

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**VULNERABILIDADE NATURAL E AVALIAÇÃO DE RISCO DE  
CONTAMINAÇÃO DOS SISTEMAS DE AQÜÍFEROS NAS ÁREAS DEGRADADAS  
PELA EXTRAÇÃO DE CARVÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MÃE  
LUZIA**

Lucas Rubbo Gonçalves

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

**VULNERABILIDADE NATURAL E AVALIAÇÃO DE RISCO DE  
CONTAMINAÇÃO DOS SISTEMAS DE AQÜÍFEROS NAS ÁREAS DEGRADADAS  
PELA EXTRAÇÃO DE CARVÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MÃE  
LUZIA**

Lucas Rubbo Gonçalves  
Engenheiro Sanitarista e Ambiental

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia de Minas, da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Tecnologia Mineral/Ambiental e Metalurgia Extrativa

Porto Alegre

2012

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral/Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Banca Examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Carolina Chierigati

Prof. Dr. Raul Oliveira Neto

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vlândia Cristina de Souza

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGEM

*"A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca."*

*Paulo Freire*

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Aos Professores Jair Carlos Koppe e João Felipe C.L. Costa pela acolhida e oportunidade de fazer parte do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro.

Em especial ao Dr. Jair Carlos Koppe pela orientação na elaboração deste trabalho e pelos constantes ensinamentos.

Aos meus pais pelo amor e apoio incondicional.

A todos os colegas e amigos do LPM pelas inúmeras colaborações na realização deste trabalho.

Aos Bolsistas de Iniciação Científica Heitor Campana e Ricardo Nuñez Andrade.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

# Índice

Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	x
Resumo.....	xi
Abstract.....	xii
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Meta e Objetivos.....	3
1.2 Organização da Dissertação.....	3
<b>2. Caracterização da Área de Estudo .....</b>	<b>5</b>
2.1 Condições Climáticas e Pluviométricas.....	6
2.2 Geologia.....	9
2.3 Vegetação.....	10
2.4 Rede Hidrográfica.....	11
<b>3. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>13</b>
3.1 Mineração de carvão em Santa Catarina.....	13
3.2 Mineração e o Meio Ambiente.....	16
3.3 Águas Subterrâneas.....	20
3.4 Vulnerabilidade natural de aquíferos.....	26
3.5 Avaliação de risco.....	30
3.6 Sistema de Informações Geográficas.....	34
<b>4. Metodologia.....</b>	<b>39</b>
4.1 Mapa Hidrogeológico.....	40

4.2 Mapa Geológico.....	41
4.3 Profundidade do Aqüífero.....	41
4.4 Áreas Degradadas e Cobertura do Solo.....	42
4.5 Mapa de Vulnerabilidade.....	44
4.6 Mapa de Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas.....	45
<b>5. Análise de Resultados.....</b>	<b>50</b>
5.1 Vulnerabilidade natural.....	50
5.2 Avaliação de risco de contaminação.....	63
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>70</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>72</b>
Anexo 1 – Vulnerabilidade.....	77
Anexo 2 – Cobertura atual do solo.....	78
Anexo 3 – Mapa de potencial de dano ambiental.....	79
Anexo 4 – Mapa de Risco.....	80



# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia. (Epagri/Ciram, 2009) .....	6
Figura 2.2 – Média de pluviosidade mm/mês entre 1960 e 2010 .....	8
Figura 2.3 – Temperatura média mensal .....	9
Figura 2.4 – Área de conflitos na bacia do rio Mãe Luzia (adaptado: Santa Catarina, 2007) .....	12
Figura 3.1 – Ciclo Hidrológico .....	21
Figura 3.2 – Gerenciamento de risco (McKensey, 1997) .....	32
Figura 3.3 – Imagens: vetorial e raster (adaptado de Eastman 1998).....	37
Figura 4.1 – Metodologia empregada na análise de vulnerabilidade e na avaliação de risco dos aquíferos subterrâneos .....	39
Figura 4.2 – Metodologia G.O.D. (adaptado de Foster e Hirata 1987).....	45
Figura 4.3 – Matriz de avaliação de risco .....	46
Figura 4.4 – Avaliação de risco .....	47
Figura 4.5 – Fluxograma para a avaliação da vulnerabilidade .....	48
Figura 4.6 – Fluxograma para a avaliação de risco .....	49
Figura 5.1 – Municípios e distritos na bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia. (GTA 2009 e EPAGRI\CIRAM 2009) .....	50
Figura 5.2 – Mapa de Domínios Hidrogeológicos. (Krebs, 2004) .....	52
Figura 5.3 – Índices de variação (G) para o tipo de ocorrência da água subterrânea (fonte: Foster e Hirata, 1987) .....	53
Figura 5.4 – Ocorrência da água subterrânea relacionadas ao tipo de aquífero (índice G).....	54
Figura 5.5 – Índices para as diferentes características geológicas (fonte: Foster e Hirata, 1987).....	55
Figura 5.6 – Mapa Geológico (Krebs, 2004) .....	56
Figura 5.7 – Características litológicas quanto ao índice O.....	57
Figura 5.8 – Índices para os diferentes intervalos de profundidade (fonte: Foster e Hirata, 1987).....	59
Figura 5.9 – Profundidade (índice D) e localização dos poços.....	61
Figura 5.10 – Vulnerabilidade natural na bacia (a) e nas áreas impactadas (b) .....	62
Figura 5.11 – Vulnerabilidade nas áreas impactadas separada por distritos .....	63
Figura 5.12 – Cobertura do solo nas áreas impactadas da bacia separado pelo índice potencial de dano ambiental .....	64
Figura 5.13 – Cobertura do solo por distrito separado pelo índice potencial de dano ambiental.....	66
Figura 5.14 – Estatísticas das áreas impactadas da bacia por categorias de risco .....	67
Figura 5.15 – Risco de contaminação nas áreas degradadas separado por distritos.....	68

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Dados de pluviométricos mensais (mm) entre 1960 e 2010, segundo a Agência Nacional das Águas (SNIRH, 2010).....	7
Tabela 2.2 – Temperatura média mensal (Fonte: Santa Catarina, 1997) .....	8
Tabela 3.1 – Principais impactos ambientais causados pela mineração <b>de carvão</b> (Fonte: Aguiar <i>et al.</i> , 2008) .....	17
Tabela 3.2– Principais mapas de riscos ambientais (Fonte: Lahr e Kooistra, 2010).....	33
Tabela 4.1 – Fonte potencial de dano ambiental e classes de cobertura do solo .....	46
Tabela 5.1 – Sistemas de aquíferos (fonte: Krebs, 2004) .....	51
Tabela 5.2 – Tipos de sistemas de aquíferos .....	53
Tabela 5.3 – Formações Geológicas (fonte: Krebs, 2004) .....	55
Tabela 5.4 – Localização dos poços de monitoramento (fonte: SIAGAS, 2010).....	59
Tabela 5.5 – Nível estático dos poços monitorados .....	60
Tabela 5.6 – Poços e índice para a profundidade da água subterrânea .....	60
Tabela 5.7 – Índice potencial de dano ambiental para cada classe de cobertura do solo .....	64
Tabela 5.8 – Hierarquização dos riscos.....	69

## Resumo

A bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia está localizada dentro da bacia carbonífera catarinense, no sul do estado de Santa Catarina, em uma região muito impactada em termos ambientais, principalmente pela geração de Drenagem Ácida de Mina (DAM), o principal aspecto ambiental a ser considerado para o gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos e superficiais. A indústria carbonífera, com a exploração do carvão mineral há mais de um século, contribuiu muito para a degradação da qualidade das águas superficiais da região. Ao contrário da poluição das águas superficiais, a poluição das águas subterrâneas é de difícil detecção, de difícil controle e ainda pode persistir por anos, décadas e até mesmo séculos. Nesse sentido, justifica-se a realização de estudos visando à proteção dos recursos hídricos subterrâneos e evitar a sua deterioração. O presente estudo tem como objetivo mapear a vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos e realizar a avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas nas áreas degradadas pela extração de carvão. Para o estudo da vulnerabilidade utilizou-se a metodologia GOD que consiste na combinação de três parâmetros físicos: o tipo de ocorrência do aquífero, descrição da zona não saturada e profundidade do nível freático. Para a avaliação de risco, foram combinados mapas de vulnerabilidade e da cobertura do solo atual das áreas impactadas pela atividade carbonífera, que nos fornece a informação onde o rejeito e o estéril foram isolados cessando a oxidação da pirita, evitando a geração da DAM. O Mapa de Vulnerabilidade evidenciou as áreas mais suscetíveis para contaminação (localizadas ao norte da bacia, em uma região não degradada pela extração de carvão), enquanto que o Mapa de Risco mostrou regiões onde podem ser priorizados os trabalhos de pesquisa e recuperação das áreas degradadas devido ao risco elevado associado a estas áreas.

Palavra chave: avaliação de risco ambiental, SIG, passivo ambiental, carvão mineral.

## Abstract

The Mãe Luzia river watershed is located inside the Santa Catarina coal basin in the southern of Santa Catarina state, a region very environmentally impacted mostly by the generation of Acid Mine Drainage (AMD), the main environmental aspects to be considered for the management of groundwater and surface water. The coal industry, with the exploitation of coal for more than a century, contributed much to the degradation of the quality of surface waters in the region. Unlike the surface water pollution, pollution of groundwater is difficult to detect, difficult to control and still may persist for years, decades and even centuries. In this sense, it justifies studies aimed the protection of groundwater resources and prevent deterioration. The present study aims to map the natural vulnerability of aquifers to contamination and perform a risk assessment of groundwater contamination in areas degraded by coal mining. The vulnerability was studied using the GOD methodology, which is the combination of three physical parameters: Groundwater occurrence, Overall litology of aquiperm or aquitard and Depth to groundwater table. For risk assessment were combined the vulnerability map and the current soil cover in the areas impacted by the coal industry, which give us the information where the waste/tailing were isolated, ceasing the oxidation of pyrite, avoiding AMD generation. The Vulnerability Map showed the area most susceptible to contamination (located north of the watershed, in a region not degraded by coal mining), while the Risk Map shows areas where works of search and recovery of degraded areas can be prioritized due to the high risk associated with these regions.

Keyword: environmental risk assessment, GIS, environmental liabilities, coal.

# 1. Introdução

A bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia está localizada dentro da bacia carbonífera catarinense, no sul do estado de Santa Catarina. O rio Mãe Luzia é um dos rios formadores do rio Araranguá, junto com rio Itoupava e rio dos Porcos, formando a Bacia Hidrográfica do rio Araranguá. A bacia está localizada em uma região muito impactada em termos ambientais, principalmente pela exploração de carvão mineral, sem os cuidados necessários para a preservação do meio ambiente. A preocupação ambiental na região surgiu somente quando o governo federal por base do decreto federal n° 085206/80 classificou a região carbonífera de Santa Catarina como a 14ª área crítica nacional.

Para o gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos e superficiais, a geração de Drenagem Ácida de Mina (DAM) é o principal aspecto ambiental a ser considerado. A indústria carbonífera, com a exploração do carvão mineral há mais de um século, contribuiu muito para a degradação da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia. Existem inúmeros conflitos de uso de água na região, principalmente relacionado à sua qualidade, tais como, a falta de tratamento do esgoto municipal, uso em processos industriais, cemitérios, postos de gasolinas e outros potenciais poluidores contribuem causando forte impacto ambiental. Nesta dissertação tais fontes não foram utilizadas. O estudo ficou restrito às classes de cobertura do solo nas áreas impactadas pela exploração do carvão mineral

Com o aumento da poluição dos recursos hídricos superficiais ocorre uma procura maior para os recursos hídricos subterrâneos. As águas subterrâneas têm como principais vantagens, em relação às águas superficiais, um baixo custo relativo ao seu aproveitamento e uma excelente qualidade natural normalmente apresentada, que dispensam investimentos com estação de tratamento.

Em contraste com a poluição das águas superficiais, a poluição das águas subterrâneas é de difícil detecção, é ainda mais difícil o seu controle, e ainda pode persistir por anos, décadas e até mesmo séculos. Nesse sentido, justifica-se a realização de estudos relacionados à vulnerabilidade natural de aquíferos, visando

sua proteção e evitar a deterioração desses recursos por atividades antrópicas realizadas na superfície do solo. Existem diversas metodologias para avaliar e mapear a vulnerabilidade, destacando-se as metodologias DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster e Hirata, 1987).

Nesta pesquisa utilizou-se a metodologia GOD, desenvolvida por Foster e Hirata (1987). Esta metodologia consiste em combinar três parâmetros físicos inerentes ao meio. Esses parâmetros são o tipo de ocorrência da água subterrânea, descrição da zona não saturada em termos de grau de consolidação e características litológicas e profundidade do nível freático. O resultado dessa combinação gera o índice de vulnerabilidade, variando de ausente, negligenciável, baixo, moderado, alto e extremo. A metodologia GOD destina-se ao primeiro passo da avaliação do risco de poluição das águas subterrânea, e destina-se, também, a priorizar, mas não substituir, ações sistemáticas de monitoramento e inspeção em campo.

