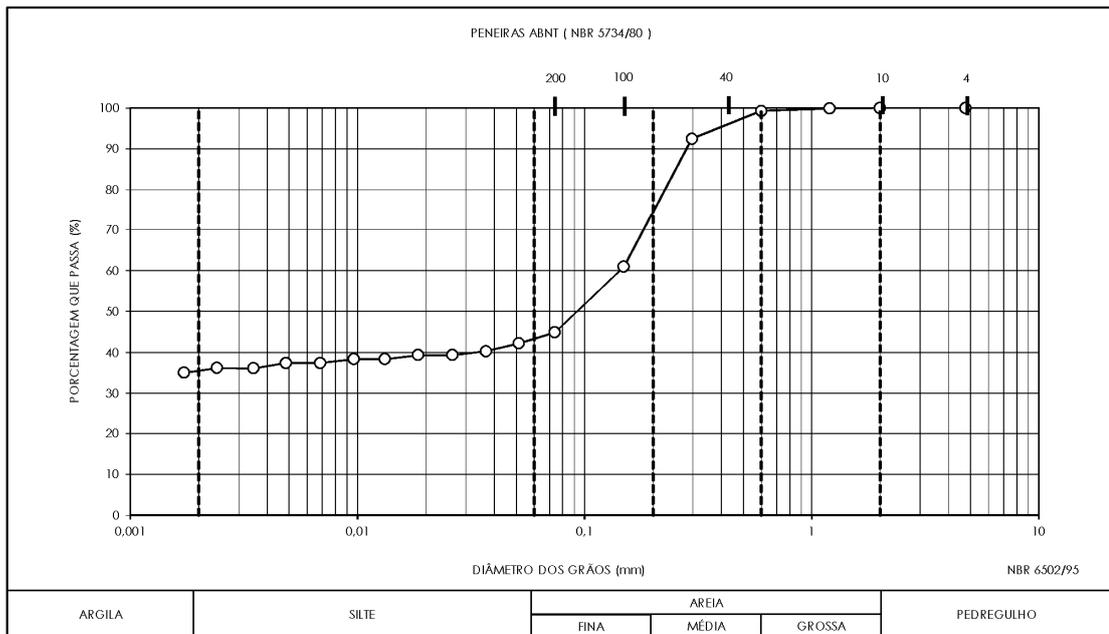


Figura 6.20. Curva granulométrica determinada no compartimento Coluvionar.

Observamos um teor significativo de argila (35%), cerca de 8% de silte e as restantes frações aparecem equilibradas entre areia fina e média. A ausência da fração silte no material ou uma grande discrepância tendendo a ausência desta, em relação as outras frações granulométricas pode ser um fator indicativo de uma tendência ao material apresentar comportamento colapsível.

No que se diz respeito a tanques de combustíveis, onde Pons (2006) determinou uma espessura que varia de 10 a 20 metros para esta unidade, sendo assim caso um posto de abastecimento for construído sobre este compartimento, pode causar possíveis problemas ambientais. Para isso é necessário uma avaliação geotécnica de estabilidade mais profunda neste compartimento para orientar o melhor método construtivo.

6.2 Análise de Vulnerabilidade Utilizando o Método GOD

Como podemos observar no mapa do apêndice 5, temos cinco classes de vulnerabilidade definidas de acordo com os critérios considerados pelo método GOD, lembrando que para definição das classes, foi utilizado o apêndice 3 (referentes a geologia), apêndice 4 referente as unidades de solos e o apêndice 6 para calculo da profundidade do nível freático.

Devemos lembrar que o produto final representa o resultado de uma interpolação espacial, estando condicionado a definição e a interpretação de variáveis. Desta forma o modelo elaborado, trata-se de uma representação do meio físico, dando classes de vulnerabilidade.

Estas classes são apresentadas a baixo, separadas por grau de importância, onde as classes insignificante e baixa são analisadas conjuntamente, posteriormente a classe de vulnerabilidade baixa é analisada e em seguida as classes alta e extrema.

6.2.1 Classes de Vulnerabilidade Insignificante e Baixa

As áreas que são representativas destas classes mostram locais, onde, a vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos não possui uma significância marcante. Estes locais, na área de estudos estão correlacionados principalmente a distância do topo freático à superfície, também correlacionados de forma secundária aos outros fatores.

Quando o topo freático está muito distante da superfície, automaticamente a vulnerabilidade aumenta, como podemos observar no ponto 494 (tabela 6.16). Em alguns locais, devido à influência de outros fatores, como o tipo de cobertura mais arenosa ou material inconsolidado e o grau de confinamento da água subterrânea (mais próximo à superfície/não confinado) fazem a vulnerabilidade aumentar. Podemos observar na figura 6.21 uma região do mapa de vulnerabilidade apresentado no apêndice 3. Destacamos os pontos presentes na área selecionada 491, 492, de vulnerabilidade insignificante e os pontos 344 e 494 de vulnerabilidade baixa (tabela 6.16).

A região selecionada corresponde a uma porção central da área com afloramentos da Fm. Itaqueri, com solos residuais, onde a distância do NA ao topo do terreno é geralmente maior que 50 metros, variando mais próximo a drenagens, onde esta distância diminui. Podemos observar que o confinamento, exerce um peso significativo no extrato selecionado na tabela 6.16, estando relacionado ao grau de confinamento dos aquíferos presentes na área, enquanto que o tipo de cobertura se manteve constante e a distância do NA ao topo do terreno variou somente no ponto 344.

Tabela 6.16. Pontos representativos das unidades definidas pelo método GOD, os pontos constam da figura 6.1.

Ponto	Distância do NA ao Terreno	Confinamento	Cobertura	Índice GOD	Vulnerabilidade
491	0,4	0,6	0,4	0,096	Insignificante
492	0,4	0,6	0,4	0,096	Insignificante
344	0,6	1	0,4	0,24	Baixa
494	0,4	1	0,4	0,16	Baixa

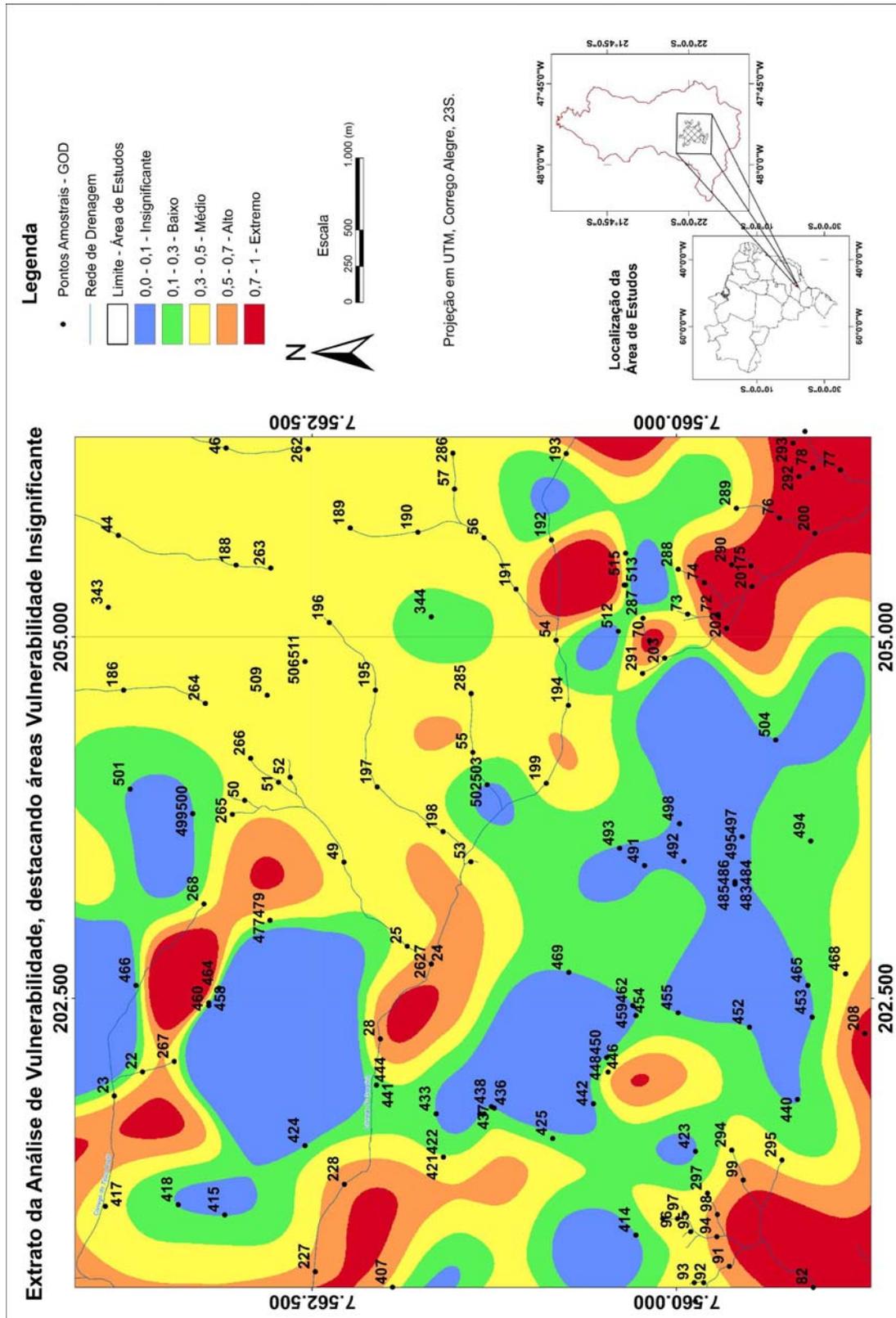


Figura 6.21. Extrato da Análise de Vulnerabilidade, destacando áreas Vulnerabilidade Insignificante e Baixa.

Na porção sul da área (afloramentos da Fm. Botucatu), as áreas de vulnerabilidade baixa são na maioria definidas por interpolação de pontos de vulnerabilidade insignificante a média, já na porção noroeste da área estão presentes mais pontos amostrais relacionados a esta classe no domínio geológico da Fm. Itaqueri, com solos residuais.

6.2.2 Classe de Vulnerabilidade Média

Grande parte dos pontos relativos a esta classe de vulnerabilidade estão em redes de drenagem. Na porção NE da área de estudos, na Fm. Itaqueri, com solos residuais desta formação ocorre uma grande mancha de vulnerabilidade desta classe, condicionada pela distância do NA ao terreno nos pontos amostrais (menor que 5m) e ao grau de confinamento (não confinado), que os pontos amostrais estão relacionados. Na porção Sul da área, observamos vários pontos que não estão relacionados a redes de drenagem como os anteriores, mas estão relacionados a características da Fm. Botucatu, condicionados também por uma distância do NA ao terreno menor que 5 metros e o grau de confinamento não confinado como é o caso dos pontos 468 e 446.

Podemos ilustrar esta área com a figura anterior (6.21), para uma análise mais detalhada, podemos observar o extrato de alguns pontos na tabela 6.17.

Tabela 6.17. Pontos representativos das unidades definidas pelo método GOD, os pontos constam da figura 6.21.

Ponto	Distância do NA ao Terreno	Confinamento	Cobertura	Índice GOD	Vulnerabilidade
195	1	1	0,4	0,4	Média
196	1	1	0,4	0,4	Média
446	1	1	0,4	0,4	Média
468	1	1	0,4	0,4	Média

Observamos na tabela 6.17 que o tipo de cobertura condiciona a vulnerabilidade relativa ao nível médio nos pontos selecionados. Apresentando maior grau ponderação nos outros dois quesitos analisados. Nos pontos 195 e 196 relativos a redes de drenagem tanto o

nível d'água, quanto o confinamento do aquífero são muito vulneráveis, devido à surgência de água no terreno. No caso a vulnerabilidade é amenizada pelo tipo de cobertura.

Nos pontos 446 e 468, podemos observar a mesma configuração de pesos para os atributos analisados, porém não se tratam de canais de drenagem, no entanto o nível d'água está muito próximo à superfície, dando o mesmo valor que é condicionado pelo tipo de cobertura.

6.2.3 *Classes de Vulnerabilidade Alta a Extrema*

Na região central da área de estudos as classes de vulnerabilidades alta e extrema estão mais relacionadas a pontos amostrais em canais de drenagem, em área de afloramento da Fm. Serra Geral. Na região sul estas áreas estão mais correlacionadas com a Fm. Botucatu. Sendo em ambos os casos grande parte das áreas classificadas como alta.

Podemos observar na tabela 6.18, alguns pontos representativos destas classes, a localização espacial dos pontos pode ser observada na figura 6.22.

Tabela 6.18. Pontos representativos das unidades definidas pelo método.

Ponto	Distância do NA ao Terreno	Confinamento	Cobertura	Índice GOD	Vulnerabilidade
13	1	1	0,6	0,6	Alta
379	0,8	1	0,8	0,64	Alta
213	1	1	0,8	0,8	Extrema
221	1	1	0,8	0,8	Extrema

Podemos observar que o ponto amostral 13 (Fm. Serra Geral), de classe alta é condicionado principalmente pelo tipo de cobertura, e o ponto 379 (Fm. Botucatu) pela cobertura e distância do NA ao topo do terreno em ambos os casos o grau de confinamento está na classificação mais alta da tabela. Quanto ao grau extremo, a vulnerabilidade é condicionada apenas pelo tipo de cobertura, que pode diminuir o índice de vulnerabilidade, estando os outros 2 fatores no maior grau de classificação.

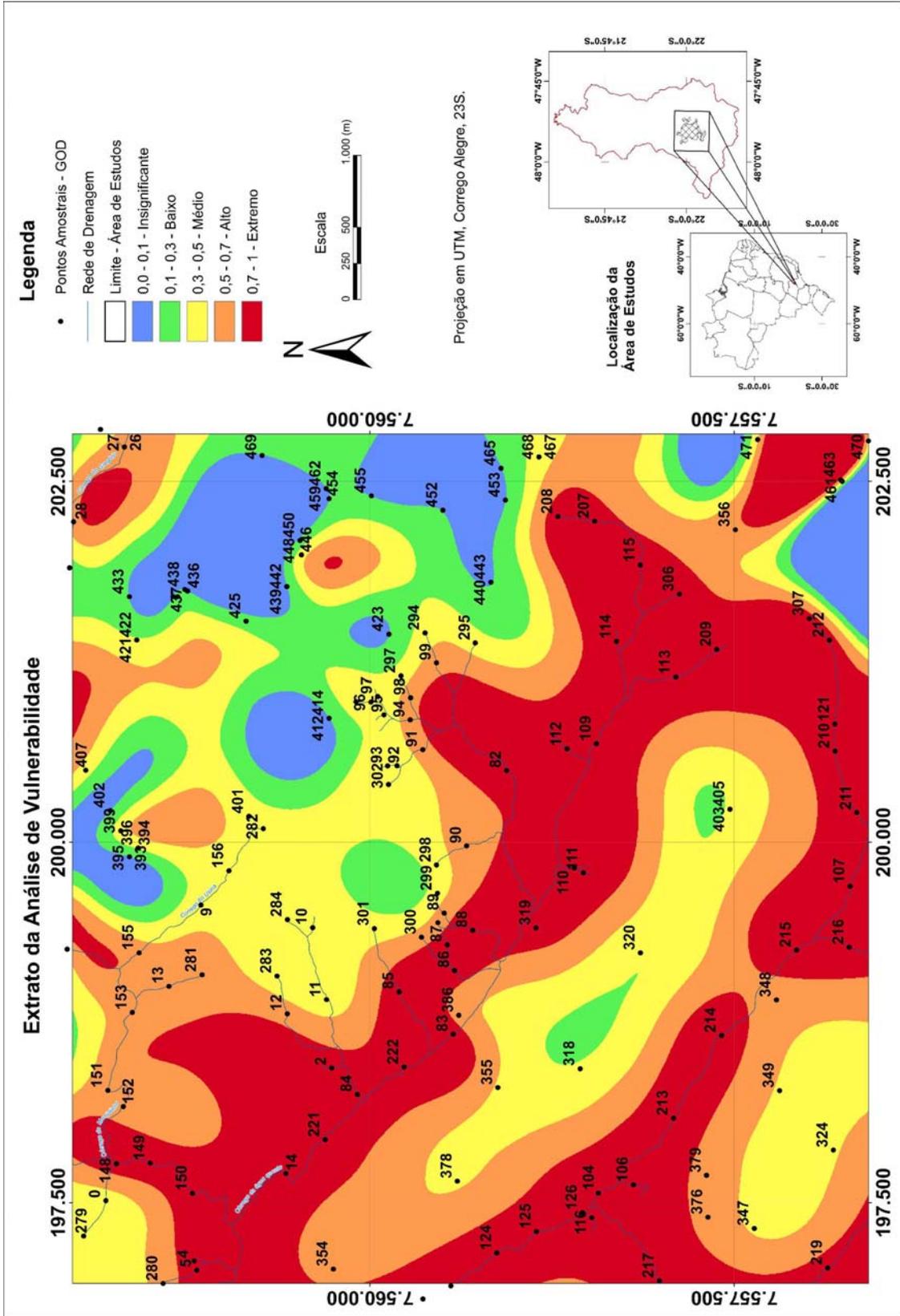


Figura 6.22. Extrato da Análise de Vulnerabilidade (áreas Alta e Extrema).

A maior quantidade definida como graus alto e extremo estão localizados em áreas de afloramento do Compartimento Botucatu, onde, litologicamente compreende um dos principais aquíferos do planeta (Aquífero Guardani). Possui textura arenosa, constituindo uma área de recarga do aquífero. Dessa forma, o grau de confinamento sempre será não confinado e o nível d'água tenderá a estar próximo da superfície na área, devido as rochas desse compartimento ocorrerem em cotas mais baixas, comparando com os afloramentos das rochas do entorno, que servem também como recarga para o aquífero Guarani (estratigraficamente a baixo destas rochas que ocorrem nos compartimentos Serra Geral e Itaqueri).

6.3 Análise Simplificada da Vulnerabilidade de Contaminação das Águas Superficiais

Como explicado anteriormente, esta análise procedeu de forma qualitativa. Considerando os postos de combustíveis já existentes e mapeados. Tomamos como exemplo de interpretação utilizada nesta análise, o conceito de distância do topo da superfície freática do terreno, considerada no método GOD, onde podemos supor que em zonas onde o topo freático está muito longe da superfície não possui uma vulnerabilidade alta. Devido à tendência de o contaminante ser bio-degradado, por meio de processos oxidativos na zona vadosa ou ser transformado por algum processo de sorção.

Desta forma observando os dados da tabela 6.19, temos uma ideia da vulnerabilidade de uma contaminação de recursos hídricos nas adjacências dos postos de combustíveis analisados. Como se trata de uma análise simplificada o valor da vulnerabilidade foi representado no ponto do posto analisado, pois parte dele o perigo da contaminação. Porém pode ser interpretado para as áreas cujos recursos hídricos superficiais estejam no entorno. Com a finalidade de auxiliar esta interpretação foi criado um mapa de contorno de distância das linhas de drenagem (apêndice 7), que foi combinado com o apêndice 6, os valores para análise foram extraídos destes 2 apêndices (como explicado no método).

Podemos observar na tabela 6.19 e na figura 6.23, que os postos de combustíveis mais próximos a cursos d'água são mais vulneráveis, devido também a maior proximidade do nível freático da superfície. Tanto nas classes insignificante quanto baixa, temos uma configuração

semelhante quanto a proximidade do posto de combustível do canal de drenagem e do nível freático, estando consideravelmente distantes.

Tabela 6.19. Tabela mostrando os postos de combustíveis e a análise de vulnerabilidade de cada um frente a uma possível contaminação dos recursos hídricos superficiais.

Ponto	Contaminação	Coordenadas		Distância da Drenagem	Profundidade água subterrânea	Vulnerabilidade	
		X	Y			Valor	Classe
C,H, 02	Não confirmado	202397,8	7560717	0,1	0,4	0,04	Insignificante
C,H, 03	Não confirmado	202413,6	7560775	0,1	0,4	0,04	Insignificante
C,H, 01	Confirmado	201811	7560791	0,1	0,6	0,06	Insignificante
C,H, 35	Não confirmado	201653,2	7561082	0,1	0,6	0,06	Insignificante
C,H, 36	Não confirmado	201655,5	7560982	0,1	0,6	0,06	Insignificante
C,H, 37	Confirmado	201657,7	7560892	0,1	0,6	0,06	Insignificante
C,H, 38	Confirmado	201612,4	7560838	0,1	0,6	0,06	Insignificante
C,H, 42	Não confirmado	202021,9	7564824	0,2	0,4	0,08	Insignificante
C,H, 43	Não confirmado	201949,5	7564904	0,2	0,4	0,08	Insignificante
C,H, 08	Confirmado	200796,1	7561177	0,2	0,6	0,12	Baixa
C,H, 24	Não confirmado	201210,7	7560839	0,2	0,6	0,12	Baixa
C,H, 30	Não confirmado	198562,5	7564141	0,3	0,4	0,12	Baixa
C,H, 34	Confirmado	201592,1	7563041	0,3	0,4	0,12	Baixa
C,H, 05	Não confirmado	202651,5	7564555	0,4	0,4	0,16	Baixa
C,H, 13	Confirmado	201655,5	7563100	0,4	0,4	0,16	Baixa
C,H, 32	Não confirmado	198672,4	7565146	0,4	0,4	0,16	Baixa
C,H, 39	Não confirmado	201686,1	7561513	0,4	0,4	0,16	Baixa
C,H, 14	Confirmado	201535,2	7563408	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 16	Confirmado	201629,3	7564916	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 17	Não confirmado	201571,8	7564937	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 18	Confirmado	201655,5	7565005	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 20	Não confirmado	202608	7564251	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 22	Não confirmado	201435,7	7560132	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 23	Não confirmado	201268,2	7560457	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 48	Não confirmado	202394,5	7561277	0,5	0,4	0,2	Baixa
C,H, 12	Não confirmado	199916,8	7564333	0,4	0,6	0,24	Baixa
C,H, 31	Não confirmado	199085,8	7564617	0,6	0,4	0,24	Baixa
C,H, 45	Não confirmado	200681,5	7563535	0,6	0,4	0,24	Baixa
C,H, 49	Não confirmado	198999,4	7563434	0,4	0,6	0,24	Baixa
C,H, 33	Não confirmado	201264,9	7562586	0,7	0,4	0,28	Baixa
C,H, 50	Não confirmado	200835,8	7560215	0,7	0,4	0,28	Baixa
C,H, 15	Não confirmado	201598	7564842	0,5	0,6	0,3	Média
C,H, 21	Não confirmado	202979,6	7562901	0,5	0,6	0,3	Média
C,H, 47	Não confirmado	201689	7564282	0,5	0,6	0,3	Média
C,H, 19	Não confirmado	201058,9	7565758	0,8	0,4	0,32	Média

Continuação - Tabela 6.19. Tabela mostrando os postos de combustíveis e a análise de vulnerabilidade de cada um frente a uma possível contaminação dos recursos hídricos superficiais.

Ponto	Contaminação	Coordenadas		Distância da Drenagem	Profundidade água subterrânea	Vulnerabilidade	
		X	Y			Valor	Classe
C,H, 06	Não confirmado	202588,1	7563767	0,9	0,4	0,36	Média
C,H, 10	Não confirmado	200030	7560446	0,6	0,6	0,36	Média
C,H, 25	Não confirmado	199562,1	7561765	0,6	0,6	0,36	Média
C,H, 46	Confirmado	202150,7	7562355	0,6	0,6	0,36	Média
C,H, 09	Não confirmado	200896,5	7561875	0,5	0,8	0,4	Média
C,H, 51	Não confirmado	202030,7	7561890	0,8	0,6	0,48	Média
C,H, 44	Confirmado	200294,7	7560979	0,7	0,8	0,56	Alta
C,H, 52	Não confirmado	200886	7565347	0,7	0,8	0,56	Alta
C,H, 27	Não confirmado	199818,5	7562267	1	0,6	0,6	Alta
C,H, 40	Confirmado	201764,7	7562083	1	0,6	0,6	Alta
C,H, 07	Confirmado	201573,2	7563994	0,8	0,8	0,64	Alta
C,H, 11	Não confirmado	200183,4	7563321	1	0,8	0,8	Extrema
C,H, 26	Não confirmado	199426	7562016	0,8	1	0,8	Extrema
C,H, 29	Não confirmado	200017,4	7563330	0,9	1	0,9	Extrema
C,H, 04	Não confirmado	202651,1	7561728	1	1	1	Extrema
C,H, 28	Não confirmado	200598,3	7562466	1	1	1	Extrema
C,H, 41	Confirmado	200559,6	7564344	1	1	1	Extrema

No nível médio, já temos em alguns casos como o do posto C,H, 06, uma proximidade elevada do posto à drenagem, porém um valor baixo da distância do nível freático neste caso levou a vulnerabilidade para um nível médio. A interação entre valores médios também está presente nesta classe, como é o caso do posto C,H, 46.

As classes alta e extrema, apresentam em ambos os casos situações consideradas críticas, temos como destaque o posto C,H, 04, onde ambas as situações são extremas (profundidade da água subterrânea e distância da drenagem mais próxima). São postos de combustíveis muito próximos a cursos d'água, geralmente instalados em solos residuais maduros, nos postos C,H, 26, C,H, 29, C,H, 04, C,H, 28, C,H, 41, em que a distância do topo freático é menor que 5 metros, a situação no caso de um vazamento se torna bem crítica, pois atingiria o nível saturado rapidamente e a tendência é que o contaminante siga as linhas de fluxo, desaguando no curso d'água.

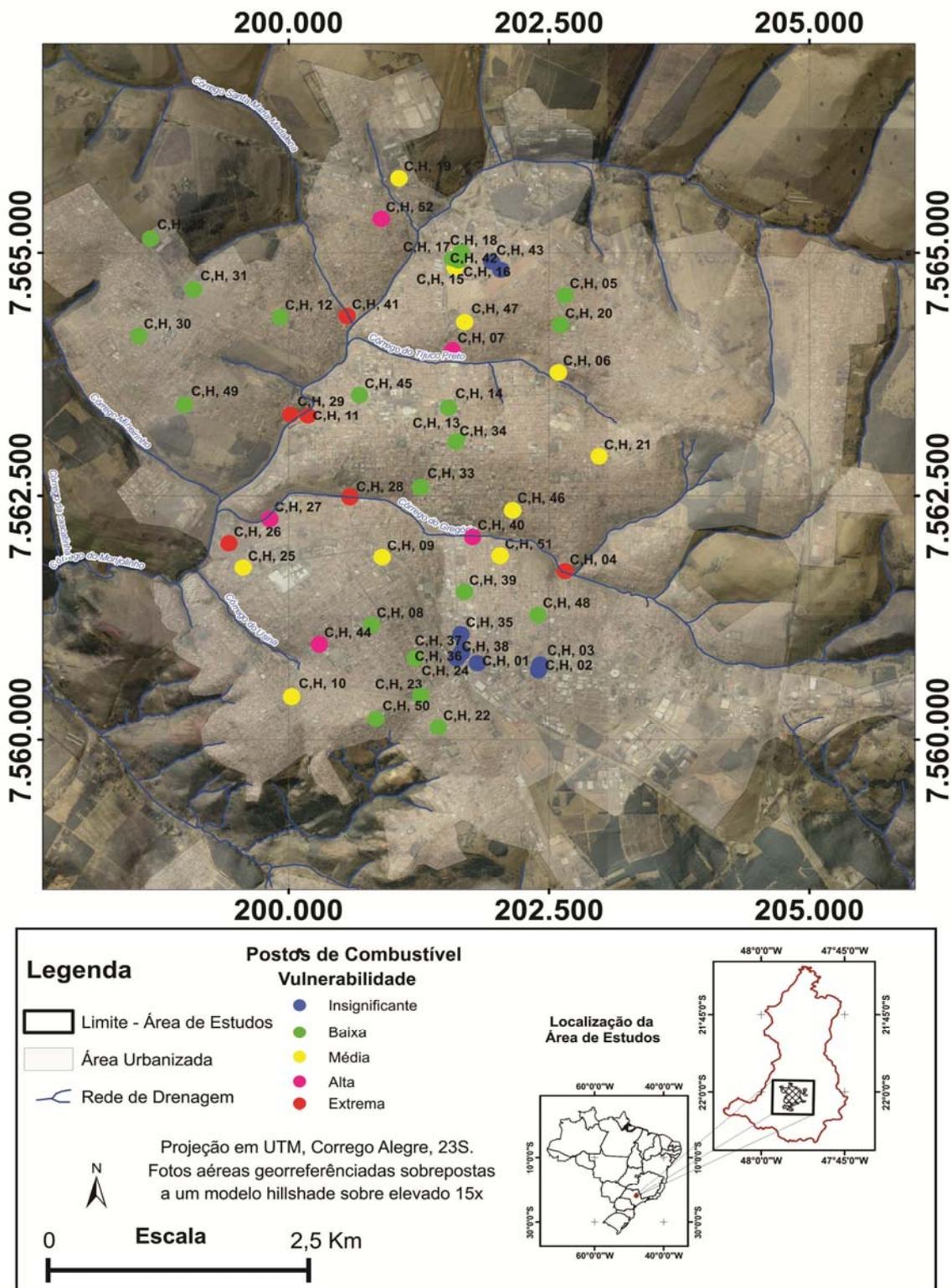


Figura 6.23. Fotos aéreas da área de estudos e postos de combustíveis classificados de acordo com sua vulnerabilidade frente a contaminação de recursos hídricos superficiais.