Para a avaliação do risco de contaminação dos sistemas de aquíferos na bacia do rio Mãe Luzia realizou-se a interação e a sobreposição dos mapas de vulnerabilidade dos sistemas de aquíferos e cobertura do solo atual nas áreas impactadas previamente pela mineração. A cobertura do solo nessas áreas nos fornece a informação onde o rejeito e o estéril foram isolados cessando a oxidação da pirita, evitando a geração da drenagem ácida (DAM). Para isso dividiu-se em 9 classes: vegetação espontânea, vegetação induzida, remanescente florestal, argila, lagoa ácida interna, lagoa ácida externa, urbanização residencial, urbanização industrial e rejeito ou estéril exposto. Em seguida, atribuíram-se índices com relação à fonte potencial de dano ambiental de cada área variando entre baixo, moderado, alto e extremo.

O gerenciamento, integração e análise dos dados foram feitos com o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O SIG permite a manipulação de uma grande quantidade de dados georreferenciados, essencial para o andamento dessa pesquisa. Com isso é possível a construção de mapas ilustrando os diferentes graus de vulnerabilidade dentro de uma dada área, e a espacialização da avaliação de risco de contaminação, essenciais para políticas de proteção e gestão ambiental dos recursos hídricos subterrâneos.

## **1.1 Meta e Objetivos**

A meta desta dissertação consiste na aplicação de uma metodologia de mapeamento da vulnerabilidade à contaminação dos sistemas de aquíferos subterrâneos para realizar uma análise de risco ambiental da bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia.

Os objetivos específicos incluem: avaliar o risco de contaminação da água subterrânea, aplicar recursos e ferramentas de integração de dados georreferenciados para visualização, analisar e interpretar de dados disponíveis, construir um mapa de vulnerabilidade natural e um mapa de risco para a bacia do rio Mãe Luzia e identificar os principais fatores que podem afetar a vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos. Para isso propõe-se:

- Coletar informações referentes à hidrogeologia, geologia e profundidade do sistema de aquíferos da bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia;
- Mapear a vulnerabilidade natural à contaminação dos sistemas de aquíferos da bacia utilizando a metodologia GOD;
- Definir áreas com potencial de dano ambiental com base nas classes de cobertura de solo das áreas previamente impactadas pela indústria do carvão;
- Realizar a avaliação e o mapeamento de risco de contaminação dos aquíferos integrando as informações de vulnerabilidade e das áreas com potencial de dano ambiental para avaliar o risco.

## **1.2 Organização da Dissertação**

Os próximos capítulos desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

O capítulo 2 apresenta a localização e uma breve caracterização da área de estudo.

No capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica de alguns conceitos necessários para a compreensão da dissertação.

O capítulo 4 apresenta a metodologia adotada para a realização da pesquisa.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos por meio da integração dos dados em ambiente SIG, e uma análise dos mapas de vulnerabilidade e de avaliação de risco de contaminação.

E no capítulo 6 apresentam-se as conclusões, considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.



## 2. Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do rio Mãe Luzia está localizada entre as latitudes 28°25,97'S e 28°56,39'S e as longitudes 49°20,60'W 49°50,33'W, na Região Hidrográfica do Extremo Sul Catarinense (RH 10). O rio Mãe Luzia é um dos rios formadores do rio Araranguá, junto com rio Itoupava e rio dos Porcos, formando a Bacia Hidrográfica do rio Araranguá. A Bacia Hidrográfica do Rio Mãe Luzia possui uma área de 1.501 km<sup>2</sup> e um perímetro de 191,34 km (SDM, 1997).

O rio Mãe Luzia tem suas nascentes localizadas na Serra Geral, entre seus afluentes se destacam os rios Sangão, Manoel Alves, do Cedro, Jordão, Manim, Fiorita e São Bento. De águas cristalinas em suas cabeceiras, o Rio Mãe Luzia atravessa totalmente a bacia carbonífera, recebendo águas contaminadas pelas atividades de exploração de carvão mineral (Scheibe *et al*, 2010).

A Bacia Hidrográfica do Rio Mãe Luzia drena os territórios de 11 municípios, são eles: Araranguá, Criciúma, Forquilha, Maracajá, Meleiro, Morro Grande, Nova Veneza, Siderópolis, Treviso e Urussanga. Os municípios de Forquilha, Nova Veneza, Siderópolis e Treviso possuem todo território dentro da bacia hidrográfica, os demais apenas parcialmente seus territórios (Figura 2.1).

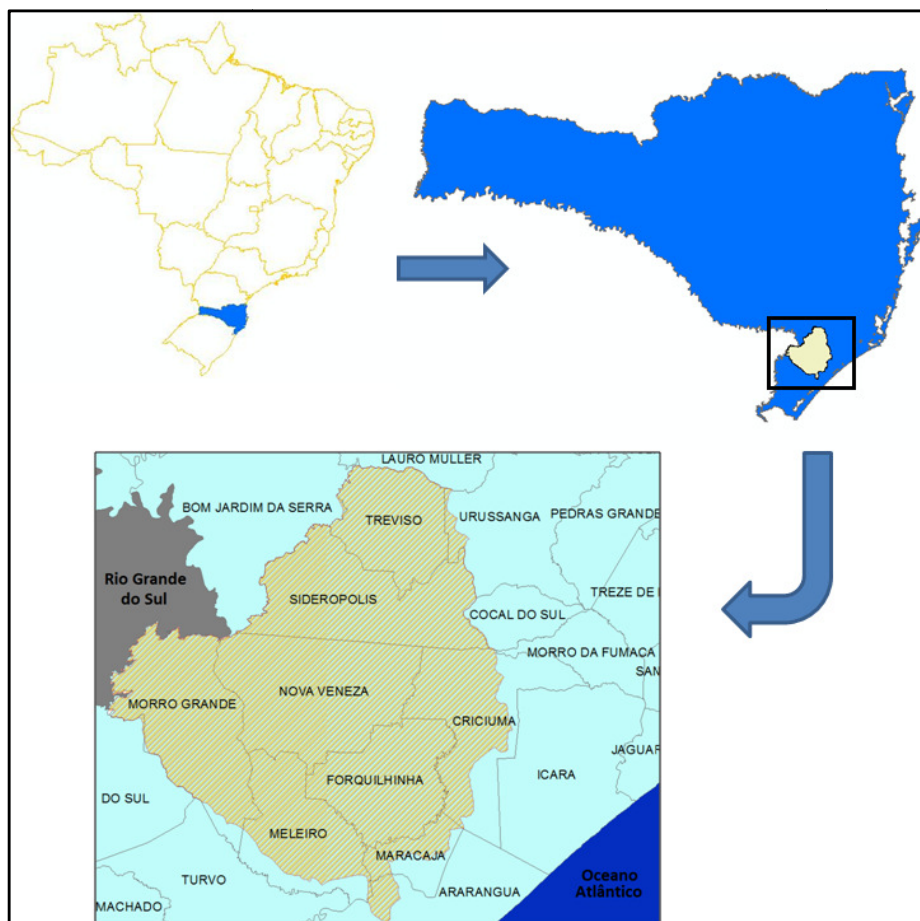


Figura 2.1 – Bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia. (Epagri/Ciram, 2009)

## 2.1 Condições Climáticas e Pluviométricas

Para a caracterização climatológica foram utilizados os dados climáticos das Estações Meteorológicas de Taquaraçu (Latitude: 28°57,5'S, Longitude: 49°36'W, Altitude: 10 metros) para a distribuição das chuvas, obtido no portal do Serviço Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, da Agência Nacional das Águas (SNIRH, 2010) e de Araranguá (Latitude: 28°53'S, Longitude: 49°31'W, Altitude: 12,3 metros) para temperatura, obtidos do plano de gestão e gerenciamento da bacia do Rio Araranguá (SDM, 1997).

Os dados de chuvas mostram uma série histórica de 1955 até 2010. As chuvas mostram uma distribuição bastante equilibrada entre todas as estações do ano, havendo uma considerável diferença entre as médias mensais dos meses de

maior e menor precipitação. Na Tabela 2.1 e na Figura 2.2 são apresentados os dados pluviométricos e o histograma correspondente, respectivamente.

Tabela 2.1 - Dados pluviométricos mensais (mm) entre 1960 e 2010, segundo a Agência Nacional das Águas (SNIRH, 2010)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1960	165,8	169,0	282,8	47,8	24,4	99,6	65,6	167,4	83,6	85,0	69,2	73,0
1961	118,0	138,8	257,4	111,4	43,2	165,6	112,8	73,4	293,0	148,0	224,8	118,4
1962	78,4	106,4	174,4	48,2	54,8	15,4	108,6	55,0	127,0	17,6	44,8	50,4
1963	250,0	202,0	237,6	18,6	17,6	29,0	64,0	171,8	137,0	162,2	124,4	29,6
1964	13,4	124,8	111,0	79,8	17,2	42,2	63,4	84,6	109,4	124,6	57,0	79,2
1965	68,4	47,6	173,0	72,8	56,0	31,8	38,4	430,0	153,2	84,8	91,8	117,6
1966	194,6	136,4	116,6	92,8	0,0	101,8	73,4	58,2	165,0	139,2	54,4	156,6
1967	85,8	260,6	114,2	53,8	49,6	55,2	41,2	89,0	290,6	42,2	94,6	19,6
1968	134,6	70,8	57,8	36,6	14,8	45,4	39,6	12,0	146,2	61,2	92,2	51,0
1969	126,8	177,2	154,4	96,2	61,6	102,6	10,6	25,4	161,4	68,6	133,2	28,0
1970	46,2	134,8	213,2	0,0	108,6	69,6	98,8	79,0	40,8	130,4	16,4	41,0
1971	96,4	287,6	134,0	119,4	88,8	152,0	28,8	104,8	85,6	42,0	55,0	52,6
1972	296,4	305,8	227,4	102,4	53,4	147,2	107,8	194,2	183,6	162,8	113,2	153,0
1973	132,4	214,6	83,8	76,4	70,8	84,8	133,8	203,6	110,4	95,0	82,4	96,4
1974	39,0	220,0	168,6	0,0	85,8	131,4	98,6	24,4	35,4	44,0	120,8	130,6
1975	90,6	145,4	178,8	41,8	76,4	63,2	29,4	246,2	167,2	166,9	108,3	110,4
1976	100,3	95,0	276,9	8,6	340,4	74,1	93,7	192,3	92,0	50,2	157,9	127,2
1977	177,2	99,5	214,9	38,4	54,9	55,7	110,9	387,5	124,2	56,4	102,1	131,1
1978	183,2	156,4	162,7	17,2	9,2	21,6	107,1	60,9	94,5	146,0	128,1	85,0
1979	37,3	71,2	176,6	69,6	91,0	28,7	50,7	30,8	44,1	117,4	143,2	211,6
1980	87,6	80,0	51,8	41,8	98,4	36,9	122,7	139,1	116,7	102,3	82,9	283,3
1981	155,5	101,7	70,7	273,4	96,6	172,1	130,8	88,4	240,7	84,5	144,4	68,2
1982	65,2	101,6	192,6	21,7	46,2	219,5	64,7	88,6	47,7	132,5	185,6	84,4
1983	118,8	92,8	105,0	152,3	113,4	177,2	388,2	247,0	62,0	103,0	268,2	185,0
1984	205,7	121,9	214,5	112,6	83,2	103,6	87,6	78,9	71,3	95,1	145,4	75,7
1985	95,7	325,6	110,4	78,7	60,2	105,8	66,0	214,6	53,5	139,7	46,3	112,3
1986	38,6	151,6	94,8	88,0	85,4	46,8	91,2	85,6	168,4	250,4	159,4	126,6
1987	196,6	194,6	41,2	88,8	208,6	117,6	221,2	236,6	71,0	227,0	124,0	---
1988	203,0	67,4	32,0	126,6	42,2	126,2	20,2	23,8	261,6	88,8	41,4	55,0
1989	183,5	84,2	214,6	194,6	162,0	38,0	117,6	74,4	229,8	70,6	45,8	54,0
1990	169,6	139,8	96,6	142,4	58,6	134,8	63,2	30,4	144,6	195,6	174,6	79,4
1991	153,0	36,0	63,4	140,2	51,0	68,8	---	---	---	---	205,6	234,6
1992	122,6	133,6	202,0	50,8	192,2	75,0	161,6	89,0	131,4	43,0	45,2	19,0
1993	300,0	165,4	74,8	59,8	55,8	53,0	163,4	25,4	208,4	109,0	87,4	174,4
1994	60,8	282,0	142,0	100,0	391,0	86,8	83,6	51,6	48,8	144,8	88,6	135,8
1995	123,0	86,3	115,8	23,2	54,4	101,0	124,4	102,8	106,8	79,0	68,4	310,4
1996	---	165,3	174,1	98,6	63,1	115,2	57,4	149,8	177,4	147,0	85,0	194,4
1997	223,4	236,3	101,8	26,0	33,4	83,8	132,8	300,3	88,0	225,0	251,2	132,2
1998	93,1	199,5	147,5	98,0	76,9	64,0	101,6	199,9	156,4	59,6	65,8	180,9
1999	70,6	136,6	152,3	156,0	46,3	44,0	152,8	47,2	59,8	111,6	83,0	75,6
2000	214,2	190,9	143,8	63,6	58,8	134,2	63,0	78,8	168,6	299,0	83,2	156,8
2001	251,1	265,0	62,8	131,6	128,2	79,6	173,4	28,8	178,0	106,2	90,0	71,8
2002	200,4	137,2	137,8	87,8	100,0	209,4	82,1	101,2	82,2	190,8	173,6	180,2
2003	46,2	397,8	173,7	56,8	37,0	90,4	94,1	20,4	69,6	101,9	45,0	148,4
2004	109,4	79,2	193,0	113,8	326,3	49,8	85,2	13,0	206,4	90,6	120,7	96,0
2005	17,6	44,3	276,1	76,2	114,5	52,7	61,4	210,4	161,0	269,4	76,1	72,3
2006	339,3	212,2	74,7	101,2	100,3	79,6	98,8	72,4	18,8	76,5	182,6	61,3
2007	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	167,3	99,3
2008	115,8	183,0	118,8	145,6	86,0	62,4	10,0	80,0	111,4	142,0	134,7	84,2
2009	328,7	218,8	137,8	84,2	70,3	---	57,4	219,9	457,1	84,9	151,9	141,2
2010	212,9	146,3	246,0	89,7	292,8	72,4	114,2	64,6	---	---	---	---
Média	141,6	158,8	149,6	83,1	93,0	94,3	95,3	119,5	136,3	119,0	112,7	113,4