6.3.1 Análise dos Possíveis Condicionantes Geotécnicos à Deflagração da Contaminação em Postos de Combustíveis na Área de Estudos

No tópico 3, foram discutidos alguns fatores que podem condicionar a ruptura de sistemas de armazenamento de combustíveis. Entre eles podemos citar a declividade, erodibilidade, movimentos de massa, colapsividade e corrosividade.

A declividade pode condicionar a erodibilidade, se analisada juntamente com a caracterização textural do material, sendo que, quanto maior o teor de argila menor a propensão do solo apresentar feições erosivas. A declividade também pode condicionar movimentos de massa lentos, sendo que quanto maior for o gradiente, maior a tendência da encosta em apresentar movimentos de massa lento.

A colapsividade foi avaliada com um foco na tendência ao aparecimento deste fenômeno. Isto se deu com base no que foi apresentado no item 3.3.5, para tanto foi feito o uso dos dados que temos a disposição como porosidade, grau de saturação e granulometria, atentando para a ausência ou presença da fração silte na amostra analisada. Sendo que com a ausência desta fração o solo apresenta forte tendência a apresentar colapsividade.

A corrosão da estrutura subterrânea, em instalações mais antigas, sem a adequada proteção pode ser condicionada pelo meio em que está alocada. No tópico 3.4.6 foram discutidos os fatores que podem influenciar processos corrosivos no material (pH e Eh).

Não podemos esquecer que os tanques de armazenamento possuem uma vida útil, de acordo com seu material constituinte e método de instalação. Como não tivemos acesso aos projetos de instalação e as especificações dos tanques, o fator idade e tempo de validade do sistema de armazenamento de combustíveis não entrou nesta análise.

Podemos observar nas tabelas 6.20 e 6.21 uma síntese de informações relevantes para esta análise que foi realizada em pontos onde estavam localizados os postos de combustíveis que foram determinados pela CETESB como contaminados. Então procurou-se de forma qualitativa proceder com uma avaliação dos fatores que podem ou não condicionar rupturas em tanques de armazenamento de combustíveis.

Tabela 6.20. Informações básicas sobre os postos de combustíveis para avaliação das tendências que podem condicionar a deflagração da contaminação em postos de combustíveis.

Ponto	Coordenadas		Cota do Terreno	Cota do NA	Vulnerabilidade	Textura do Material	Litologia	Geomorfologia
	X	Y						
C,H, 01	201811	7560790	835	789	Insignificante	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Vertente
C,H, 07	201573	7563994	828	816	Alta	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Vertente
C,H, 08	200796	7561176	851	815	Média	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Topo
C,H, 13	201655	7563099	860	747	Insignificante	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Topo
C,H, 14	201535	7563408	851	768	Alta	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Topo
C,H, 16	201629	7564915	839	736	Baixa	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Vertente Suave
C,H, 18	201655	7565004	838	715	Insignificante	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Vertente Suave
C,H, 34	201592	7563040	858	740	Insignificante	Areia argilosa	Fm. Itaqueri	Topo
C,H, 37	201657	7560891	829	803	Insignificante	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Vertente
C,H, 38	201612	7560837	830	809	Insignificante	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Terraço Fluvial
C,H, 40	201764	7562082	804	758	Baixa	Argila siltosa	Fm. Serra	Vertente
C,H, 41	200559	7564343	800	799	Alta	Argila arenosa	Fm. Serra	Vertente
C,H, 44	200294	7560978	832	818	Média	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Vertente
C,H, 46	202150	7562354	834	785	Insignificante	Areia siltosa	Fm. Itaqueri	Vertente

Tabela 6.21. Quadro geral para avaliação das tendências que podem condicionar a deflagração da contaminação em postos de combustíveis.

Ponto	Declividade (%)	Propensão a Erosão	Propensão a Movimento de Massa	Avaliação da Colapsividade			Tendência a Colapsividade	pH	Eh (mV)	Tendência a Corrosão
				n (%)	Sr (%)	Granulometria				
C,H, 01	5,4	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 07	11,1	Média	Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 08	0,5	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 13	1,2	Baixa	Muito Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 14	2,75	Baixa	Muito Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 16	4,65	Baixa	Muito Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 18	4,35	Baixa	Muito Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 34	4,3	Baixa	Muito Baixa	46	42	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 37	6	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 38	3,4	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 40	7	Baixa	Muito Baixa	53	63	Presença de silte	Não	6,38	347	Não
C,H, 41	4,85	Baixa	Muito Baixa	57	48	Presença de silte	Sim	6,38	359	Não
C,H, 44	7	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não
C,H, 46	6	Baixa	Muito Baixa	47	59	Presença de silte	Sim	6,01	356	Não

Com base nas análises apresentadas na tabela 6.21, é possível afirmar que nenhum tanque de armazenamento rompido teve influência do pH e do Eh natural, ou seja, inerente a um perfil de solo da mesma unidade que está livre de contaminação. Nem o pH e nem o Eh indicam tendência da unidade a apresentar um comportamento agressivo no que diz respeito a corrosividade de estruturas metálicas.

Porém, devemos observar que o pH determinado para a unidade Itaqueri, foi de 6,01 e Alonso e Pannoni (2006), afirmam que em pH acima de 6 o solo não apresenta tendência a ter um comportamento corrosivo nos tanques de armazenamento. O valor determinado então é praticamente o limite que os autores citados colocam para que o pH não apresente tendência a corrosão.

Neste trabalho procurou-se dar uma abordagem geral a formação geológica, dessa forma não foram realizadas muitas análises de pH e Eh. Como o valor obtido foi muito próximo do limite. Em trabalhos futuros sobre o tema na mesma área é indicado que o pesquisador realize mais análises, procurando também realizar análises próximas ao foco de contaminação. Devido a heterogeneidade dos perfis intempéricos, podemos encontrar valores diferentes um dos outros no mesmo horizonte do solo, principalmente quando se trata de análises instrumentais.

A análise do comportamento colapsível, segundo aos fatores apresentados por Ferreira et. al (1989) e Cintra (1998), mostraram uma situação diferente. Foram utilizados como fatores de análise a textura, focando na ocorrência de granulometria aberta (fração silte), baixo grau de saturação ($S_r \leq 60\%$) e grande porosidade ($n \geq 40\%$).

Exceto a uma amostra analisada na Fm. Serra Geral todas as outras apresentam tendência a colapsividade, nesta amostra somente um fator daria tendência a Colapsividade (porosidade igual a 53). Nas outras amostras dois fatores são condicionantes a colapsividade (porosidade e grau de saturação). Todas as amostras possuem um certo teor de silte em sua fração granulométrica.

Quanto à tendência a apresentar erosão, a maioria das amostras escolhidas possuem uma tendência baixa, por estarem em unidades com uma quantidade considerável de argila. Também apresentam uma baixa declividade, exceto o posto de combustível C,H 07, que

possuí uma propensão média a apresentar erosão. O mesmo local possui uma baixa propensão a apresentar movimento de massa, enquanto nos outros locais a propensão é muito baixa.

A maioria dos postos de combustíveis estão inseridos em topos ou vertentes, exceto o posto C,H, 38, inserido em um terraço fluvial, neste local específico pode ocorrer uma flutuação do NA, causando danos a estrutura metálica e acelerando processos corrosivos.

6.4 Discussão: Vulnerabilidade Versus Condicionantes Geotécnicos nos Compartimentos

É interessante analisar a vulnerabilidade intrínseca (inerente ao meio físico em estudo) do compartimento geotécnico, frente aos condicionantes geotécnicos que cada compartimento possui, principalmente nos locais que apresentaram contaminação. Dessa forma, é possível fornecer subsídios geológicos e geotécnicos a uma possível intervenção ou planejamento na construção de novos locais para abastecimento.

6.5.1. Compartimento Botucatu

Como este compartimento consiste na zona de recarga do Aquífero Guarani, pode se deduzir que suas águas subterrâneas apresentam uma vulnerabilidade elevada, devido suas características de maior condutividade hidráulica, consistir em uma zona de recarga de aquífero e uma área de armazenamento natural de recursos hídricos.

O método GOD (Apêndice 3), também mostra isto, onde, o compartimento consiste na área onde temos a maior ocorrência de zonas com vulnerabilidade extrema. O compartimento é constituído por areias bem selecionadas, bimodais, conferindo uma condutividade hidráulica para o compartimento elevada.

Devido à alta vulnerabilidade e características geotécnicas desfavoráveis, não é indicado que sejam instaladas atividades potencialmente poluidoras no local.

O grau de saturação encontrado para este compartimento (27%), e a porosidade de 33%, são valores baixos que não conferem comportamento colapsível ao solo, porém a amostra analisada mostra que a fração silte está aberta, ou seja, a amostra possui um teor de silte insipiente. Por se tratar de um solo arenoso, podemos supor que quando o terreno for solicitado por uma carga, o solo sofrerá adensamento e se adequará a solicitação brevemente, sem causar danos a estrutura. Levando em conta que este comportamento seja previamente previsto pelo engenheiro responsável pela obra. Os valores de pH e Eh não indicam que o material geológico apresente tendências a acelerar processos corrosivos no material.

Dessa forma, o compartimento apresenta uma boa capacidade de suporte geotécnico, estando apto para receber o sistema de armazenamento de combustíveis, do ponto de vista da estabilidade geotécnica. Pelo lado ambiental, deve-se considerar a elevada vulnerabilidade que o compartimento apresenta e as características hidráulicas.

Caso forem instalados sistemas de armazenamento de combustíveis enterrados, deve-se atentar para o aspecto ambiental, visando à elaboração de sistemas de proteção do aquífero, seja pela utilização de tanques mais modernos e resistentes ou pela modificação do método construtivo.

Também seria interessante a construção de sistemas de monitoramento ambiental dos tanques, observando as características hidráulicas da formação geológica. Instalando os sistemas de monitoramento de acordo com as linhas de fluxo da água subterrânea.

6.5.2. Compartimento Serra Geral

O compartimento apresenta principalmente as classes de vulnerabilidades extrema e alta, ocorrendo também outras classes em menor área.

Como discutido anteriormente a rocha exhibe intenso padrão de faturamento (nos afloramentos de rocha observados no mapeamento), em disjunção colunar exibindo grande número de feições praticamente verticais, isto é crítico devido à condutividade hidráulica em fraturas abertas ser mais elevada (as fraturas observadas eram abertas). Com o contado do

contaminante nessas áreas, pode ocorrer a migração deste mais rapidamente até o aquífero Guarani, estratigraficamente abaixo desta unidade.

Do ponto de vista geotécnico, os solos que cobrem as rochas fraturadas são predominante argilosos, podendo ser classificados texturalmente como argilas arenosas, conferindo uma condutividade hidráulica baixa para o perfil intempérico. Perfazendo uma camada protetora para a zona fraturada.

Algumas amostras apresentam tendência a colapsividade, enquanto outras não apresentam, como a textura da amostra contempla a fração silte, e a porosidade é naturalmente elevada devido ao grande teor de finos, um fator que poderia condicionar a colapsividade é o grau de saturação, que pode variar. A porosidade também pode variar conforme a textura do solo, em horizonte diferentes.

Devido a alta vulnerabilidade que esta unidade possui, evidenciada pelo método GOD, não é interessante que ao construir novos sistemas de armazenamento de material potencialmente poluidor nessas áreas, sejam direcionadas como indicado no compartimento anterior. Atentando para o fato de que esta unidade compreende zonas próximas a leitos de drenagens e a cuesta basáltica. Locais poucos indicados para serem implantadas construções de qualquer tipo.

6.5.3. Compartimento Itaqueri

A vulnerabilidade neste compartimento é predominantemente média, aparecendo secundariamente às classes baixa e insignificante, aparecem alguns pontos isolados onde a vulnerabilidade foi interpolada como alta e extrema.

Do ponto de vista social, como já foi discutido anteriormente nesta região está a maior parte da área urbanizada do município. Existem vários postos de abastecimento localizados na superfície desta unidade. Pela profundidade dos postos provavelmente a maioria capta água do aquífero Guarani abaixo dos basaltos da Fm. Serra Geral. Tipicamente estes postos de abastecimento possuem uma proteção superficial, tendo seus filtros de captação localizados no aquífero mais profundo.

Dessa forma o contaminante que migra nas zonas mais superficiais, direcionado pelas linhas de fluxo subterrâneo não têm grande influência para contaminar os pontos de captação.

Do ponto de vista ambiental qualquer poluição é prejudicial para o ambiente, quanto a capacidade que a unidade possui em suportar uma estrutura enterrada. Relembramos que a unidade não mostrou tendência a condicionar processos corrosivos (bom base em correlações utilizando pH e Eh), com a ressalva de que os valores de pH determinados foram praticamente no limite entre a propensão da unidade apresentar ou não características corrosivas.

A unidade apresenta tendência ao processo de colapsividade nos solos, onde diversos tanques de armazenamento de combustíveis se encontram instalados. Podemos afirmar que há uma grande possibilidade de alguns dos vazamentos terem sido condicionados por processos colapsíveis nos solos da unidade. Levando em conta que as juntas das tubulações são geralmente estruturas frágeis. O dano na estrutura pode ter se dado em rupturas nas roscas de encaixe ou mangotes, propiciando o vazamento.

A unidade não apresenta tendência a processos erosivos ou movimentos de massa. Podem ocorrer processos erosivos em canais de drenagem, ou erosão laminar do solo. Ambos são processos naturais a qualquer ambiente geológico, sendo processos inerentes ao modelamento natural do relevo, com recuo das vertentes.

Dessa forma, devemos observar os métodos construtivos de sistemas de armazenamento de combustíveis, enterrados para que as características dos solos não causem dano a estrutura, conferindo uma maior estabilidade geotécnica a estrutura. Levando em consideração que o solo pode apresentar colapsividade. Também deve-se proceder com análises de pH e Eh, nos locais em volta do local que será construído, observando possíveis interferências de atividades no entorno que podem estar contaminando o sub solo, modificando as condições naturais.

6.5.4. Compartimento Aluvonar

A unidade apresenta índice de vazios alto, por consequência a porosidade também é alta e o material possui elevado grau de saturação. Isto se da devido ao nível de

inconsolidação do material elevado, decorrente da deposição recente as margens dos canais de drenagem. Certamente a estabilidade geotécnica desta unidade não é ideal para a instalação de tanques de combustíveis enterrados.

Na unidade encontramos matéria orgânica (PONS, 2006), diminuindo ainda mais a resistência dos solos. Os valores de pH indicam tendência à corrosividade, o elevado grau de saturação também contribuí para processos corrosivos em estruturas metálicas.

Esta área é considerada APP (Área de Preservação Permanente), onde é indicado permanecer com as configurações naturais intocadas.

6.5.5. Compartimento Coluvionar

Por se tratar de uma área de expansão urbana, necessita de estudos mais detalhados, focados somente nesta unidade. O presente trabalho por ter um foco mais geral, não priorizou tanto a unidade por se restrita a encostas e de curta faixa de ocorrência.

São depósitos relativamente jovens, imaturos e com mistura de materiais, formando pacotes de espessura variável até 20 metros como afirma Pons (2006). Por serem constituídos de materiais previamente alterados, são depósitos propensos a processos erosivos, tratando-se predominantemente de areias.

A curva granulométrica também mostra uma ausência na fração silte, podendo condicionar fenômenos ligados a colapsividade do solo.

Dessa forma a implantação de estruturas, principalmente enterradas nesta unidade demanda estudos locais e detalhados, orientando os melhores métodos construtivos, observado a capacidade de suporte que a unidade oferece para cada solicitação.

7. CONCLUSÕES

O mapeamento geológico-geotécnico permitiu, por meio da avaliação das unidades litológicas e de alteração intempérica proceder com a interpretação e análise do meio físico. Possibilitando o entendimento das diversas camadas que compõe este meio do ponto de vista geotécnico. Direcionando para avaliação da contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, que podem ser derivados de postos de combustíveis. Desta forma se mostrando um método eficiente para adquirir informações sobre o meio físico.

A caracterização do meio físico, durante o mapeamento e em laboratório, permitiu a obtenção de parâmetros, geotécnicos que possibilitaram realizar um julgamento qualitativo com base em tabelas de correlação sobre a potencialidade das diferentes unidades em condicionar uma ruptura em estruturas enterradas de armazenamento de combustível.

O método GOD, aplicado na avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos, se mostrou uma ótima ferramenta de análise. Os resultados foram coerentes com as áreas mapeadas, onde as áreas mais vulneráveis correspondem a zonas de recargas do aquífero Guaraní, ambiente geológico mais crítico do ponto de vista hidrogeológico/ambiental. Por outro lado áreas menos críticas geologicamente, mostraram vulnerabilidades mais baixas.

È possível afirmar que o método é eficiente e reflete as condições de vulnerabilidade geológica do ponto de vista hídrico e ambiental, que os recursos hídricos subterrâneos possuem frente a uma contaminação deflagrada na superfície ou próxima a superfície. Podendo ser utilizado de forma eficiente para avaliar áreas em escalas de mapeamento mais reduzidas, possibilitando correlações com o mapeamento geológico-geotécnico sob a ótica de análise da possível contaminação que pode ser causada por postos de combustíveis.

A avaliação da vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos superficiais modificando o método GOD e direcionada para a área de estudos, mostrou-se uma análise interessante, porém pontual, considerando um ponto específico para deflagração da contaminação (posto de combustível), indicando de forma qualitativa qual a vulnerabilidade dos recursos hídricos próximos a este ponto a deflagração de uma contaminação gerada no ponto analisado.

A análise utilizando o método GOD, para avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos integrada com o mapeamento geológico-geotécnico se mostrou uma ferramenta interessante, dando um maior suporte na interpretação dos dados gerados e no direcionamento destes para uma melhor tomada de decisões técnicas. Com base em dados mais concretos, direcionado a análise para a finalidade proposta. Se faz uma análise eficiente e dotada de respaldo técnico-científico, devido a quantidade de parâmetros utilizados, garantindo um produto de qualidade e um ótimo direcionamento para novas construções.

Com os resultados da análise também é possível orientar a construção de novos projetos, levando em conta as características de suporte geotécnico dos compartimentos definidos e qual a vulnerabilidade que cada compartimento possui.

De forma geral, é possível afirmar que o método proposto neste trabalho pode ser utilizado para avaliar outros tipos de contaminação. Como o método GOD e o mapeamento geológico-geotécnico independem do tipo de contaminante. Para isto é importante planejar e direcionar o mapeamento conforme os objetivos propostos, definindo quais atributos devem ser levantados e analisar quais geram influência na contaminação e as razões que levam a isto.

Os objetivos propostos no trabalho foram cumpridos com êxito, gerando produtos coerentes que possuem uma utilidade no planejamento ambiental de municípios, onde seria interessante que as autoridades publicas utilizassem o trabalho e/ou solicitassem trabalhos deste tipo para universidades ou empresas de consultoria da área.

7.1 Sugestões para Continuidade da Pesquisa

Devido à importância do tema na sociedade, é interessante dar continuidade a pesquisa, já que está foi realizada com uma abordagem geral sobre a área escolhida. Sabe-se que pela dinâmica urbana anualmente, vários postos de combustíveis são criados e outros desativados. Dessa forma como sugestões de continuidade do trabalho temos:

- ✓ Atualização do banco de dados e da situação dos postos de combustível e seu entorno ao longo do tempo posterior a presente pesquisa.

- ✓ Detalhamento do comportamento das plumas de contaminação nos diferentes compartimentos geológico-geotécnicos, com a utilização de métodos de investigação como geofísica e sondagens, procedidas por análises químicas dos teores de contaminantes.
- ✓ Realização de ensaios em laboratório com amostras indeformadas, avaliando a o comportamento dos contaminantes em cada compartimento geológico-geotécnico de forma controlada em laboratório e cruzamento dos resultados com os dados obtidos com análise das plumas de contaminação em campo.
- ✓ Aplicar outros métodos de análise de vulnerabilidade de contaminação dos recursos hídricos comparando os resultados com a presente pesquisa.
- ✓ Com base em caracterizações de campo das plumas de contaminação e parâmetros obtidos em laboratório, indicar melhores alternativas de prevenção/proteção dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais. Assim como melhores métodos para remediação caso a contaminação venha a ser identificada.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABREU, A. E. S. **Mapeamento geotécnico para Gestão Municipal - Abordagem combinando três métodos distintos e sua aplicação em Analândia (SP).** (Dissertação - Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, (2007).

ALMEIDA, F. F. M.; BARBOSA, O. **Carta geológica do Brasil - Quadricula nº2731 (Rio Claro).** Escala 1:100.000. 1953.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES,B.B.; FUCK, R.A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, n.8, 1977, Campina Grande. **Atas...** São Paulo: SBG, 1977.

ANP – Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2009. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro : ANP, 2009. 225p.

ANDRADE, M. M.; RALISCH, R.; MAURO, E. D.; GUEDES, C. L. B. Parâmetros Físico-Químicos e Espectroscópicos de Solo Contaminado por Petróleo: Aplicação de Turfa como Agente de Remediação. **4º PDPETRO**, Campinas, SP. 2007. p. 21-24.

AGUIAR, R. L. **Mapeamento geotecnico da area de expansao urbana de sao carlos-sp : contribuicao ao planejamento.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

AUGUSTO FILHO, O. **Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: um Ensaio em Caraguatatuba (SP).** 196f. Tese (Doutorado – Geociências e Meio Ambiente) Universidade Estadual Paulista. Rio Claro (SP), 2001.

BARTOLOMEU, D; AUGUSTO FILHO, O. Cartografia Geotécnica como Subsídio para Análise de Risco em Recursos Hídricos Aplicado a Vazamentos em Postos de Combustíveis. **Resumo Expandido Submetido e Aceito no 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia.** ABGE, São Paulo. 2011.

BELL, F. G. **Engineering Geology.** 2ªed. Elsevier Ltd. Jordan Hill, Oxford (EUA), 2007. 590p.

BORRERO, F.; HESS, F. S.; HSU, J.; KUNZE, G.; LESLIE, S.; LETRO, S.; MANGA, M.; SHARP, L.; SNOW, T.; ZIKE, D.; **Earth Science.** The McGraw-Hill Companies, EUA, 2008. 1000p.

BORTOLUCCI, A. A. **Caracterização geológico-geotécnica da região urbana de São Carlos-SP, a partir de sondagens de simples reconhecimento.** 1983. 67f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1983.

ROLIM, G. S.; CAMARGO, M. B. P.; LANIA, D. G.; MORAES, J. L. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas Agroclimáticas para o estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, 2007. p.711-720.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. (2005). Mecanismos de instabilização de taludes de erosões. **IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas**, Salvador. vol. I, p. 361 – 372.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. **Processos Erosivos in: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Editora FINATEC. Brasília - 2006. p. 39-88.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relação de áreas contaminadas – Novembro de 2009. 2010a. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/texto_areas_cont_nov_09_.pdf>. Acesso em: 07 de Agosto de 2010.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relação de áreas contaminadas – Novembro de 2009. 2010b. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/areas_cont_munic_nov_09.zip>. Acesso em: 07 de Agosto de 2010.

CETEM - Centro de tecnologia Mineral. **Série Tecnologia Ambiental: Implantação de Tecnologias de Remediação de Água Subterrânea Contaminada por Gasolina em Postos de Abastecimento: Estudo em Campo e em Microcosmos**. 2008. 67p.

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. **Série Tecnologia Ambiental – 50: Biorremediação de solo impactado com óleo cru: avaliação da potencialidade da utilização de surfatantes.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 92p.

CINTRA, J. C. A. **Fundações em solos colapsíveis.** Serviço Gráfico da EESC / USP, 1. ed. São Carlos (SP), 1998. 116p.

CHANG, M. R. C. **A formação pirambóia no centro-oeste do estado de São Paulo.** 1997. 196 f. (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP).

COULON, F. K. A Geologia e o Planejamento Urbano. *Anais...* 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia – v. 3. p. 370-373.

CERRI, L.E.S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O. & ZAINÉ, J.E. - 1996. Cartas e mapas geotécnicos de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método de detalhamento progressivo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 8., Rio de Janeiro, 1996. Anais... Rio de Janeiro, ABGE, v.2, p. 537-548.

CERRI, J. C. P. Mapeamento geológico-geotécnico da cidade de São Carlos. São Carlos **CETEPE/EESC-USP.** 1984. p. 157.

CRAIG, R. F. **Cragig Mecânica dos Solos.** 7ª ed. (Tradução) Editora LTC, Rio de Janeiro (RJ), 2007. 365p.

DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Revista Geomorfologia**. São Paulo. n. 10, 1970. p. 8-13.

DIAS, K. D. N.; SCHERER, C. M. S. Cross-bedding set thickness and stratigraphic architecture of aeolian systems: An example from the Upper Permian Pirambo'ia Formation (Parana' Basin), southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. n. 25, p. 405–415, 2007.

CEPAL. Informe de la reunión de consulta sobre Indicadores de Desarrollo Sostenible, CEPAL, Santiago, Chile, 7-9 de Octubre de 2003, p. 8.

CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. D. M. Efeitos causados pela mistura de gasolina e álcool em contaminações de águas subterrâneas. **Bol. téc. PETROBRAS**, Rio de Janeiro, 41 (3/4), 1998. p. 133-138.

COSTA, A. F. U.; AZAMBUJA, E.; NANNI, A. S. Métodos Elétricos Aplicados à Detecção de Contaminação do Subsolo Provocada por Combustíveis: Sete Casos Estudados no Rio Grande do Sul, Brasil. In: **Internationa Conference on Geofisics**. Rio de Janeiro, 1999.

ESCADA, D. C. S. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Cajamar – SP**. 116f. (Dissertação - Mestrado) - Instituto de geociências, Unicam. Campinas (SP). 2009.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N.L.; AISSE, M.M. & GARCIAS, C.M. (1997). **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4. ed. Editora: Universitária Champagnat, Curitiba (PR). 486 p.

FERREIRA, J.; ZUQUETTE, L. V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**, São Paulo (SP), v. 17, n.2, 1998. p. 527-557.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 2nd. New York: Macmillan Publishing Company. 1998.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: Pan American center for sanitary engineering and environmental sciences (CEPIS), 1988. 88p.

FREITAS, D. M.; TAGLIANI, P. R. The use of GIS for the integration of traditional and scientific knowledge in supporting artisanal fisheries management in southern Brazil. **Journal of Environmental Management**. n. 90, 2009. p. 2071–2080.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5a Ed. Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A. Editora. Rio de Janeiro. 2007.