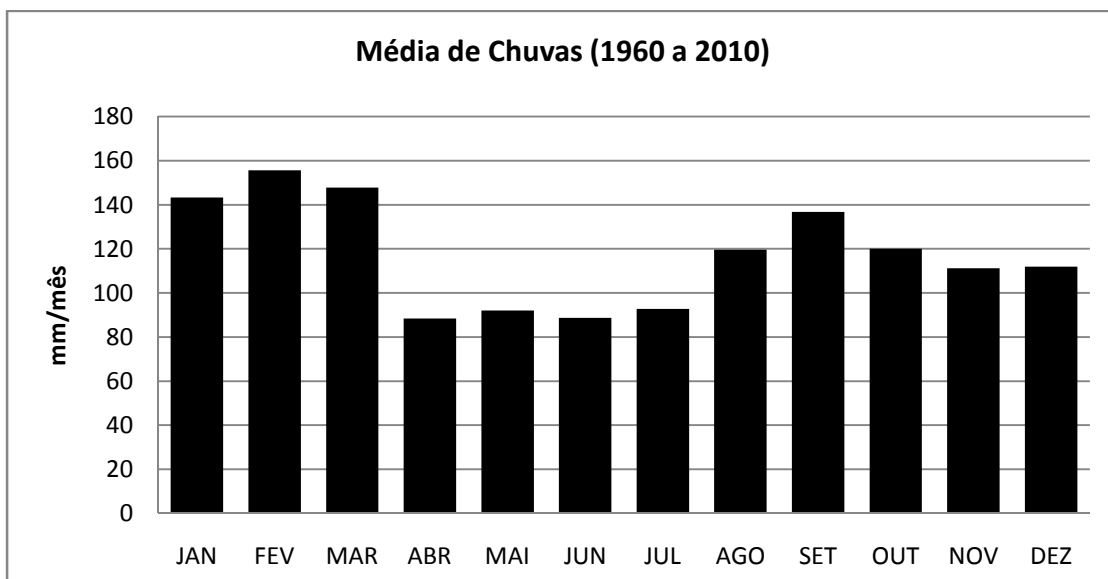


Figura 2.2 - Média de pluviosidade mm/mês entre 1960 e 2010.

Com relação às temperaturas (Tabela 2.2 e Figura 2.3), as médias mais elevadas são registradas nos meses de janeiro, fevereiro e março (23,4°C) e as mais baixas no mês de julho (14,3°C).

Tabela 2.2 – Temperatura média mensal (Fonte: Santa Catarina, 1997)

Mês	Temp. Média (°C)	Média Temp. Máx. (°C)	Média Temp. Min. (°C)
Jan	23,4	28,7	18,6
Fev	23,4	28,5	18,8
Mar	23,4	27,6	17,8
Abr	19,7	25,4	14,7
Mai	17,1	23,2	11,6
Jun	15,2	21,5	9,8
Jul	14,3	20,9	9,6
Ago	15,3	21,2	9,9
Set	16,7	21,9	11,7
Out	18,6	23,5	13,9
Nov	20,5	25,6	15,3
Dez	22,3	27,8	17,2
Legenda	Temp. Média	-Temperatura média	
	Média Temp. Máx.	-Médias das temperaturas máximas	
	Média Temp. Min.	-Médias das temperaturas mínimas	

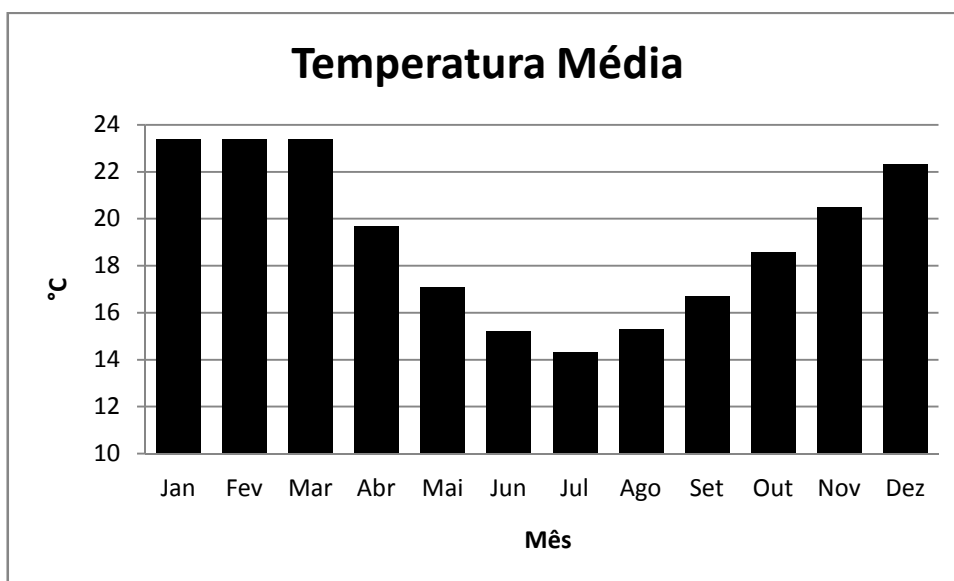


Figura 2.3 - Temperatura média mensal

A bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia está inserida em uma região cuja classificação climática, segundo a metodologia proposta por Koeppen, é Cfa (clima subtropical úmido). É classificada como subtropical em razão de a temperatura do mês mais quente ser superior a 22,0°C (SANTA CATARINA, 1997).

Os dados climáticos e pluviométricos apresentados foram utilizados apenas para caracterizar a área de estudos e não serão utilizados como variáveis no trabalho. Os índices pluviométricos podem influenciar a infiltração de poluentes no solo, devido ao aumento da carga na superfície do terreno.

## 2.2 Geologia

Scheibe *et al.* (2010) fazem uma descrição histórica da formação da bacia do Rio Araranguá. No período Permiano (entre 280 e 250 milhões de anos atrás), desenvolveram-se densas florestas que, depositadas em bacias e encobertas pelas águas e submetidas à ação de bactérias anaeróbicas, à pressão e ao aumento da temperatura pelo soterramento, vieram a constituir as camadas de carvão da Formação Rio Bonito.

Nos períodos Triássico, Jurássico e Cretáceo (entre 250 e 115 milhões de anos atrás), formou-se um imenso deserto, conhecido no Brasil como Deserto de

Botucatu, originando um espesso pacote de arenitos porosos e permeáveis, onde se encontra o famoso Aquífero Guarani, que aflora numa estreita faixa ao longo das escarpas da Serra Geral.

Cerca de 150 milhões de anos atrás teve início o processo de fragmentação do Gondwana. À medida que os continentes se afastavam, o magma basáltico ia preenchendo os espaços entre as placas, construindo assim o novo assoalho oceânico. Esse mesmo magma subia também pelas antigas fraturas da crosta, reabertas pelos movimentos tectônicos, espalhando-se em sucessivas camadas sobre as areais do deserto e formando um espesso pacote de rochas vulcânicas que constituem a Formação Serra Geral. Seguiram-se intensos processos de erosão, com o conseqüente preenchimento das bacias costeiras.

Na bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia afloram rochas sedimentares e vulcânicas que constituem a seqüência da borda leste da Bacia do Paraná e sedimentos inconsolidados que constituem a Planície Costeira ou formam depósitos aluviais atuais. O embasamento cristalino é composto de rochas granitoides tardi e pós-tectônicas.

Krebs (2004), em sua tese de doutorado apresenta um mapeamento geológico da bacia do rio Araranguá. Na sub-bacia do Rio Mãe Luzia encontram-se as seguintes unidades geológicas: Formações Rio Bonito, Palermo, Irati, Estrada Nova, Rio do Rasto, Botucatu e Serra Geral, e os depósitos recentes de leques aluviais, aluvionares e de retrabalhamento fluvial, praias marinhos e eólicos e fluviolagunares.

## **2.3 Vegetação**

A região sul de Santa Catarina foi, originalmente, coberta pela Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica de Encosta). Os primeiros colonizadores europeus iniciaram a derrubada da floresta para implantarem suas casas e benfeitorias e para estabelecerem áreas de cultivo de subsistência e para a criação de gado, ocasionando um desmatamento acelerado. Abriram-se estradas, novas áreas agropecuárias, e passou-se a utilizar progressivamente maiores quantidades de lenha com fins energéticos nas estufas de fumo, olarias, cerâmicas e outras indústrias (Krebs, 2004). A mineração, também, contribui intensamente para o

processo de degradação ambiental. A lavra, a disposição de rejeitos, o transporte do minério até seu destino final, o beneficiamento e seu uso final, em termoeletricas, siderúrgicas, contribuem para esse quadro de degradação, poluindo recursos hídricos e desmatando grandes áreas.

Com isso os remanescentes da floresta nativa estão localizados quase exclusivamente nas escarpas da Serra Geral, devido às condições de pouca acessibilidade e inaptidão agrícola. Ocorrem ainda em pequenos nichos ao longo da bacia, distribuídos nas propriedades rurais (Krebs, 2004).

## **2.4 Rede Hidrográfica**

Os recursos hídricos superficiais da bacia encontram-se degradados pela DAM. Os afluentes do rio Mãe Luzia mais impactados pela mineração são: rio Dória, rio Fiorita e rio Sangão (margem esquerda), e rio do Pio (margem direita).

Existem muitos conflitos de uso da água na bacia do rio Mãe Luzia, o principal deles é em relação à qualidade da água devido às atividades de lavra e beneficiamento de carvão. O curso d'água do rio Mãe Luzia apresenta diversas áreas agricultáveis que correspondem às suas planícies aluviais. O conflito reside no fato de suas águas não apresentarem qualidade que permita seu uso na agricultura. O mesmo ocorre com os rios Fiorita e Sangão, que juntos correspondem às maiores cargas poluidoras afluentes do rio Mãe Luzia (Santa Catarina, 1997).

Outro conflito que ocorre na bacia está relacionado à disponibilidade de água, principalmente em relação à irrigação das lavouras de cultivo de arroz. Isso ocorre nos rios São Bento, do Cedro e Manoel Alves (Santa Catarina, 1997).

A Figura 2.4 mostra a rede hidrográfica principal da bacia do rio Mãe Luzia e, também, ilustra onde ocorrem os conflitos citados anteriormente.