GOLDSCHIEDER, N. et al. The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. **Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik Und Mechanik**. v. 463, 2000. p. 157-166.

GUERRA, A.J.T. **Processos Erosivos nas Encostas**. in GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2ª ed. Editora Betrand Brasil, Rio de Janeiro (RJ), 1995. 472 p.

GUIGUER, N. **Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento.** Ontário: Waterloo Hydrogeologic, 1996.

HAMAMOTO, M. Y. **Mapeamento das áreas de perigo de contaminação dos recursos hídricos por vazamento em postos de combustível na área urbana de São Carlos – SP.** Relatório - Projeto de Iniciação Científica, Programa PIBIC/CNPq. 2010a.

HAMAMOTO, M. Y. **Mapeamento das áreas de perigo de contaminação dos recursos hídricos por vazamento em postos de combustível na área urbana de São Carlos – SP.** 2010. 145p. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010b.

HARGERTY, D.J. (1991a). Piping/sapping erosion. I: basic considerations. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 8. p. 991-1008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2004. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. 393 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Síntese das informações. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/csv.php?tabela=frota&codmun=354890&nomemun=S%E3o%20Carlos>>. Acesso em: 08 de Agosto de 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Síntese das informações. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=354890>>. Acesso em: Out de 2011.

INFANTI Jr, N e FORNASARI FILHO, N. **Processos de Dinâmica Superficial in Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 131 - 152.

INECE. Glossário do foro de indicadores da INECE, disponível em: <http://www.inece.org> - Visita realizada em março de 2011 - Indicator definition by United Nations Population Fund and EEA glossary.

(IPT) – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500 000. Vol I. 1981a.

(IPT) – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500 000. Vol II. 1981b.

(IPT) – Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500 000. Vol I. 1981c.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Atualização do relatório de situação dos recursos hídricos da bacia do Sorocaba e Médio Tietê (Relatório Zero) como subsídio à elaboração do Plano de Bacia**. São Paulo: IPT, 2005. Relatório Técnico N° 80.401–205.

JANONI, C. R. **Compartimentação morfotectônica da Alta Mogiana Paulista (Nordeste do Estado de São Paulo)**. 2007. 120 f. (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP).

JESUS, S. C. **Difusão de zinco em camada compactada de solo residual de gnaissse.** 90f. Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Viçosa (MG), 2004.

LANDIM, P. M. B. UNESP - **Universidade Estadual Paulista - Mapa Geológico do Estado de São Paulo - Quadricula Campinas - Folha SF-23-Y-A.** Escala 1:250.000. 1982.

LAL, R. & ELLIOT, W. (1994). **Erodibility and erosivity soil erosion research methods.** 2 ed. Ed. R. Lal. Flórida: St. Lucie Press, USA, p. 181-208.

LIMA, M.C. **Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas.** 336f. Tese (Doutorado), Publicação G. TD-17^a/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília: UnB, 2003. 336p.

LOURENÇO, E. S. O. **Avaliação físico-química da remediação de solos contaminados por BTEX.** 118f. Dissertação (Mestrado), programa de pós graduação em Engenharia Agrícola UNIOESTE. Cascavel (PR). 2006.

MARCUS, P. **Corrosion mechanisms in theory and practice.** CRC Press, Marcel Dekker Inc.; New York, USA, 2002. 768p.

MEZZALIRA, S. **Instituto geográfico e geológico do estado de São Paulo - Folha Geológica de São Carlos.** Escala 1:100.000. 1959.

MICHALAK, W. Z. GIS in land use change analysis: integration of remotely sensed data into GIS. **Applied Geography.** v. 13, 1993 p. 28-44.

MILANI, E.J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do gondwana sul-ocidental.** 1997. 255 f. Tese (Doutorado). Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS).

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências.** São Paulo, v. 28, n. 4, p. 527-544. 1998.

MILANI, E. J. Comentários Sobre a Origem e a Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). **Geologia do Continente Sul Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.** São Paulo: Beca, 2004. p. 265-291.

MIMI, Z. A.; ASSI, A. Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study. **Journal of Hydrology.** n. 364, 2009. p. 298–310.

MOCCELLIN, J. **Estudo da dinâmica fluvial em duas sub-bacias e proposição de cenários para a sustentabilidade dos recursos hídricos no Baixo Ribeira De Iguape – SP.** 200f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento. São Carlos (SP), 2010.

MORRISON, R. D. Critical Review of Environmental Forensic Techniques: Part I. **Environmental Forensics.** n1, 2000. p. 157-173.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Sindicato Nacional dos Editores de Livros – RJ, 292p. 1997.

MURO, M. D. **Carta de zoneamento para seleção de áreas frente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos - SP - escala 1:50.000**. 2000. 201f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. G. L.; DINIZ, N. C. Carta geotécnica do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1994. **Publicação IPT 2089**.

NAKAZAWA, V. A.; PRANDINI, F. L.; SANTOS, A. R.; FREITAS, C. G. L. Cartografia geotécnica: a aplicação como pressuposto. In: Simpósio de geologia do sudeste, 2, 1991, São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBG, 1991. p. 329-336.

NAVARRO, M. M.; WOHL, E. E.; OAKS, S. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. **Geomorphology**, n. 10, 1994. p. 331-354.

NBR-7181/ABNT – Análise Granulométrica de Solos. 1984.

NBR-6459/ABNT – Determinação do Limite de Liquidez de Solos. 1984.

NBR-7180/ABNT – Determinação do Limite de Plasticidade de Solos. 1984.

NISHIYAMA, L. **Mapeamento geotecnico preliminar da quadricula de sao carlos - sp.** Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos – Ensaio de Laboratório.** São Carlos, EESC-USP, Reimpressão, 2005, 248p.

OLIVEIRA, J. & PRADO, H. Levantamento pedológico semi-detalhado do estado de São Paulo: Quadrícula de São Carlos. Memorial Descritivo. Instituto Agrônomo de Campinas, SP, **Boletim Técnico 98**, 1984. 188p.

OLIVEIRA, A. M. S. **Assoreamento em Cursos e Corpos d'água.** in: BITAR, O. Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente. ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), 1995. 247p.

OLIVEIRA, A.M.S. **Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios. Exemplo do reservatório de Capivara, Rio Paranapanema, SP/PR.** Tese (Doutorado em Geografia) - FFLCH - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

OLIVEIRA, F. A.; MELLO, E. L.; PAIVA, E. C. R.; CALIJURI, M. L.; GUIMARÃES, A. O. Identificação e discriminação de áreas de risco no entorno urbano de Ipatinga, Brasil. **Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.** Vol. 7, n 1, 2006. p. 1-12.

PANONI, D. Coletânea de uso dos aços 2 - Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 2a. Ed. **Manuais Técnicos Perfis Geradal.** 2004.

PEJON, O. J. **Mapeamento geológico-geotécnico da folha de Piracicaba/SP. Estudos de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos.** 1992. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

PEJON, O.; ZUQUETTE, L. V. Mapeamento Geotécnico Regional na Escala 1:100.000 - Considerações Metodológicas. **Revista Instituto Geológico.** v. especial, São Paulo. 1995. p. 23-29.

PETRY, K. JERRAM, D. A.; ALMEIDA, D. P. M.; ZERFASS, H. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. **Journal of Volcanology and Geothermal Research.** n. 159, p. 313–325, 2007.

PRANDINI, L. F.; NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. G. L.; DINIZ, N. C. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. *In:* Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente. São Paulo: **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: IPT.** 1995. p. 187 – 215.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para Entender a Terra.** (Tradução) Impresso pela Editora Artmed 4ª ed., 2006.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento Superficial.** 2ªed. Editora UFV, Viçosa (MG), 2008. 87p.

KAIPPER, B. I. A. **Influência do Etanol na Solubilidade de Hidrocarbonetos Aromáticos em Aquíferos Contaminados por Óleo Diesel**. Santa Catarina. 2003. Tese (Doutorado), Centro de Ciências Físicas e Matemática – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2003.

KITCHENHAM, B. A. Guidelines for performing systematic literature reviews. *Software Engineering - Evidence-based Software Engineering*. **Tech. Rep.** 2007.

RICCOMINI, C.; GIANNINI, P. C. F.; MANCINI, F. **Rios e Processos Aluviais**. *in*: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T.; TAOIOLI, F. *Decifrando a Terra*. Editora Oficina de Textos, São Paulo (SP). 2000. 568p.

RODRIGUES, J. E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados: boçorocas**. 162f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

SANEJOAND, R. **La cartographie geotechnique em France**. Paris: Ministère de l'Équipement et du Logement. 1972.

São Carlos em Rede. Disponível em: <<http://www.saocarlosemrede.com.br/portal/noticias/item/14206-mais-fotos-da-enchente-no-centro-e-na-rotat%C3%B3ria-do-cristo-em-s%C3%A3o-carlos>>. Acesso em: 12 de Agosto de 2011.

SANTOS, L. J. C.; Oka-Fiori, C.; CANALLI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F. Mapeamento da vulnerabilidade geoambiental do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 37, n.4, 2007. p.812-820.

SCHENATO, F.; FORMOSO, M. L. L.; DUDOIGNON, P.; MEUNIER, A.; PROUST, D.; MAS, A. Alteration processes of a thick basaltic lava flow of the Paraná Basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies. **Journal of South American Earth Sciences**. n. 16, p. 423–444, 20003.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A., 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974, v.1, p.41-65.

SCHERER, C. M. S. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. **Sedimentary Geology**. n.137, p. 63-84, 2000.

SCHERER, C. M. S.; LAVINA, E. L. C. Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: The example of the Upper Jurassic—Lower Cretaceous Guará and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. **Gondwana Research**. n. 9, p. 475–484, 2006.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO – SIGRH. Banco de dados pluviométricos do estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhtm.exe/plu?qwe=qwe>>. Acesso em: Out. 2011.

SHU, Y. Y.; LAI, T. L.; LIN, H. S; YANG, T. C.; CHANG, C. P. Study of factors affecting the extraction efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons from soils using open-vessel focused microwave-assisted extraction. **Chemosphere Oxford**. v. 52, 2003. p.1667-1676.

SCHULZ, H. E. **O Essencial em Fenômenos de Transporte**. EESC/USP, 2003. 398p.

SILVA, J. A. F. 138f. **Sistematização e avaliação de técnicas aplicadas à caracterização e diagnóstico de áreas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo**. Dissertação (Mestrado) apresentada à Universidade Estadual Paulista Júlio de mesquita Filho, como requisito para obtenção do título de mestre em Geociências e Meio Ambiente, Rio Claro (SP) 2002.

SILVA, M. A. B. **Sistema de classificação fuzzy para áreas contaminadas**. 221f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (RJ). 2005.

SISNNO, C. L. S.; NETTO, A. D. P.; REGO, E. C. P.; LIMA, G. S. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em resíduos sólidos industriais: uma avaliação preliminar do risco potencial de contaminação ambiental e humana em áreas de disposição de resíduos. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 19 (2), 2003. p. 671 - 676.

SISSOM, L. E.; PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte**. Mc Graw-Hill. Tradução pela Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro (RJ), 1979. 765p.

SOARES, P. C.; SINELLI, O.; PENALVA, F.; WERNICK, E.; SOUZA, A.; CASTRO, P. R. M. Geologia do Nordeste do Estado de São Paulo in: Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais...** Aracajú, 1973, vol.4, p. 209-288.

SOARES, P.C. **O Mesozóico Gondwânico no estado de São Paulo**. 1973. 52 f. Tese (Livre-Docência), IG/USP, São Paulo (SP).

SOUZA, C. R. G. Risco a inundações, enchentes e alagamentos em regiões costeiras. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS*, 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 231-247. (CD-ROM)

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. **Métodos de Investigação**. *In: Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1998. p. 163 – 196.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares**. Edgard Blucher. São Paulo (SP), 1980, p. 500.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. Edgard Blucher. São Paulo (SP), 2003, p. 400.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P.; EMMEL, A.; LEAL, E. S. Degradação de BTXs via processos oxidativos avançados. **Química Nova**. vol.28 no.1, 2005. p. 61-64.

TAROZO, R. **Processo fotoquímico na degradação de combustível fóssil e biodiesel**. 66f. Dissertação (Mestrado em Química dos Recursos Naturais) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina (PR). 2005.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JUNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**. v. 62, n2, 2009. p.227-236.

TUCKER, M. **Sedimentary Rocks in The Field**. Second Edition. Ed. John Wiley & Sons. New York (USA), 1982, p. 153.

VAZ, L. F. Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. **Solos e Rochas**, n. 19 v. 2. São Paulo. 1996. p. 117-136.

VENEZIANI, P.; SANTOS, A. R.; CREPANI, E.; ANJOS, C. E.; OKIDA, R. Mapa de classes de erodibilidade de parte da região do rio Taquari baseado em imagens TM-Landsat. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.33, Número Especial, 1998. p.1747-1754.

VIDELA, H. A. Electrochemical interpretation of the role of microorganisms in corrosion. *In: Houghton DR, Smith RN, Eggins HOW (Eds) Biodeterioration and Biodegradation 7*. Elsevier Applied Science, London, 1988.

VILAR, O. M. & PRANDI, E.C. **Erosão dos solos**. *in* Solos do interior de São Paulo. ABMS, Departamento de Geotecnia, EESC, USP, 1993. p. 177-206.

Vilar, O.M., Rodrigues, J.E. & Nogueira, J.B. (1981). Solos Colapsíveis: um problema para a engenharia de solos tropicais. *In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia*, 1, Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 209-224.

WAINER, J. Métodos de pesquisa quantitativa e qualitativa para ciência da computação. **Atualizações em Informática**. Sociedade Brasileira de Computação - PUC-RIO, 2007. p. 221-262.

WERNICK, E. **Rochas Magmáticas: Conceitos Fundamentais e Classificação Modal, Química, Termodinâmica e Tectônica**. Editora UNESP. São Paulo (SP), 2004, p. 655.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica**. 2006. 177f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Paulo, 2006.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro (SP)**. 149f. (Tese Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro (SP). 2000.