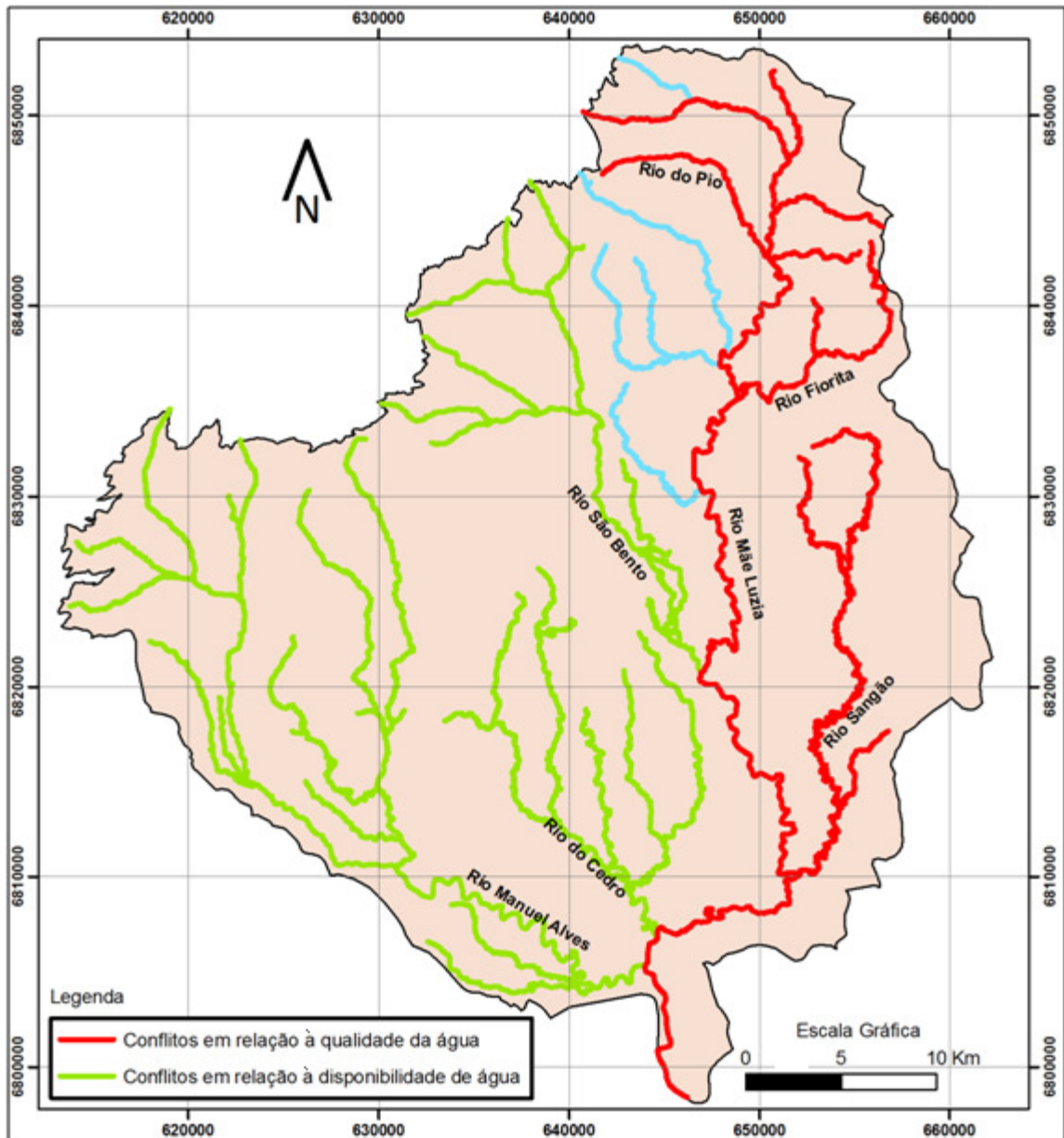


Figura 2.4 - Área de conflitos na bacia do rio Mãe Luzia (adaptado: Santa Catarina, 2007).



### **3. Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo são revisados alguns conceitos para a compreensão da dissertação. Foram abordados assuntos como o histórico da mineração em Santa Catarina e sua importância econômica, os problemas ambientais da indústria carbonífera, águas subterrâneas, vulnerabilidade natural de aquíferos, avaliação de risco ambiental e Sistema de Informação Geográfica (SIG).

#### **3.1 Mineração de carvão em Santa Catarina**

O carvão mineral tem uma grande importância histórica mundial. Foi ele que impulsionou a revolução industrial na Inglaterra e mais tarde para o resto da Europa, com a criação do barco a vapor e a locomotiva a vapor. O carvão foi decisivo no processo de industrialização, movimentando máquinas produtoras de bem e de transporte.

A primeira tentativa de explorar economicamente o carvão de Santa Catarina foi em 1861, quando o D. Pedro II autorizou a concessão para explorar carvão no município Lauro Muller (Belolli, 2002).

Antes disso, os primeiros a encontrarem carvão mineral na região sul de Santa Catarina, foram os tropeiros, que conduziam as tropas de gado e cavalo do Rio Grande do Sul até Sorocaba, em São Paulo. Antes deles, os índios da região já conheciam a “pedra que queima”. Mas foram os tropeiros, que conheciam o seu valor econômico e levaram a notícia da descoberta adiante chegando até a corte onde despertou interesse.

As primeiras notícias dessa descoberta datam do fim do século XVIII, quando os tropeiros levaram a novidade à cidade histórica de Laguna, onde as tropas eram embarcadas.

Os primeiros estudos da qualidade do carvão e os afloramentos carboníferos foram conduzidos pelo naturalista alemão Friedrich Sellow, ao estudar a área em 1827. O relatório produzido gerou interesse do império, tanto que em 1833 continuou investindo em pesquisas. O relatório de Alexandre Davidson, que conduziu essa segunda pesquisa, afirmava que as jazidas eram extensas e de boa qualidade.

Após muitos anos e insucessos na tentativa de exploração do carvão mineral no sul do estado, em 1861, o diplomata e político baiano Felisberto Caldeira Brandt Pontes, o Visconde de Barbacena, se propôs a realizar a exploração.

Em 1874, o Visconde de Barbacena foi autorizado a construir a Estrada de Ferro Dona Teresa Cristina, ligando Imbituba a Lauro Muller, região da mina. Em 1884 a construção foi concluída e em 1886 aconteceu o primeiro carregamento para o posto de Imbituba. Mas devido ao grande prejuízo, a empresa paralisou imediatamente as atividades (Belolli, 2002).

Um grande passo para exploração do carvão mineral nacional foi dado quando da lei nº 1.617, de 30 de dezembro de 1906, que promovia o uso do produto nacional na Estrada de Ferro Central do Brasil. Antes da Primeira Guerra Mundial de 1914, o carvão importado era preferido em relação à exploração do produto nacional. Esse panorama só mudou quando o produto importado estava em falta.

A escassez do produto durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e a Segunda Guerra Mundial (1938-1945) deu origem à indústria carbonífera nacional, de grande importância regional (Scheibe, 2002).

Durante a Segunda Guerra Mundial, foi dado um grande passo para o desenvolvimento da indústria carbonífera, com a criação da CSN – Companhia Siderúrgica Nacional, em 11 de dezembro de 1941. No mesmo ano foi dado início a construção do lavador de Capivari, para fornecer matéria prima qualificada para a CSN (Martins, 2005).

Outro fator que favoreceu o complexo carbonífero catarinense foi a implantação do Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda no final da década de 50. Devido às grandes quantidades de carvão vapor, que era separado do carvão metalúrgico, enviado para a CSN, acumulado a céu aberto na comunidade de Capivari, a região tornou-se *“um pólo natural para a implementação de um grande complexo termoelétrico visando à geração de energia a partir do aproveitamento do carvão como matéria prima”* (Farias, 2004 *apud* Martins, 2005). Até os dias de hoje o Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda tem grande importância estratégica na política energética brasileira.

Durante as décadas de 50 e 60, o consumo de carvão foi sustentado por leis de incentivo federal que forçavam as siderúrgicas a consumir 20% do carvão

nacional, apesar de o produto brasileiro ser de pior qualidade e com preço mais elevado em comparação com o produto importado (Villela, 1989).

A partir da metade da década de 70, houve a mecanização dos processos de lavras, que se manteve até 1985, gerando um pico de crescimento. Mas após esse ano, o carvão mineral entra em crise, com o governo federal cortando os subsídios para atividade em 1988, desarticulando o sistema produtivo (Costa, 2000)

Durante o governo Collor, em 1990, as siderúrgicas ficaram desobrigadas a comprar carvão metalúrgico nacional, liberando assim a compra do carvão importado de melhor qualidade. A produção nacional teve uma considerável queda. Com o fim do mercado para o carvão metalúrgico nacional, o lavador de Capivari foi desativado (DNPM, 1996 *apud* Costa, 2000). A queda na produção do carvão catarinense deixou mais de 10 mil trabalhadores sem emprego (Santos, 1995).

A produção foi pouco a pouco se restabelecendo, de 3.547.697 toneladas, no auge da crise em 1996, para a produção dos 6.278.327 toneladas, em 2010 (SIECESC, 2011).

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2006), as empresas do setor carbonífero de Santa Catarina figuram entre as maiores empresas do setor mineral brasileiro. Estão entre as 100 maiores: Carbonífera Criciúma S.A., Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda., Carbonífera Metropolitana S.A., Carbonífera Catarinense Ltda., Carbonífera Belluno Ltda., Cooperativa De Extração de Carvão Mineral dos Trabalhadores de Criciúma. Essas empresas juntas totalizam 1,11% de participação no valor total da produção da indústria mineral brasileira comercializada. A maior empresa do setor no Brasil é a Companhia Vale do Rio Doce, com participação de 40,24 %. Se considerarmos apenas a produção comercializada em Santa Catarina, as empresas do setor carbonífero respondem por 57,13% do valor total.

A produção de minério bruto é voltada totalmente para o mercado interno do estado; do produto beneficiado, a grande maioria, também, fica no estado (97,48%), o restante da produção é destinada aos mercados de São Paulo, Bahia e Rio Grande do Sul. A distribuição de consumo mostra o grande uso do carvão mineral no setor energético, voltado para termoelétricas. O carvão catarinense é utilizado, em menor escala, nos setores de cerâmicas vermelhas, metalurgia de não-ferrosos, cerâmica branca, pisos e revestimentos, indústria de açúcar e corretivo de solos.

## 3.2 Mineração e o Meio Ambiente

Segundo Aguiar *et al.* (2008), podemos afirmar que certas características do carvão, da lavra ao beneficiamento, são determinantes para os aspectos ambientais relacionado à sua mineração. São elas:

- i)* Características mineralógicas do carvão lavrado e do material estéril associado;
- ii)* Os métodos de lavra e beneficiamento empregados;
- iii)* As condições climáticas, hidrológicas e hidrogeológicas da região;
- iv)* Características da vizinhança da propriedade mineira (ocorrência de habitações e/ou ecossistemas protegidos etc.).

Os principais prejuízos ambientais trazidos pela mineração, segundo Moriwaki (2005), são:

- i)* A solubilização de diversos metais pesados, como Fe, Cu pela drenagem ácida, que correm diretamente para riachos, rios e campos de cultivo, localizados nas imediações, ocasionando danos ambientais e danos à saúde da população;
- ii)* Rebaixamento da superfície do solo, podendo causar subsidência de instalações localizadas sobre as minas;
- iii)* Esgotamento da água subterrânea das imediações;
- iv)* Poluição sonora;
- v)* Influência causada por gases e fuligem devida à poeira emitida pela escavação e extração;
- vi)* Outros impactos ambientais como a derrubada de florestas para a operação, para depósitos de rejeitos etc.

Após o fim das operações de lavra na mina, é gerado um grande passivo ambiental, que necessita ser acompanhado e mitigado. Entre os principais passivos ambientais estão:

- i)* Os depósitos de rejeito, contendo sulfetos (principalmente pirita);
- ii)* Topografia alterada;
- iii)* Solo estéril;
- iv)* Erosão;

v) Poços de ventilação e bocas de minas abertas, um grande perigo para população.

Na Tabela 3.1 estão listados os principais impactos ambientais da mineração do carvão (Aguiar *et al.*, 2008).

Tabela 3.1 - Principais impactos ambientais causados pela mineração de carvão.

(Fonte: Aguilar *et al.*, 2008)

Principais Impactos Ambientais da Mineração de Carvão	
Contaminação da qualidade do ar por poeiras, óxidos e gases	Instabilidade do solo pela ocorrência de subsidência
Alteração do relevo, topografia e paisagismo	Vibração do solo
Aumento do ruído nas imediações da área da mina	Modificação da densidade da fauna
Modificação da densidade da flora	Perturbação dos moradores e transeuntes
Erosão e surgência de voçorocas	Contaminação da água pela drenagem ácida de mina
Contaminação das águas por sólidos sedimentáveis e em suspensão	Modificação do regime de vazão das águas pelas atividades de exploração do carvão

No gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos e superficiais, a geração de Drenagem Ácida de Mina (DAM) é o principal aspecto ambiental a ser considerado. A DAM é uma fonte difusa de poluição que pode comprometer seriamente a qualidade dos recursos hídricos da região de sua ocorrência, não ficando, o impacto, restringido somente às áreas de mineração. Pode ser responsável também pela poluição e degradação de uma bacia hidrográfica completa, como o caso da bacia hidrográfica dos rios Tinto e Odiel, em Huelvam, no sudoeste da Espanha (Nieto *et al.*, 2006).

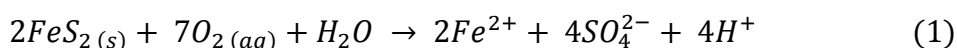
A DAM, também, não se restringe ao tempo de operação da mina, pois a intensidade e a duração do evento de geração de DAM dependem do tipo de depósito geológico, mineralogia, hidrologia e do intemperismo a que os minerais são expostos, podendo durar séculos até que a fonte de enxofre seja totalmente consumida (Ciminelli *et al.*, 2006).

Quando lançada diretamente nos cursos d'água, causam degradação dos recursos hídricos, como acontece em grande parte das bacias hidrográficas da Região Carbonífera Catarinense. A contaminação da água pela DAM causa sérias alterações na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. A acidificação das águas pode levar ao desaparecimento de peixes, crustáceos e demais populações do meio (Polz, 2008).

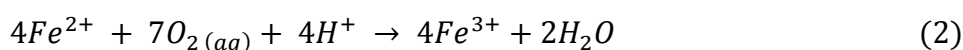
A DAM é um sério problema de poluição ambiental causado, principalmente, pela oxidação da pirita ( $\text{FeS}_2$ ), e de outros minerais sulfatados presentes. A solução gerada é extremamente acidificada (pH inferior a 2,0) com elevado teor de sulfato (Ubaldo e Souza, 2008). Com o decaimento do pH, a mobilidade de elementos traços tende a aumentar. Com isso é gerado um efluente caracterizado pela elevada acidez e com uma grande concentração de sulfatos e de metais como ferro, cobre, cobalto, manganês, chumbo, zinco, etc. (Nieto *et al*, 2006). Metais pesados ocorrem naturalmente na natureza e muitos deles são essenciais à vida, mas quando presentes em elevadas concentrações são tóxicos ao meio aquático e à vida humana (Ciminelli *et al*, 2006).

As reações envolvendo a oxidação da pirita são expressas nas equações a seguir (Kontopoulos, 1998; Nieto *et al*, 2006; Silva *et al*, 2010):

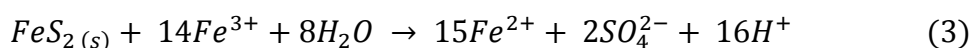
- Oxidação da pirita pelo oxigênio na presença de águas:



- Oxidação do ferro ferroso pelo oxigênio:



- Oxidação da pirita pelo ferro férrico:



A geração da DAM envolve reações diretas (equação (1)), quando a pirita é oxidada somente pelo  $\text{O}_2$ , e indiretas (equação (3)), quando o  $\text{Fe}^{2+}$  produzido no mecanismo direto oxida para  $\text{Fe}^{3+}$  (equação (2)) oxida a pirita, gerando novamente o  $\text{Fe}^{2+}$  que será oxidado novamente para  $\text{Fe}^{3+}$ , estando disponível para oxidar mais pirita. A oxidação da pirita ainda pode ser catalisada por várias espécies de bactérias oxidantes de ferro e enxofre. A bactéria mais importante é a bactéria *Thiobacillus Ferrooxidans* (Ubaldo e Souza, 2008)

Na região sul do estado de Santa Catarina, onde fica a bacia carbonífera catarinense, a preocupação ambiental surgiu quando o governo federal, por base de decreto federal n° 085206/80, classificou a região carbonífera de Santa Catarina como a 14ª área crítica nacional para efeito de controle ambiental.

Com o passar dos anos, do constante descaso com o meio ambiente, em 1982 o governo federal estabeleceu algumas obrigações para as carboníferas, como a preservação do meio ambiente, e “considerando a necessidade de conciliar a

expansão da produção e uso do carvão mineral com a preservação e integridade do meio ambiente” é publicada a portaria nº 917, de 06 de julho de 1982,

Algumas das obrigações estabelecidas foram às seguintes:

a) tratamento dos efluentes líquidos originados na drenagem da mina e do beneficiamento do carvão;

b) transporte, manuseio, disposição final e/ou parcial de subprodutos, produtos ou resíduos sólidos, originados da lavra ou do beneficiamento do carvão;

c) da recuperação ambiental das áreas degradadas pela mineração.

Após a publicação dessa portaria houve alguma mobilização das empresas produtoras com a contratação das Empresas IESA - Internacional de Engenharia S/A e Zeta Engenharia S/A para elaborar o Projeto Preservação do Meio Ambiente, mas nada de concreto foi implementado.

Com isso no dia 15 de abril de 1993 o Ministério Público Federal propõe a ação civil pública nº 93.8000833-4, devido à intensa e descontrolada exploração do carvão que resultou na degradação ambiental em toda a região, contra diversas empresas do setor carbonífero, o Estado de Santa Catarina e a União, que ficaram com a responsabilidade de recuperar toda a área degradada.

Na ação proposta foi pedido que os réus projetassem e executassem a recuperação da região da Bacia Carbonífera Catarinense, pagar multas e indenizações às populações atingidas pela atividade no decorrer dos anos de exploração de carvão feito pelas mineradoras nos municípios etc.

A sentença da Ação Civil Pública só saiu em 2000 com a condenação das mineradoras e da União a repararem os danos ambientais decorrentes da mineração de carvão na Bacia Carbonífera Catarinense.

Mas isso não ocorreu, as carboníferas não se empenharam para concretizar as mudanças necessárias para recuperar as áreas degradadas e prevenir novas degradações.

Com isso, em 2005, foi firmado um Termo de Ajuste de Conduta (TAC), entre a FATMA - Fundação do Meio Ambiente, e as mineradoras de carvão que estavam operando em desacordo com a lei e normas técnicas. Esse TAC, além de outras coisas, exigia das mineradoras:

- a) Implantar Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) em todas as unidades de operação;
- b) Apresentar Licença Ambiental de Operação (LAO) num prazo de 12 meses, sob pena de paralisação/interdição das atividades;
- c) Participar de audiências públicas informativas;
- d) Apresentar Plano de Recuperação de Área Degradada etc.

Assim a Ação Civil Pública tentou controlar o passivo ambiental deixado pelas carboníferas, uma área de aproximadamente 6.000 ha, e o TAC controlando as minerações em atividades.

Em 2008 um grupo de técnicos de diversas áreas do governo, como o DNPM, a FATMA e o Ministério Público Federal, por meio de um grupo multidisciplinar, criaram um documento chamado “Critérios para recuperação ou reabilitação de áreas degradadas pela mineração de carvão” com diretrizes a serem seguidas nas recuperações de áreas, na elaboração de PRADS - Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas. Esse documento deve ser seguido pelas empresas responsáveis pelo passivo ambiental da região carbonífera.

### **3.3 Águas Subterrâneas**

A superfície terrestre é coberta por 75% de água sendo que menos de 1% é adequada para o uso humano e destas, mais de 95% está armazenada sob forma de água subterrânea (Fetter *apud* Marquezan, 2008). O termo “água” refere-se, regra geral, ao elemento natural, desvinculado de qualquer uso ou utilização. Por sua vez, o termo “recurso hídrico” é a consideração da água como bem econômico, passível de utilização com o tal fim (Rebouças, 2006). Mas toda a água na terra não é, necessariamente, um recurso hídrico, na medida em que seu uso ou utilização nem sempre tem viabilidade econômica.

A água possui propriedades físicas e químicas que determinam a existência de Vida e é um recurso imprescindível ao desenvolvimento de várias atividades socioeconômicas. O comportamento natural das águas quanto suas ocorrências, transformações e relações com a vida humana é bem caracterizado através do Ciclo Hidrológico, representado na Figura 3.1.



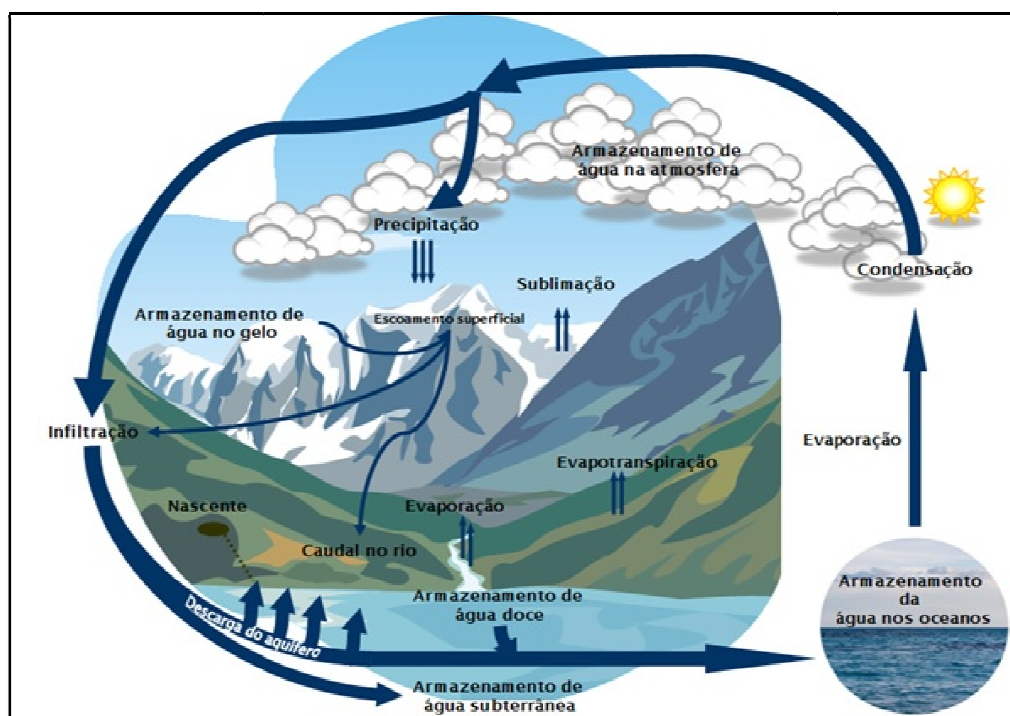


Figura 3.1 - Ciclo Hidrológico.

Para melhor compreensão, Villela e Mattos (1975) descrevem o Ciclo Hidrológico como tendo início com a evaporação da água dos oceanos. O vapor resultante é transportado por massas de ar que, sob determinadas condições, condensa formando nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. A maior parte da precipitação que ocorre sobre a terra fica temporariamente retida no solo e volta para atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Uma parte escoam superficialmente no solo, ou através do solo para os rios, enquanto outra parte, penetrando profundamente no solo, vai suprir o lençol d'água subterrâneo.

Efetivamente, uma fração da água que infiltra nas superfícies emersas vai constituir a umidade do solo. O excedente de água infiltrada no solo percola em profundidade, alimentando a umidade do subsolo não-saturado. O solo e subsolo não-saturados são sede de processos de filtração e biogeoquímicos de interação água/rocha que proporciona a autodepuração da parcela da água que percola mais profundamente e vai alimentar a sua zona saturada. A água subterrânea da zona saturada constitui o manancial propriamente dito, alvo dos estudos hidrogeológicos tradicionais (Rebouças, 2006).

A resolução do CONAMA nº396/2008 define água subterrânea como “águas que ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo” e aquífero como “corpo

hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos” (CONAMA, 2006). Para Linsley, citado por Villela e Mattos (1975), aquífero é a formação geológica que contém água e esta pode mover-se em quantidades suficientes para permitir um aproveitamento econômico. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem a seguinte definição “formação ou grupo de formações geológicas portadoras e condutoras de água subterrânea” (ABNT, 2006).

As águas subterrâneas representam a parcela da hidrosfera que ocorre no subsolo. Segundo Rebouças (2006) a água subterrânea tem 3 origens principais:

*i)* Meteórica – são normalmente recarregadas pela infiltração de uma fração das precipitações. As águas subterrâneas dessa origem são as mais importantes, pois constituem 97% do volume de água doce dos continentes;

*ii)* Conatas – estão retidas nos sedimentos desde a época de formação dos depósitos, são também chamadas de “águas de formação”. Em consequência, tem altos teores salinos, decorrentes dos paleoambientes marinhos de formação dos depósitos;

*iii)* Juvenil – água gerada pelos processos magmáticos da Terra.

Os fatores geológicos, a quantidade e o regime de ocorrência das precipitações são determinantes para a ocorrência das águas subterrâneas em uma área. Os fatores geológicos regulam as condições de ocorrência (aquífero livre, confinado ou semi-confinado), as características hidrodinâmicas das rochas aquíferas da área, a extensão, espessuras e profundidades das camadas aquíferas. A quantidade e o regime de ocorrência das precipitações determinam as taxas e processos de recarga.

A magnitude da recarga depende das condições de infiltrabilidade do solo e de suas relações de proporcionalidade com a intensidade das chuvas. A infiltrabilidade é função da permeabilidade do solo, relevo, cobertura vegetal, uso e ocupação do solo, entre outros fatores. Regiões planas bem arborizadas tendem a ter taxas de recarga maiores. Quando a intensidade da precipitação for superior à permeabilidade do solo a recarga será fraca, predominando o escoamento superficial, provocando enxurradas, enchentes e induzindo intensivos processos de

erosão. Mas quando a intensidade das chuvas é muito menor que a permeabilidade, poderá ocorrer uma abundante infiltração (Rebouças, 2006).

O gerenciamento ambiental envolvendo a qualidade da água subterrânea deve considerar a inter-relação com as águas superficiais. Os contaminantes levados pelos rios podem comprometer a qualidade das águas subterrâneas, e quando contaminadas, as águas subterrâneas podem poluir as águas superficiais em áreas de descarga do aquífero. Desse modo, fica evidente a necessidade da proteção integrada das águas superficiais e subterrâneas.

No gerenciamento integrado dos recursos hídricos, segundo Rebouças (2006), os aquíferos podem desempenhar várias funções, como:

*i)* Função produção – função mais tradicional de produção de água para consumo humano. Estima-se que mais de 50% da população mundial consome exclusivamente água subterrânea;

*ii)* Função ambiental – A percepção de que os processos de degradação da qualidade da água dos rios e lagos também podem atingir o manancial subterrâneo é relativamente recente, década de 1970 nos EUA. Com isso nos anos 80, desenvolveu-se uma preocupação sobre a qualidade das águas subterrâneas, onde o recurso passou a ter qualidade suspeita. Mas atualmente os fatores que podem afetar a qualidade da água subterrânea já começam a ser tratados nas suas devidas dimensões;

*iii)* Função transporte – o aquífero é utilizado para transportar água entre zonas de recarga artificial ou natural e áreas de extração excessiva;

*iv)* Função estratégica – gerenciamento integrado mediante práticas de recarga artificial do aquífero para utilização em períodos de escassez relativa, situações de emergência e picos sazonais de demanda;

*v)* Função filtro – utilização da capacidade filtrante e depuração natural do maciço permeável;

*vi)* Função energética – utilização da água subterrânea aquecida pelo gradiente geotermal, como fonte de energia elétrica ou termal;

*vii)* Função estocagem e regularização – utilização do aquífero para estocar excedentes de água de estações de tratamento em período de baixa demanda, que ocorrem durante as enchentes dos rios e reuso de efluentes domésticos e industriais tratados.