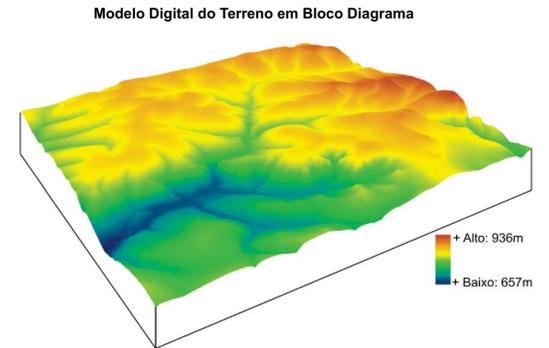
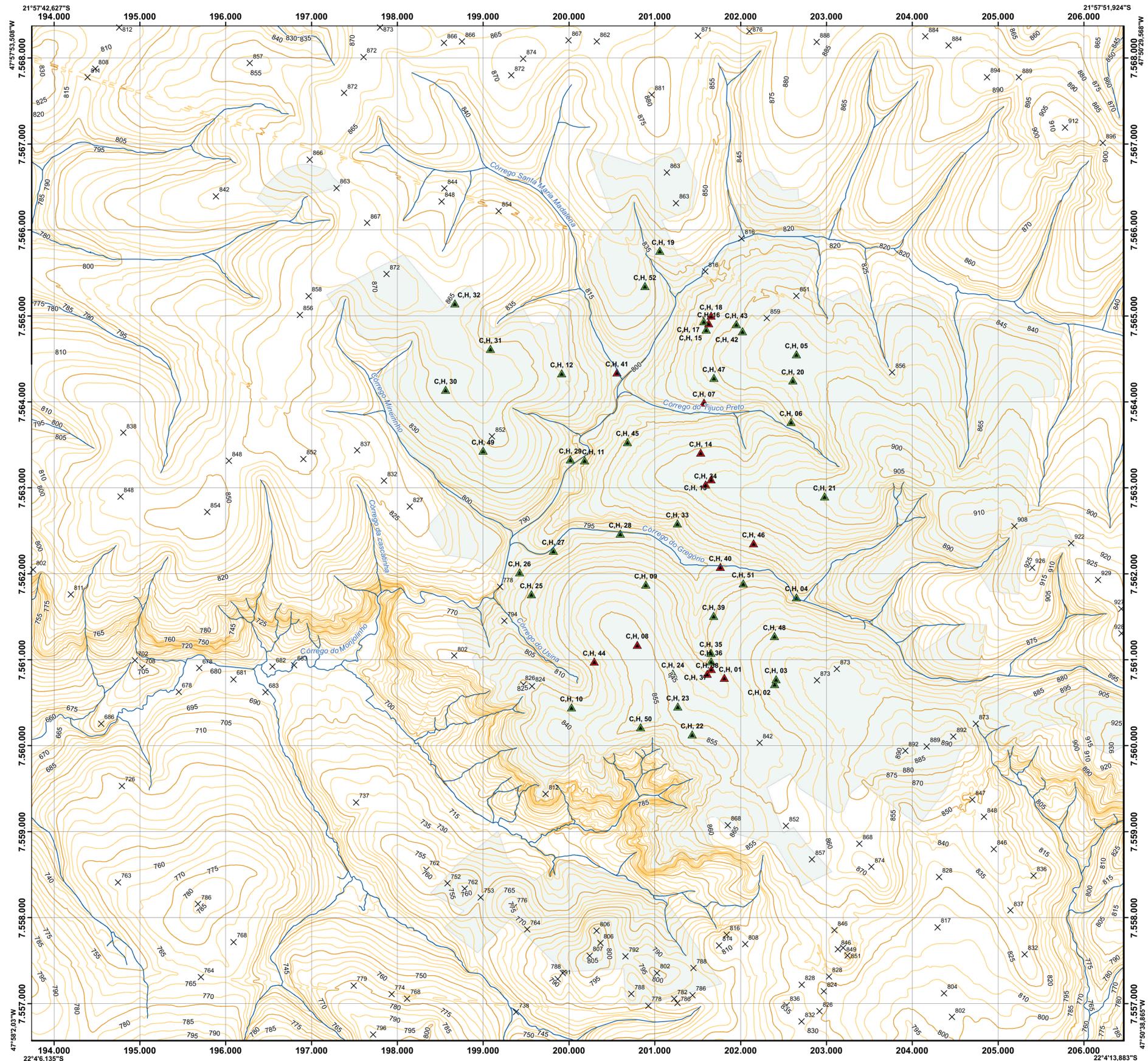
ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. Oficina de Textos. São Paulo (SP). 2004. 190p.

ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. (Tese - Livre Docência) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1993.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. (Tese - Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 1987.

ZUQUETE, L. V. **Mapeamento geotecnico preliminar na regio de sao carlos**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

Anexo 1 - Base Cartográfica



Convenções Cartográficas

- Área de Estudos
- ~ Rede de Drenagem
- ~ Curvas de Nível
- ~ Principal
- ~ Secundária
- Área Urbanizada
- ▲ Postos de Combustível (CETESB, 2010)
- ▲ Contaminado
- ▲ Não Contaminado
- × Pontos Cotados

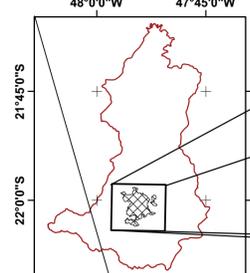
NM NG
 20° 48'
 Declinação Magnética 2011
 Do Centro da Folha
 Fuso 23
 A Declinação Magnética
 Varia Anualmente 9' Oeste
 Escala de Mapeamento
 1:10.000

Escala de Impressão
 1:25.000

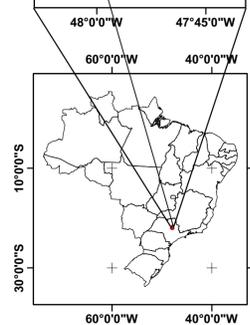
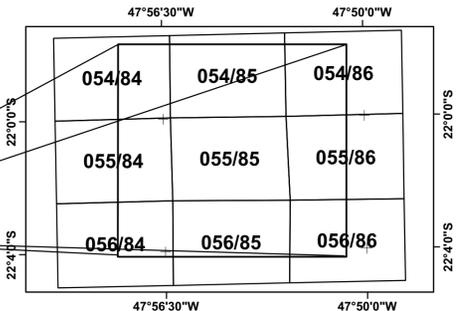
Escala Gráfica
 0 0,25 0,5 1 Km

Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
 Referência Vertical: Maregrafo de Imbituba, SC
 Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
 Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no
 Município de São Carlos (SP)



Localização da Área de Estudos na
 Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000

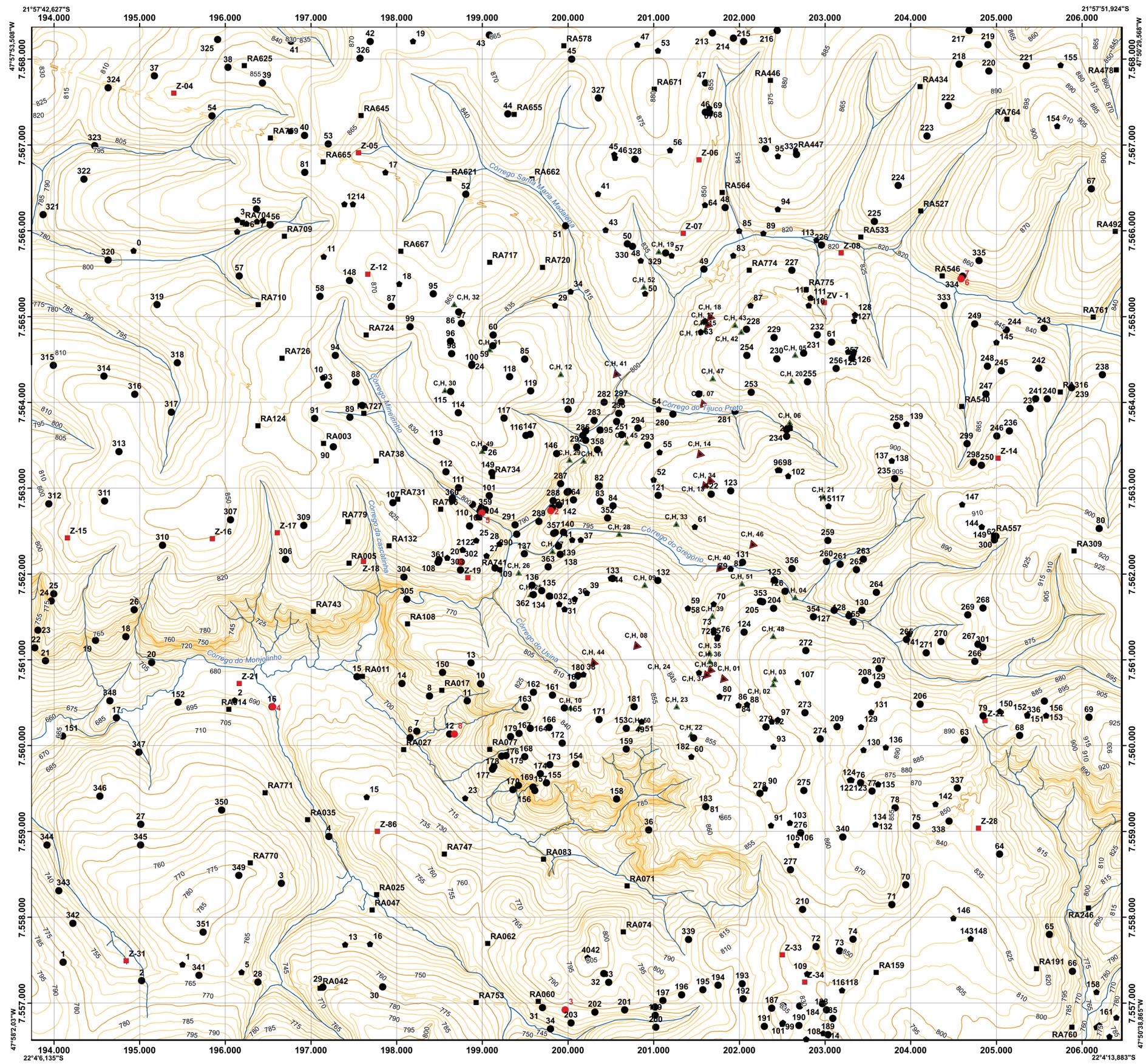


Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana
 de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando
 o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Anexo 1 - Base Cartográfica
 Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
 Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
 2012

Apêndice 1 - Mapa de Documentação



LEGENDA

Convenções Cartográficas

- Área de Estudos
- ~ Drenagem

PONTOS - DADOS SECUNDÁRIOS

- ▲ Postos de Combustível Contaminado
- ▲ Postos de Combustível Não Contaminado
- Poços Profundos Analisados
- Pontos com ensaios (Zuquette 1981)
- Pontos com ensaios (Aguiar, 1989)

PONTOS - DADOS PRIMÁRIOS

- Pontos de Campo
- Amostragem

Declinação Magnética 2011
Do Centro da Folha
Fuso 23
A Declinação Magnética
Varia Anualmente 9' Oeste

Escala de Mapeamento
1:10.000

Escala de Impressão
1:25.000

Escala Gráfica
0 0,25 0,5 1 Km

Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
Referência Vertical: Maregrafo de Imbituba, SC
Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)

Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000

054/84	054/85	054/86
055/84	055/85	055/86
056/84	056/85	056/86

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnica

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 1 - Mapa de Documentação

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
2012

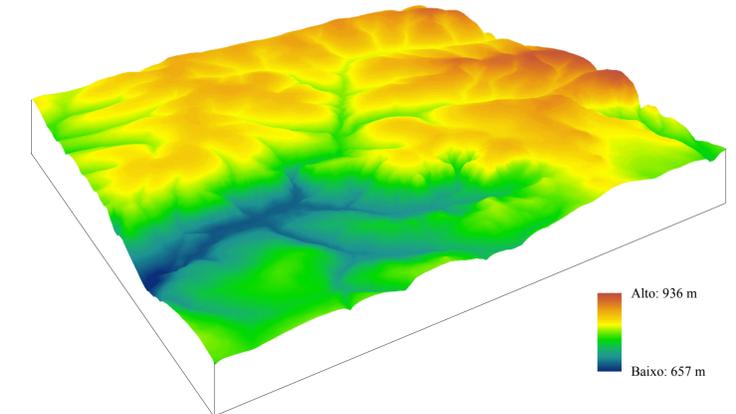
Apêndice 2 - Fotos Aéreas Georreferenciadas com Modelo Hilshade (10x)



LEGENDA

Mosaico de fotografias aéreas georreferenciadas com transparência igual a 36%.
Modelo hilshade - Azimute 315, Iluminação 45°, Elevação 10 vezes.