Mesmo em áreas metropolitanas sua utilização vem crescendo como recurso principal para abastecimento de loteamentos situados fora do alcance da rede de distribuição, ou como para se livrar de problemas de racionamento, rodízios e aumento da conta de água (Rebouças, 2006).

As águas subterrâneas possuem um baixo custo relativo de exploração e apresentam normalmente uma excelente qualidade natural, desse modo, vem sendo exploradas em grande escala para o fornecimento de água potável em muitas cidades, mesmo em regiões úmidas. A água subterrânea é também amplamente utilizada em áreas rurais normalmente por ser mais barata e uma fonte segura de água potável (Hirata e Foster, 1991).

Rebouças (2006) apresenta outros fatores que explicam a crescente importância das águas subterrâneas como fonte de abastecimento:

- i)* Notável capacidade de armazenamento, qualidade e quantidade não são afetadas pela variabilidade sazonal;
- ii)* Potabilidade natural e a maior proteção da qualidade dispensam os investimentos com estações de tratamento;
- iii)* A forma extensiva de ocorrência das águas subterrâneas resulta na possibilidade de captação no local onde ocorrem as demandas, dispensando estações de recalque e adutoras;
- iv)* Execução de obras de captação mais rápida em comparação com captação em lagos e rios;
- v)* Investimentos relativamente pequenos;
- vi)* Não sofrem processos de assoreamento e nem perdem grandes volumes de água por evaporação.

A principal causa da degradação da qualidade das águas subterrâneas é o resultado das atividades humanas que deixam um passivo de contaminação no ambiente (Marquezan, 2008), um exemplo que pode ser citado é o passivo ambiental deixado pela extração de carvão mineral no sul do estado de Santa Catarina. Contaminações por causas naturais também ocorrem, mas são muito raras e localizadas.

Considerando a necessidade de se promover a proteção da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que poluídas ou contaminadas, sua remediação é lenta e onerosa, o CONAMA publicou a resolução nº 393/2008, que dispõe sobre a

classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento, prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas (CONAMA, 2006).

As principais fontes potenciais de contaminação do manancial subterrâneo são a construção de poços de forma incorreta, falta de saneamento, resíduos sólidos, o uso de insumos agrícolas, indústrias, postos de combustíveis, cemitérios e mineração (ANA, 2007).

A construção de poços está regulamentada pelas normas NBR 12.244/2006 e NBR 12.212/2006, normas técnicas para a construção de poços e o projeto de poço para a captação com especificações construtivas, planilhas orçamentárias e croquis construtivos (ABNT, 2006). Os principais fatores que podem representar riscos de contaminação na construção de poços são a ausência de laje de proteção sanitária e altura adequada da boca do poço, proximidade de pontos potencialmente contaminados, não desinfecção após a construção e não cimentação de espaço anelar entre o furo e o poço facilitando a entrada de água superficial (ANA, 2007).

A falta de saneamento representa um risco às águas subterrâneas por meio da infiltração por fossas negras, do escoamento superficial, que acaba infiltrando no solo, e pelo vazamento de redes de esgoto. Segundo o diagnóstico dos serviços de água e esgotos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de 2008 (SNSA, 2010) o total de esgoto coletado no Brasil é de 43,2%, considerando apenas as áreas urbanas o índice sobe para 50,6%. Em relação ao tratamento dos esgotos na área urbana o índice médio é de 34,6%.

O chorume, líquido negro formado por componentes inorgânicos e orgânicos decorrente do processo de decomposição dos resíduos sólidos, apresenta altas concentrações de matéria orgânica e metais pesados. Se infiltrado no solo, pode atingir a água subterrânea gerando contaminação. Portanto, a destinação correta dos resíduos produzidos é uma questão crítica sob o ponto de vista ambiental (ANA, 2007).

O uso de fertilizantes, herbicidas e pesticidas nas atividades agrícolas também é outro fator de contaminação dos recursos hídricos. Dentre os fertilizantes o principal contaminante das águas subterrâneas é o nitrogênio na forma de nitrato (Krebs, 2004). Este contaminante representa uma alta mobilidade na água subterrânea, podendo contaminar extensas áreas (ANA, 2007).

O manejo de produtos tóxicos contaminantes, utilizados nas atividades industriais, sem a adoção de normas adequadas e a ocorrência de acidentes e vazamentos nos processos produtivos representa um sério risco para o meio ambiente e a saúde humana. Os contaminantes produzidos pelas indústrias atingem o solo e os rios, e, posteriormente, podem atingir e contaminar as águas subterrâneas.

Nos postos de gasolina, a principal forma de contaminação do subsolo por derivados de petróleo é representada pelo vazamento dos tanques de armazenamento de combustíveis. Esses vazamentos estão associados a problemas de instalação e, principalmente à corrosão dos tanques, normalmente construídos com aço e que apresentam uma vida útil média de 20 anos. Nos Estados Unidos, o vazamento de tanques de combustível é considerado como a principal fonte de contaminação da água subterrânea (ANA, 2007). No Brasil não é feito um acompanhamento da questão ambiental relacionada a esses vazamentos, mas a experiência internacional indica que o problema deve ser significativo.

A presença de microorganismos existentes nos corpos em decomposição sepultados e a alteração da qualidade química das águas são os principais problemas de contaminação de água subterrânea nos cemitérios. Existe o risco de doenças de vinculação hídrica que causam fortes distúrbios intestinais, como vômitos, cólicas e diarreias (ANA, 2007).

A mineração é amplamente distribuída no território nacional e explora os mais diversos minerais. Em áreas com operações de mineração e beneficiamento do carvão mineral, como a bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia, poluição hídrica causada pela drenagem ácida é provavelmente o impacto mais significativo. Essa poluição decorre da infiltração da água da chuva sobre os rejeitos gerados nas atividades de lavra e beneficiamento, alcançando os corpos hídricos superficiais e subterrâneos (Krebs, 2004).

### **3.4 Vulnerabilidade natural de aquíferos**

O conceito de vulnerabilidade de aquíferos é utilizado, segundo Foster e Hirata (1987), para representar as características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser afetado adversamente por uma carga imposta de

contaminantes. Sendo que a vulnerabilidade do aquífero é uma função primária e lógica de:

- i) Inacessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes;
- ii) A capacidade de atenuação dos estratos acima da zona não saturada, como resultado de sua retenção física, e reações químicas com o contaminante.

Estes dois componentes da vulnerabilidade de aquífero interagem com os seguintes componentes de carga contaminante no subsolo correspondente:

- i) O modo de dissipação do contaminante no subsolo, e, em particular, a magnitude de qualquer carga hidráulica associada;
- ii) A classe do contaminante em termos de mobilidade e persistência.

Esta interação irá determinar o tempo de residência na zona não saturada antes que o contaminante possa alcançar o aquífero e a probabilidade de atenuação, retenção ou eliminação antes de atingir a zona saturada (Foster e Hirata, 1987).

Rahman (2008) cita definições de outros autores sobre vulnerabilidade de aquífero. Vrba e Zaporotec (1994) descrevem vulnerabilidade como um conceito que representa as propriedades intrínsecas dos sistemas aquíferos em função da sua sensibilidade às atividades humanas e naturais. National Research Council (1993) define como a tendência ou a probabilidade de que contaminantes cheguem a uma posição específica no sistema de águas subterrâneas após a introdução de algum lugar acima do aquífero superior.

A avaliação da vulnerabilidade tem sido reconhecida por sua capacidade de delinear áreas mais prováveis de se tornarem contaminadas, como resultado de atividades antrópicas na superfície do solo. Uma vez identificadas, estas áreas podem ser alvos de um cuidadoso plano para o uso do solo, monitoramento intensivo, e para a prevenção da contaminação das águas subterrâneas (Babiker *et al.*, 2005). Aquíferos considerados menos vulneráveis em termos gerais, tendem a ser mais difíceis para limpar ou restaurar, por isso a necessidade de métodos eficientes para a proteção dos recursos de água subterrânea de contaminações futuras.

Os métodos existentes para avaliar e mapear a vulnerabilidade da água subterrânea são normalmente destinados a fornecer uma avaliação comparativa das

áreas relacionadas ao potencial de poluição da água subterrânea (Nobre *et al.*, 2007). Estes métodos podem ser divididos em 3 categorias (National Research Council, 1993, *apud* Nobre *et al.*, 2007):

i) Métodos de índices e sobreposição – Os métodos de índice e sobreposição resultam da interseção de mapas em uma base regional e a interpretação qualitativa de dados pela indexação de parâmetros e atribuindo pesos apropriados. Os métodos mais conhecidos são o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster e Hirata, 1987).

ii) Métodos baseados em processos que aplicam modelos determinísticos baseados em processos físicos – utiliza modelos matemáticos para simular fenômenos complexos de fluxo e transporte de contaminantes no subsolo. Este método requer um banco de dados com uma boa cobertura de dados hidrogeológicos e geoquímicos.

iii) Modelos estatísticos – dependem de um extenso banco de dados e foram criados para identificar poluentes prioritários para serem utilizados no monitoramento de projetos de remediação de solos e águas subterrâneas.

Entre os métodos para avaliar e mapear a vulnerabilidade os que mais se destacam são o DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster e Hirata, 1987).

A metodologia DRASTIC, desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – *Environmental Protection Agency (US-EPA)*, permite que o potencial de poluição de água subterrânea de qualquer cenário hidrogeológico seja avaliado sistematicamente em qualquer lugar. Fornece ao usuário uma medida de vulnerabilidade relativa da água subterrânea para poluição, e pode ser usada como um de vários critérios para localização de qualquer tipo de empreendimentos, nunca como o único critério (Aller *et al.*, 1987). A sigla DRASTIC representa as iniciais de cada fator utilizado na metodologia.

Cada fator DRASTIC foi avaliado para determinar sua importância relativa no sistema. Os pesos relativos dos fatores variam de 1 a 5 (5 – mais significantes, 1 – menos significantes). Os fatores DRASTIC e seus respectivos pesos são:



- D – *Depth to water*: Profundidade do aquífero (P=5);
- R – *Recharge*: Recarga (P=4);
- A – *Aquifer media*: Meio geológico do aquífero (P=3);
- S – *Soil media*: Solo (P=2);
- T – *Topography (Slope)*: Topografia (declividade) (P=1);
- I – *Impact of the vadose zone media*: Impacto da zona vadosa (não saturada) (P=5);
- C – *Conductivity of the aquifer*: condutividade do aquífero (permeabilidade) (P=3).

E cada fator DRASTIC é ainda separado por valores, variando de 1 a 10, de acordo com sua variação em intervalos. Os fatores DRASTIC se relacionam entre si através de uma equação simples aplicada a cada unidade geográfica do estudo, gerando então o índice DRASTIC. Quanto maior o índice, maior a vulnerabilidade. O índice DRASTIC é determinado pela equação:

$$D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W = \text{Índice DRASTIC}$$

onde R é o valor para cada intervalo dos fatores e W é o peso relativo de cada fator.

A metodologia GOD destina-se ao primeiro passo na avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas, e destina-se também a priorizar, mas não substituir, ações sistemáticas de monitoramento e inspeção em campo. Esta metodologia consiste em combinar três parâmetros físicos e, assim, gerar um índice de vulnerabilidade natural para o aquífero. Esses parâmetros são:

G – *Groundwater Occurrence*: tipo de ocorrência da água subterrânea;

O – *Overall Litology of Aquiperm or Aquitard*: descrição da zona não saturada em termos de grau de consolidação e características litológicas;

D – *Depth to Groundwater Table*: profundidade do nível freático.

Embora utilizando poucos parâmetros, essas três características contêm, qualitativamente, os parâmetros essenciais para definir a vulnerabilidade de um aquífero quanto ao risco de contaminação (Camponogara, 2006).

A metodologia GOD foi utilizada no presente trabalho, e será abordada novamente no capítulo 4.5, referente à metodologia.

Prevenção é a chave para ajudar a garantir que práticas futuras não resultem em contaminação das águas subterrâneas, tornando importante o uso de ferramentas de planejamento e gestão para auxiliar o reconhecimento de áreas onde certas atividades representam um risco mais elevado (Aller *et al.*, 1987). Desse modo, o mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas funciona como uma ferramenta de visualização prática para tomada de decisão.

### **3.5 Avaliação de risco**

Avaliação de risco é um processo que avalia a probabilidade de um efeito adverso ocorrer ou que está ocorrendo como resultado a exposição de um ou mais estressores. É utilizada para avaliar e organizar sistematicamente dados, informações, hipóteses e incertezas, a fim de auxiliar o entendimento e a prever as relações entre estressores e efeitos ambientais de um modo que seja útil na tomada de decisão (USEPA, 1998).

Risco é um fator subjetivo, tendo diversas definições de autores. Segundo Australian/New Zeland Standard (2004) e McKensey (1997), risco pode ser definido como a chance de acontecer algo que terá um impacto sobre os objetivos da atividade, sendo medido em termos da combinação das conseqüências de um evento e sua probabilidade de ocorrer.

Para Aguiar *et al.*, (2008), o risco está associado à exposição do receptor ao perigo, a possibilidade de perigo, incerto, mas previsível, que ameaça de dano a pessoa, equipamentos, propriedade ou meio ambiente, sendo perigo *“a fonte potencial de dano pessoal, ambiental ou material”*

Outros autores definem risco como sendo *“a probabilidade de um efeito adverso sobre o homem ou o meio ambiente resultante de uma exposição de uma substância química ou mistura”* e perigo como *“o conjunto de propriedades intrínsecas de uma substância ou mistura que o torna capaz de causar efeitos adversos ao homem ou ao meio ambiente, quando um determinado nível de exposição ocorre”*, respectivamente (Van Leeuwen e Hermens, *apud* Lahr e Kooistra, 2010).

Risco ambiental é o produto entre a frequência de ocorrência de um evento indesejado (perigo) e as conseqüências ambientais caso este evento indesejado venha concretizar-se. Ocorrendo este perigo ambiental, teremos impacto ambiental, que é definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas (Aguilar *et al.*, 2008).

Gerenciamento de risco tem como objetivo a redução da probabilidade e do impacto de acidentes de todos os tipos. A avaliação de risco visa contribuir para uma gestão de risco eficiente, identificando quais riscos mais necessitam de redução e as opções para a realização desta redução.

A norma australiana AS-NZS 4360-2004 *Risk Management* (Australian/New Zealand Standard, 2004) e o manual de gestão de risco – MGM 1010 - *Risk Management Handbook For The Mining Industry* (McKensey, 1997) fornecem informações para auxiliar na gestão de risco. Segundo esses dois documentos, a gestão de risco envolve o estabelecimento de uma infra-estrutura adequada e a aplicação de um método lógico e sistemático de identificar, analisar, avaliar, tratar, monitorar e comunicar os riscos associados a qualquer atividade. As principais etapas para o processo de gerenciamento de risco são:

- i)* Estabelecimento dos critérios pelos quais os riscos serão avaliados e definição da estrutura de análise;
- ii)* Identificar os riscos;
- iii)* Analisar os riscos, determinar as conseqüências e probabilidade e, portanto, o nível de risco;
- iv)* Avaliar e priorizar os riscos, comparar com padrões pré-estabelecidos, critérios pré-estabelecidos;
- v)* Tratar os riscos, seleção e implementação de opções apropriadas para lidar com os riscos;
- vi)* Monitorar e revisar os riscos, correção de qualquer desvio dos padrões e critérios previamente estabelecidos.

A avaliação de risco compreende as etapas *i*, *ii*, *iii* e *iv*, como exemplificado na Figura 3.2 abaixo.

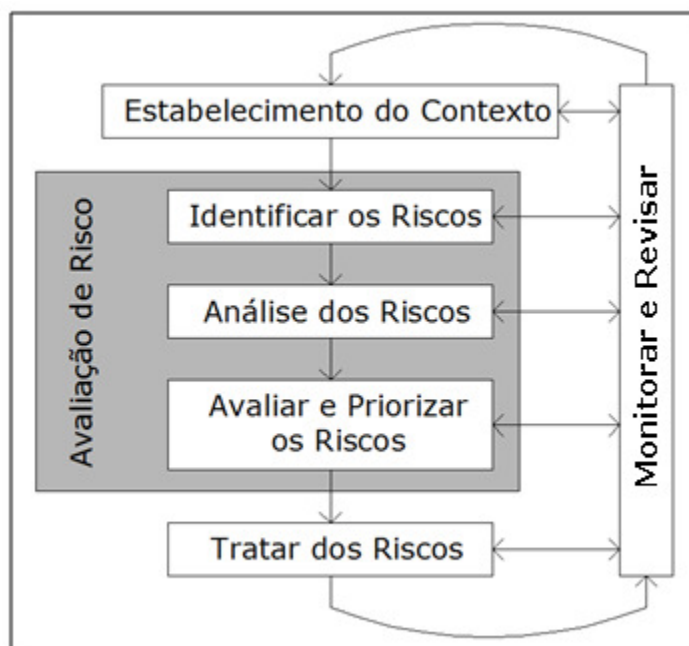


Figura 3.2 – Gerenciamento de risco (McKensey, 1997).

Uma avaliação de risco permite organizar e processar dados relativos a eventos indesejados, fazendo uma exaustiva identificação de fontes potenciais de perigo para prever cenários de acidente e avaliar o impacto potencial sobre o meio ambiental, homem e equipamentos, possibilitando uma antecipação ao fato ou adoção de medidas que atenuem os efeitos negativos da ocorrência do fato.

Tixier *et al* (2002), identificou mais de 60 metodologias de análise de risco, as quais podem conter até três fases principais:

- i) Uma etapa de identificação baseada na descrição das atividades, produtos e equipamentos perigosos;
- ii) Uma etapa de avaliação para determinar a quantificação do risco, através de uma abordagem determinística ou probabilística;
- iii) Uma etapa de hierarquização que tem o objetivo de ranquear os resultados obtidos através das fases anteriores, desse modo os riscos mais importantes podem ser resolvidos antes.

Uma etapa fundamental no gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos e planejamento ambiental é a avaliação de riscos esperados após a ocorrência de eventos naturais e antropogênicos. A identificação das áreas com maior risco de degradação dos aquíferos é condição essencial para o desenvolvimento de estratégias que visem à preservação dos recursos hídricos, priorizando a aplicação

de recursos técnicos e financeiros nos locais de maior interesse socioeconômico e ambiental (Krebs, 2004).

A presença humana na superfície pode modificar os mecanismos de recarga das unidades aquíferas, introduzindo novas variáveis no ambiente. Estabelece-se então a idéia de risco de influência negativa, devido a uma possível alteração qualitativa das águas durante o processo de recarga (Gomes *et al. apud* Matta *et al.*, 2007).

A avaliação de risco ambiental lida com os efeitos de substâncias perigosas que estão presentes no ambiente. Tradicionalmente, os resultados de uma avaliação de risco ambiental são apresentados de uma maneira não espacial. Mas isso está mudando rapidamente na última década. O desenvolvimento do Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem melhorado bastante a representação e a análise espacial de todos os tipos de informação e dados (Lahr e Kooistra, 2010).

A representação gráfica em forma de mapas de risco constitui uma poderosa ferramenta para comunicar o resultado da avaliação de risco ambiental, no auxílio na exploração espacial da exposição, das concentrações e dos efeitos poluentes, na rápida visualização das áreas e seus respectivos níveis de risco etc. Lahr e Kooistra (2010) mencionam os principais tipos de mapas de risco ambiental (Tabela 3.2).

Tabela 3.2– Principais mapas de riscos ambientais (Fonte: Lahr e Kooistra, 2010)

Categoria do Mapa	Características
Contaminação	Mostra a distribuição de concentrações medidas ou previstas (modeladas) em uma área.
Risco de Contaminação	Utiliza aspectos físicos e geográficos em uma área para mapear a probabilidade de contaminação.
Exposição	Combina níveis de contaminação com a distribuição geográfica dos receptores.
Perigo	Divide a concentração dos poluentes na área pelo padrão de qualidade da norma ambiental e mapeia os valores dessa proporção de exposição à toxicidade.
Risco de estressor único	Combina mapa de vulnerabilidade e mapas de estresse/pressões ambientais (por sobreposição)
Risco de estressores múltiplos	*Calcula o risco combinado de estressores simples utilizando o princípio do estresse acumulativo e algoritmos *Apresenta o resultado da análise de risco em mais dimensões.

Giupponi *et al.* (1999), realizaram um mapeamento de risco utilizando a sobreposição de *layers* da vulnerabilidade e impacto pela poluição difusa da agricultura da bacia hidrográfica da laguna de Veneza na Itália. Diferentes parâmetros para impacto e vulnerabilidade foram combinados em abordagem de critérios múltiplos para simular o risco em águas superficiais e subterrâneas.

Leal (1997), realizou um mapeamento da vulnerabilidade natural dos aquíferos e riscos de contaminação das águas subterrâneas da região metropolitana do Recife. O autor realizou interação e superposição dos mapas de vulnerabilidade dos aquíferos e de cargas contaminantes. Para a elaboração do mapa de cargas contaminantes foi feita a distribuição por áreas urbanas saneadas ou não, presença de indústrias, mais ou menos poluentes, cemitérios, lixões, postos de combustíveis, etc.: sendo considerada a carga alta, moderada, baixa e ausente, de acordo com as áreas. O resultado dessa interação foi a geração de um mapa de risco de contaminação, com riscos variando entre máximo, alto, moderado, baixo e mínimo. Matta *et al* (2007), realizou um estudo semelhante, mapeando a vulnerabilidade e o risco de contaminação do sistema de aquífero superior da região de Barcaena no Pára.

### **3.6 Sistema de Informações Geográficas**

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser definido como um sistema de apoio à decisão envolvendo a integração de dados georreferenciados em um ambiente para a solução de problemas, fornecendo a base técnica para estudar casos que são espacialmente distribuídos na natureza (Thapinta e Hudak, 2008). Para Quadros (2000), SIG é definido como um conjunto hardware + software projetado para permitir o gerenciamento de dados espaciais e possibilitar a realização de análises complexas, integrando diversos tipos de dados e criando bancos de dados georreferenciados. Esses sistemas possuem funções que possibilitam armazenar, recuperar, combinar, analisar e exibir dados espaciais e seus atributos em uma base georreferenciada (Quadros, 2000). Técnicas que utilizam o SIG fornecem uma eficiente ferramenta para análise, devido a sua capacidade de manipular grandes quantidades de dados espaciais.

O primeiro SIG foi o Sistema de Informação Geográfica do Canadá – CGIS (Canada Geographic Information System) em meados da década de 60. O CGIS foi desenvolvido para identificar os usos existentes e potenciais do solo. No final da década foi o Serviço de censo dos Estados Unidos – US Bureau of the Census – que passou a inovar. Foi criado um registro digital de todas as ruas dos Estados Unidos para referenciar e agregar automaticamente os dados do censo (Longley *et al*, 2005).

A tecnologia SIG tem tido um enorme impacto em todos os campos que gerenciam e analisam dados espacialmente distribuídos. O número de empresas e de organizações que utilizam a tecnologia SIG é atualmente elevado, principalmente pelos decrescentes custos de hardware e de software, por alternativas mais baratas de construção de banco de dados espaciais e pela incorporação, por parte dos SIGs, de novas e variadas funções de análise espacial (Quadros, 2000). A integração de dados em um ambiente SIG permite atingir os principais objetivos relacionados à atividade de manuseio e gerenciamento de dados espaciais como: organização, visualização, interpolação, combinação, análise e predição, auxiliando nos processos de tomadas de decisão em projetos com base em dados espacialmente referenciados.

O SIG é composto por uma variedade de elementos distintos. Os principais, segundo Eastman (1998), são:

*i)* Banco de dados espacial e de atributos: coleção de mapas e informações associadas na forma digital. Compreende dois elementos, banco de dados espacial descrevendo a geografia (forma e posição) das feições e um banco de atributos descrevendo as características ou qualidades dessas feições;

*ii)* Sistema de visualização cartográfica: permite a produzir mapas a partir dos elementos selecionados no banco de dados. A variação de possibilidades de produção cartográfica é bastante grande;

*iii)* Sistema de digitalização de mapas: conversão de mapas existentes em papel para uma forma digital, desenvolvendo mais o banco de dados. Pode ser utilizada uma mesa digitalizadora ou ainda um scanner;

*iv)* Sistema de gerenciamento de banco de dados: introdução e análise do banco de dados de atributos;

*v)* Sistema de análise geográfica: comparar feições diferentes baseadas em sua ocorrência espacial. Amplia o banco de dados pela adição de conhecimento

dos relacionamentos entre feições. Essa análise é realizada pelo processo de overlay, assim denominada por ser idêntica em caráter a sobreposição de mapas transparentes dos dois tipos de entidades;

vi) Sistema de processamento de imagens: permite tomar uma imagem de sensoriamento remoto (como imagens de satélite) e converte-la em dados interpretados na forma de mapas de acordo com vários de procedimentos de classificação;

vii) Sistema de análise estatística: oferece procedimentos estatísticos para descrever os dados espaciais.

Os fenômenos do mundo real, para serem manipulados em um SIG, precisam ser apresentados de maneira simbólica, simplificando a realidade (Quadros, 2000). Os arquivos para a apresentação dos dados em forma de mapas podem ser feitos, principalmente por meio de três tipos de formatos de dados espaciais: o formato raster, o formato vetorial e o formato ASCII.

Na representação do formato raster, as feições e os atributos que elas possuem são fundidos em arquivos de dados unificados. A área de estudo é subdividida em uma fina malha de células de grade, nas quais registramos a condição ou atributo da superfície terrestre naquele ponto (Eastman, 1998). O arquivo tipo raster pode ser representado como uma matriz retangular de células. As células (pixel) têm um tamanho constante e uma forma em geral quadrada e as coordenadas espaciais são dispostas em linhas e colunas (Quadros, 2000). A cada pixel é dado um valor numérico que pode representar tanto um identificador de uma feição quanto um código de um atributo qualitativo ou um valor de atributo quantitativo. Por exemplo, uma célula pode ter o valor “6” para indicar que ela pertence ao distrito 6 (identificador de feição), que é coberta pelo tipo de solo 6 (atributo qualitativo) ou que está 6 metros acima do nível do mar (valor de atributo quantitativo) (Eastman, 1998).