Modelo Digital do Terreno em Bloco Diagrama



Alto: 936 m
Baixo: 657 m

Convenções Cartográficas

□ Área de Estudos



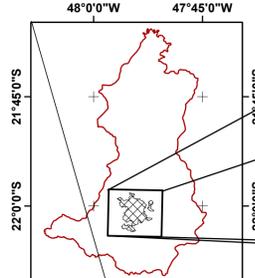
Escala de Mapeamento 1:10.000

Escala de Impressão 1:25.000

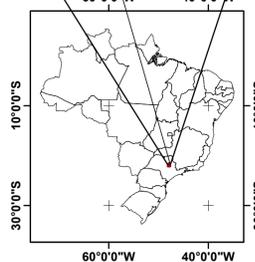
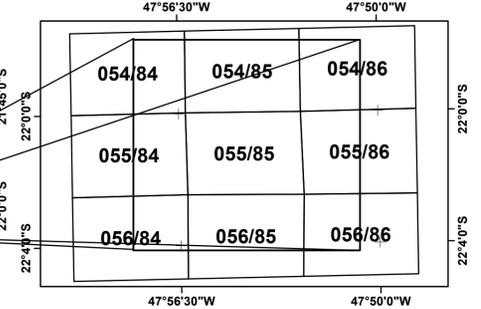


Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
Referência Vertical: Maregrafo de Lituba, SC
Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)



Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000



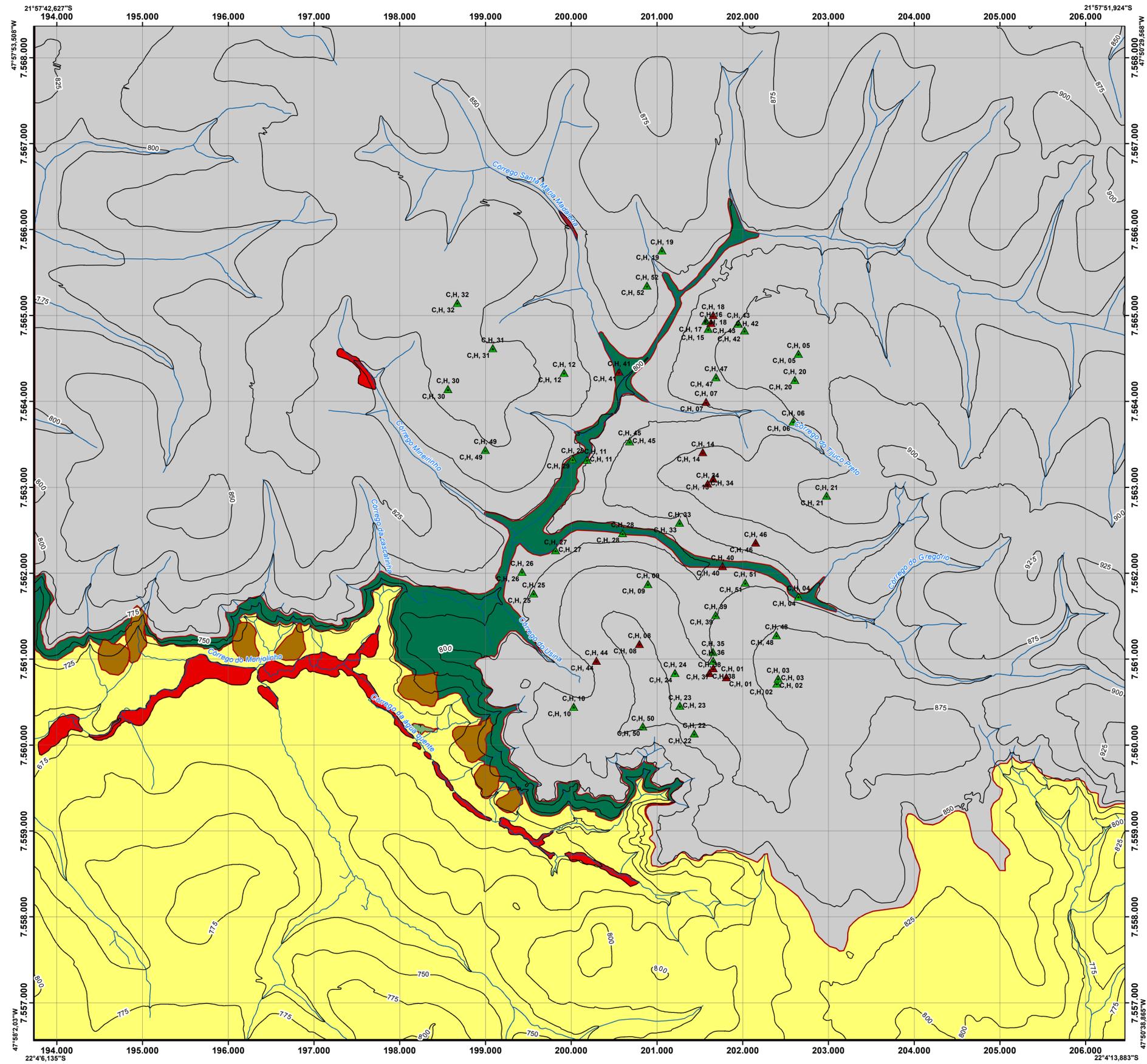

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia


Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 2 - Fotos Aéreas Georreferenciadas com Modelo Hilshade (10x)

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
 Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
 2012

Apêndice 3 - Mapa de Compartimentos Litológicos



LEGENDA

Compartimentos Litológicos

- Leques Coluviais - Areias mal selecionadas, em forma de leque na base da cuesta.
- Depósitos Aluviais Recentes - Areias bem selecionadas, com granulometria variada.
- Fm. Itaqueri - Areias finas a médias, sub ângulares, presença de argila e silte.
- Fm. Serra Geral - Rochas afaníticas, ricas em pirlênios e plagioclásios.
- Fm. Serra Geral (Diabásio) - Rochas faneríticas finas a médias.
- Fm. Botucatu - Areias quartzosas bimodais, foscas e bem selecionadas.

Convenções Cartográficas

- Área de Estudos
- Principais Vias de Acesso
- Drenagem
- Contato Litológico
- Curvas de Nível**
- Principal

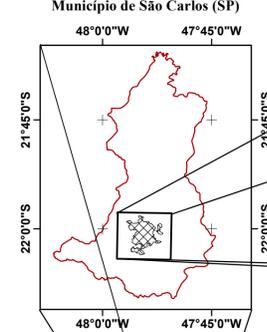
Postos de Combustível (CETESB, 2010)

- Contaminado
- Não Contaminado

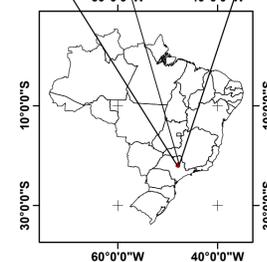
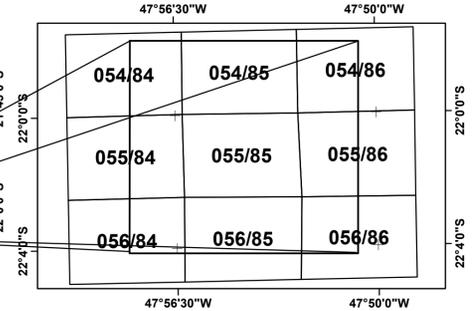
Declinação Magnética 2011
Do Centro da Folha
Fuso 23
A Declinação Magnética
Varia Anualmente 9' Oeste
Escala de Mapeamento
1:10.000

Escala de Impressão 1:25.000
Escala Gráfica 0 0,25 0,5 1 Km
Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
Referência Vertical: Maregrafo de Ibituba, SC
Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)



Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000



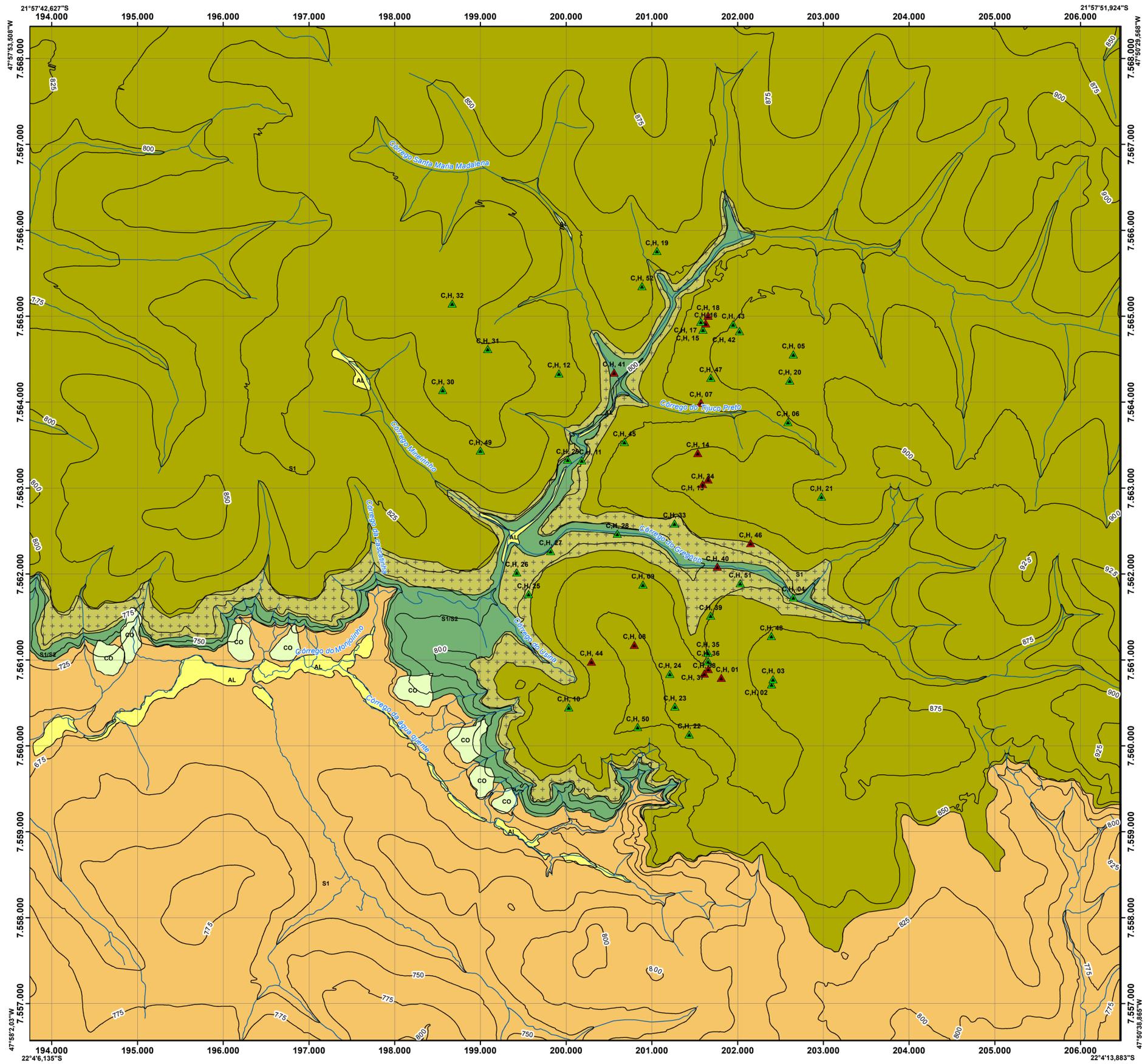
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 3 - Mapa de Compartimentos Litológicos

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
2012

Apêndice 4 - Mapa de Materiais Inconsolidados



LEGENDA

Convenções Cartográficas

- Área de Estudos
- ~ Drenagem
- Curvas Principais

Postos de Combustível (CETESB, 2010)

- ▲ Contaminado
- ▲ Não Contaminado

Materiais Inconsolidados

- AL** Aluvião (Areias quartzosas inconsolidadas, raramente argilosas)
- CO** Coluvião (Material de talus, com influência de material arenoso e basáltico)
- S1** Solo residual maduro da Fm. Itaqueri (Solos de textura predominantemente arenosa, ocorrendo lentes argilosas na porção NE da área)
- S1** Solo residual maduro da Fm. Itaqueri com influência de material basáltico (Solo de textura areno argilosa, com quartzos arredondados, de coloração semelhante aos solos da Fm. Serra Geral)
- S1/S2** Solo residual jovem e maduro da Fm. Serra Geral (Solos predominantemente de textura argilosa e coloração vermelho aroxeadada)
- S1** Solo residual maduro da Fm. Botucatu (Solo de textura arenosa pouco argilosa)

Convenções Cartográficas



Escala de Impressão 1:25.000
 Escala Gráfica 0 0,25 0,5 1 Km
 Referência Horizontal: Correio Alegre, MG
 Referência Vertical: Maregrafo de Imbituba, SC
 Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
 Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)

Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000

054/84	054/85	054/86
055/84	055/85	055/86
056/84	056/85	056/86

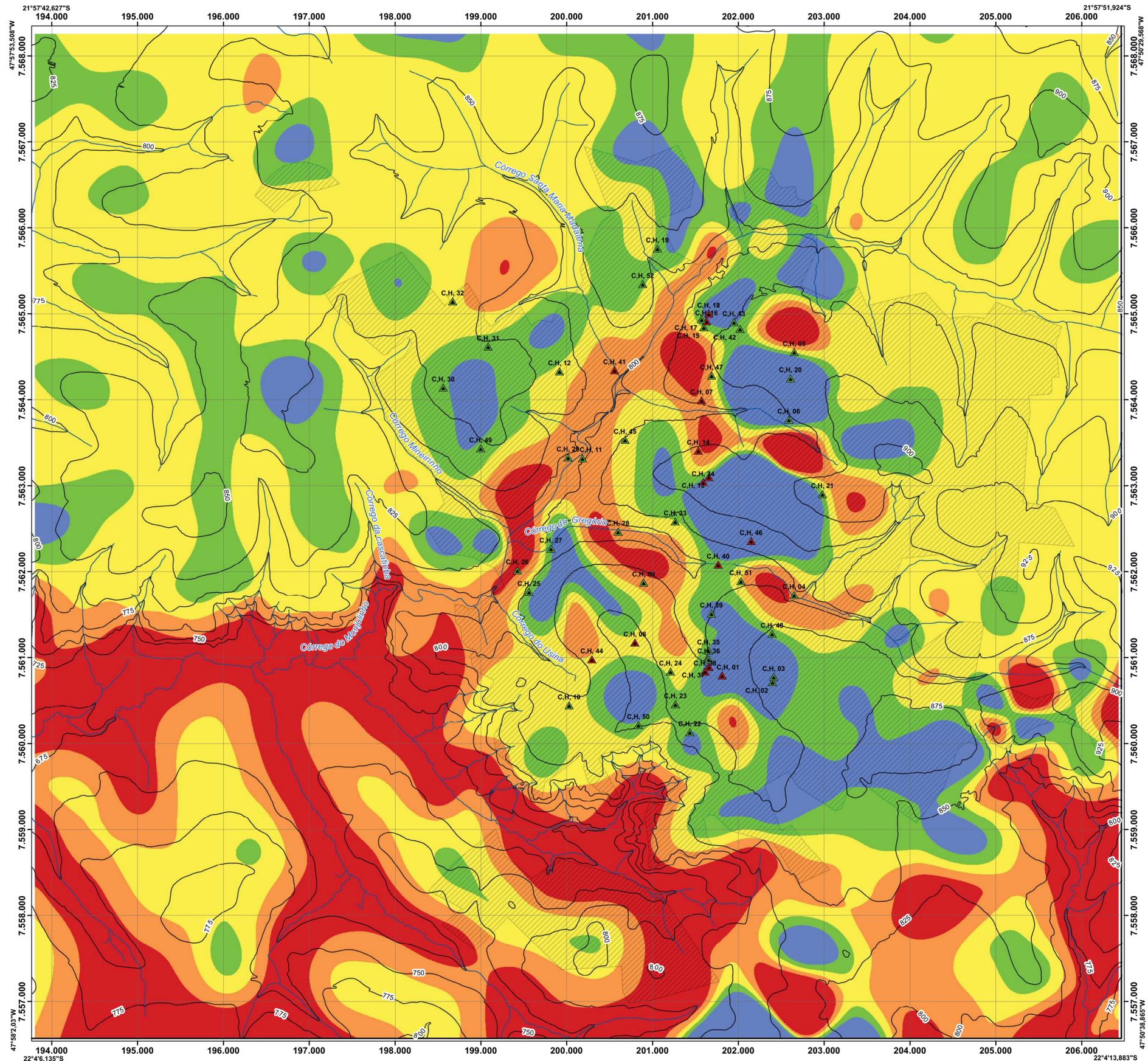
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 4 - Mapa de Materiais Inconsolidados

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
 Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
 2012

Apêndice 5 - Mapa Vulnerabilidade da Água Subterrânea



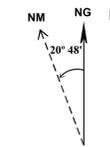
LEGENDA

- Área de Estudos
- Drenagem
- Curvas Principais
- Área Urbanizada
- Postos de Combustível (CETESB, 2010)**
- Contaminado
- Não Contaminado

Mapa de Vulnerabilidade da Água Subterrânea - Método GOD

- 0,0 - 0,1 - Insignificante
- 0,1 - 0,3 - Baixo
- 0,3 - 0,5 - Médio
- 0,5 - 0,7 - Alto
- 0,7 - 1 - Extremo

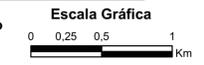
Convenções Cartográficas



Declinação Magnética 2011
Do Centro da Folha
Fuso 23
A Declinação Magnética
Varia Anualmente 9' Oeste

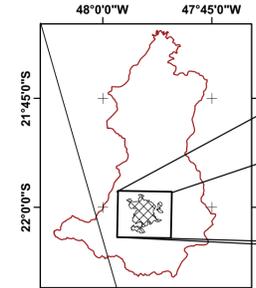
Escala de Mapeamento
1:10.000

Escala de Impressão
1:25.000

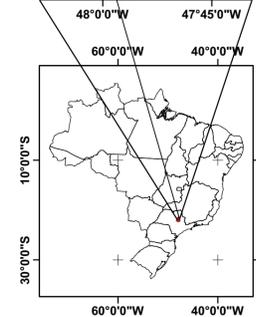
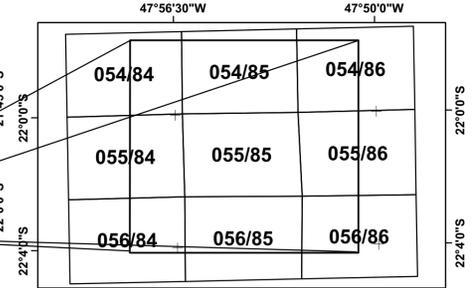


Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
Referência Vertical: Maregrafo de Imbituba, SC
Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no
Município de São Carlos (SP)



Localização da Área de Estudos na
Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000



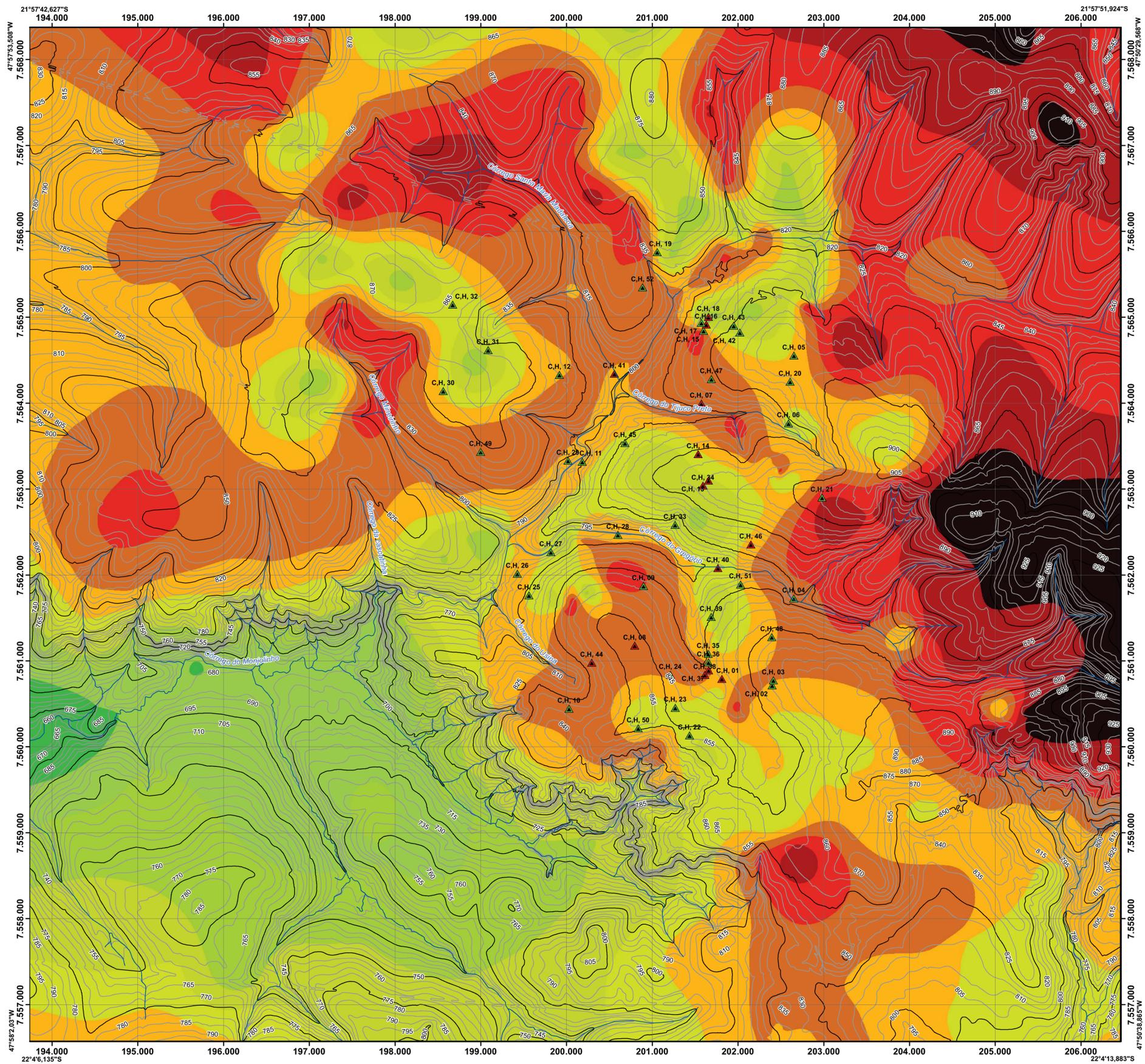
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 5 - Mapa Vulnerabilidade da Água Subterrânea

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
2012

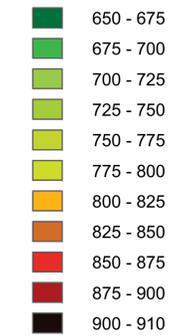
Apêndice 6 - Mapa do Topo do Lençol freático



LEGENDA

- Área de Estudos
- Drenagem
- Curvas de Nivel**
 - Principal
 - Secundária
- Postos de Combustível (CETESB, 2010)**
 - Contaminado
 - Não Contaminado

Tendência do topo do lençol freático em metros.



Convenções Cartográficas



Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
Referência Vertical: Maregrafo de Imbituba, SC
Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)

Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000

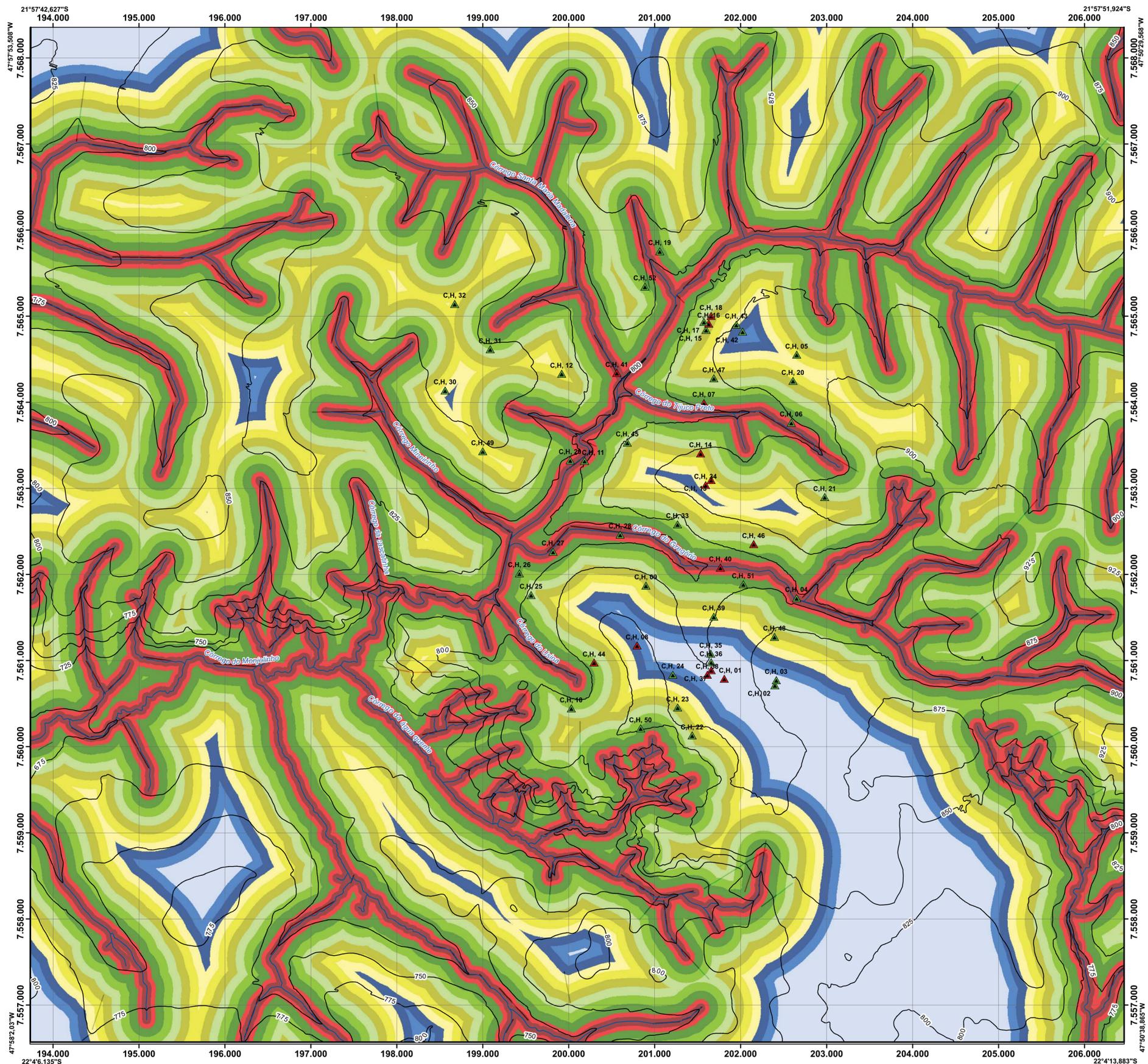
Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 6 - Mapa do Topo do Lençol freático

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
2012

Apêndice 7 - Mapa de Distância das Drenagens

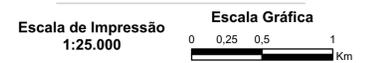


LEGENDA

- Convenções Cartográficas**
- Área de Estudos
 - ~ Drenagem
- Postos de Combustível (CETESB, 2010)**
- ▲ Contaminado
 - ▲ Não Contaminado
 - Curvas Principais

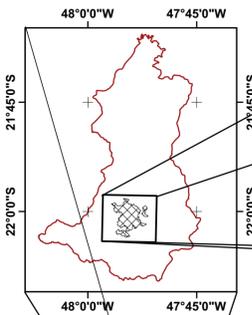
Contornos de distância horizontal dos canais de drenagem (m)

- 0 - 50
- 50 a 100
- 100 a 200
- 200 a 300
- 300 a 400
- 400 a 500
- 500 a 600
- 600 a 700
- 700 a 800
- 800 a 900
- > 900

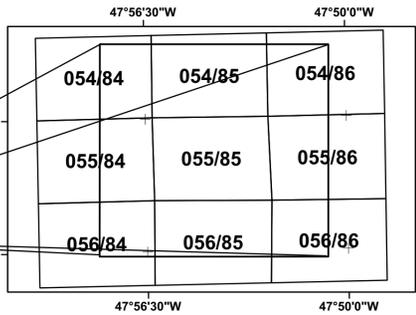


Referência Horizontal: Corrego Alegre, MG
 Referência Vertical: Maregrafo de Imituba, SC
 Projeção em UTM (Universal Transversa Mercator)
 Meridiano Central: 45° Fuso 23

Localização da Área de Estudos no Município de São Carlos (SP)



Localização da Área de Estudos na Articulação das Cartas Topográficas 1:10.000



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Geotecnia

Análise da Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos na Região Urbana de São Carlos (SP) por Vazamentos em Postos de Combustíveis, Utilizando o Método GOD e Avaliação dos Condicionantes Geotécnicos

Apêndice 7 - Mapa de Distância das Drenagens

Autor: Geólogo Daniel Bartolomeu
 Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho
 2012