O modelo vetorial representa o mundo real baseado em pontos, linhas e polígonos. O mapa vetorial é vinculado ao um banco de dados onde cada feição tem uma identificação, descrição, informação etc. O modelo de dados vetorial é muito utilizado pra representar mapas, mas possui um caráter que dificulta operações de sobreposição, combinação e modelamento de planos de informação, pois suas unidades espaciais têm formas diferentes, aAo contrário do que ocorre com o



formato raster, onde diferentes tipos de dados podem ser sobrepostos sem necessidade de cálculos geométricos complexos (Quadros, 2000).

O modelo ASCII (American Standard Code for Information Interchange) refere-se aos dados organizados na forma de texto plano, sem qualquer tipo de formatação. Os arquivos têm normalmente extensão do tipo \*.dat, \*.txt, \*.dxf, entre outras (Quadros, 2000).

Abaixo, na Figura 3.3, é apresentado um exemplo de arquivos nos formatos vetorial e raster.

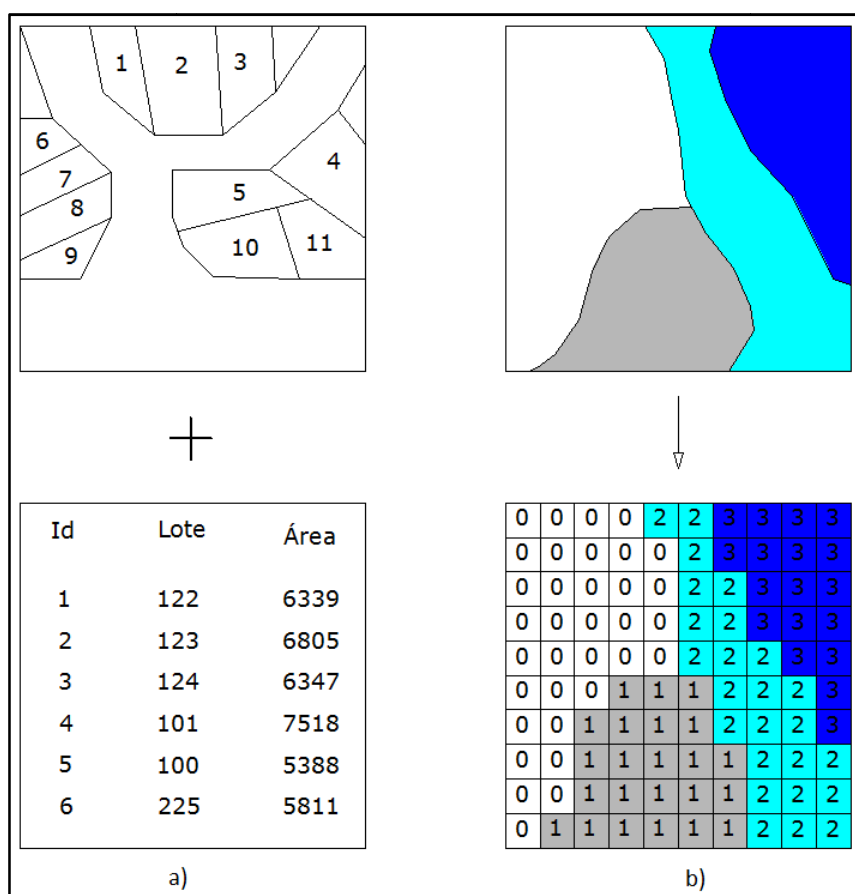


Figura 3.3 – Imagens: (a) vetorial e (b) raster (adaptado de Eastman 1998)

A possibilidade da combinação desses dados espaciais de diferentes origens é um dos aspectos mais significativos dos SIG, com o objetivo de identificar e de descrever as associações presentes nos dados e usá-las para predição de fenômenos espaciais. Nesses procedimentos, procura-se combinar os mapas de entrada com base em regras pré-determinadas de acordo com o caso: essas regras definem, para todas as localizações, a classe do mapa de saída a partir das classes dos mapas de entrada (Quadros, 2000). O mapeamento da vulnerabilidade natural é

um bom exemplo desse procedimento, pois as associações espaciais entre dados hidrogeológicos, geológicos e profundidade do aquífero podem predizer áreas mais vulneráveis que as outras. E ainda a associação da vulnerabilidade com o tipo de atividade exercida na superfície pode gerar um mapa de risco.

## 4. Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho compreendeu as seguintes etapas:

- i) Levantamento de informações existentes em estudos hidrogeológicos, geológicos e documentos de empresas do setor público disponíveis na área da bacia;
- ii) Levantamento das áreas impactadas pela atividade carbonífera e identificação das transformações das parcelas superficiais das áreas impactadas por meio de relatórios e documentos de empresas do setor público;
- iii) Digitalização, georreferenciamento e organização do banco de dados das informações levantadas nas etapas anteriores;
- iv) Organização dos dados nos softwares Microsoft Excel, Surfer e ArcGIS para análise e processamento dos dados para a elaboração dos mapas de vulnerabilidade e de risco.
- v) Análise e processamento dos dados.
- vi) Elaboração de mapas de vulnerabilidade e de risco.

O fluxograma da metodologia pode ser observado na Figura 4.1.

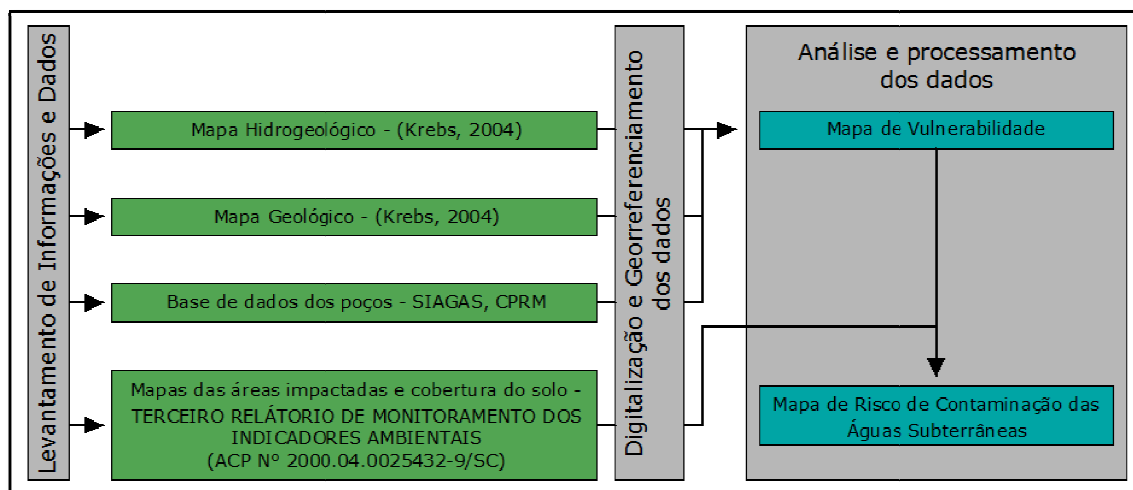


Figura 4.1 – Metodologia empregada na análise de vulnerabilidade e na avaliação de risco dos aquíferos subterrâneos.

A delimitação da área da bacia foi realizada com base no mapa de unidades hidrográficas de Santa Catarina, gerado pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina – Ciram, da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – Epagri. O mapa se encontra disponível no site do órgão.

Na primeira parte do trabalho realizou-se um inventário de todos os dados e informações existentes na área da pesquisa. As informações hidrogeológicas foram obtidas a partir da tese de doutorado de Krebs (2004) intitulada “Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da área correspondente à bacia hidrográfica do Rio Araranguá, SC”. Os dados referentes ao inventário dos poços da região de interesse foram obtidos na CPRM (Serviço Geológico do Brasil) pelo cadastro de usuários de poços subterrâneos no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas). As áreas impactadas pela mineração e a cobertura do solo ocorrida posterior à degradação da área foram obtidas no Terceiro Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais, que integra o Programa de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, que foi criado em resposta à ação civil pública nº 2000.72.04.002543-9/SC, com o objetivo de avaliar a eficiência dos trabalhos de recuperação ambiental da região. Este relatório foi disponibilizado pelo DNPM de Santa Catarina.

Na segunda parte do trabalho os dados e as informações levantadas na primeira parte do trabalho foram digitalizados, georreferenciados e o banco de dados foi organizado. Para isso foram utilizados o programa Microsoft Excel, para a organização dos dados referentes aos poços, e o programa ArcGIS, para a digitalização e georreferenciamento. O ArcGIS também foi utilizado para a integração dos dados georreferenciados. Os dados espaciais foram trabalhados e georreferenciados no Datum SAD 69, zona 22S.

Na terceira parte realizou-se a análise e processamento dos dados e a sobreposição das informações para a elaboração dos mapas de vulnerabilidade e de risco no programa ArcGIS.

A seguir, os procedimentos metodológicos são mais detalhadamente explicados.

## **4.1 Mapa Hidrogeológico**

O mapa hidrogeológico foi elaborado a partir do mapa hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá elaborado por Krebs (2004). Na elaboração do mapa hidrogeológico o autor verificou que geralmente os poços construídos na porção correspondente à bacia carbonífera captam água de mais de uma formação

geológica. Este fato torna difícil caracterizar cada formação geológica, individualmente, quanto a sua potencialidade como aquífero. Desse modo o autor optou por agrupar em um mesmo sistema aquífero as formações geológicas que apresentam características similares no que se refere à fácies litológicas e que ocorrem em intervalos estratigráficos contínuos.

O mapa com escala 1:100.000 foi escaneado e posteriormente digitalizado e georreferenciado no programa ArcGIS e criado um banco de dados com as informações hidrogeológicas.

## **4.2 Mapa Geológico**

O mapa geológico foi manipulado a partir do mapa geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá (Krebs, 2004). O mapa com escala 1:100.000 foi escaneado e posteriormente digitalizado e georreferenciado no programa ArcGIS e foi criado um banco de dados com as informações geológicas. Na área da bacia identificaram-se 11 formações litológicas.

## **4.3 Profundidade do Aquífero**

Para estimar a profundidade do aquífero foram coletados os dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, serviço do CPRM. Com as informações retiradas do sistema formou-se um banco de dados com 145 poços, contendo o nº do poço, município, código do poço, proprietário, tipo de poço, uso, altitude (m), longitude (UTM), latitude (UTM), situação, profundidade (m), diâmetro (mm), formação geológica, litologia, tipo de aquífero, nível estático (m), nível dinâmico (m), vazão (m<sup>3</sup>/h). Os dados foram organizados e tabulados no programa Microsoft Excel

Para a criação do mapa de estimativas de nível freático os dados de nível estático foram exportados para o programa SURFER 8. Foi criado um arquivo de dados no Microsoft Excel com as coordenadas UTM da localização dos poços e as respectivas profundidades. Em seguida, foi criado um arquivo de grid no Surfer a partir do arquivo de dados, usando o método de interpolação de mínima curvatura.

Com isso pôde-se criar um mapa de isovalores para a profundidade do aquífero. Este mapa foi então exportado para o programa ArcGIS, onde foi georreferenciado.

#### **4.4 Áreas Degradadas e Cobertura do Solo**

As áreas degradadas e a cobertura do solo ocorrida posteriormente a degradação da área foram obtidas no Terceiro Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais, que integra o Programa de Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, que foi criado em resposta à ação civil pública nº 2000.72.04.002543-9/SC (GTA, 2009).

São considerados dois níveis de informações espaciais. O primeiro nível refere-se à identificação de áreas impactadas (áreas que sofreram interferência da atividade carbonífera). Neste nível foram divididas em mineração a céu aberto, depósitos de rejeitos e mineração a céu aberto e depósitos de rejeitos. O segundo nível corresponde à identificação e delimitação das áreas que sofreram alterações posteriores à degradação pela atividade carbonífera. Essas áreas foram separadas em 9 classes:

*i) Vegetação Espontânea*: comunidade vegetal que teve desenvolvimento de forma espontânea, sem o plantio de espécies visando à recomposição florestal. Nesta classe podem ser incluídas tantas espécies nativas quanto espécies exóticas pertencentes a comunidades vegetais herbáceas, arbustivas ou arbóreas, havendo uma predominância das comunidades herbáceas e arbustivas. Esta classe pode ser reconhecida pela fisionomia desigual da vegetação considerando as características básicas do substrato como a existência de rejeitos e estéreis ou, ainda, se foi realizada alguma atividade de reconstrução do solo a partir da adição de argila. Esta classe de cobertura indica que não foram realizadas atividades de recomposição florestal e que a comunidade vegetal estabeleceu-se sobre áreas onde o substrato não foi total ou parcialmente reconstruído. As raízes da vegetação ainda podem facilitar a infiltração de poluentes no solo.

*ii) Vegetação Induzida*: comunidade vegetal que foi estabelecida visando obter a recomposição florestal da área sendo identificada por meio de características fisionômicas da vegetação como o plantio homogêneo e/ou sistematizado. Nesta classe de cobertura podem ter sido realizadas atividades visando à reconstrução do

solo a partir da remoção e/ou estabilização dos materiais contaminantes, no entanto, em alguns casos o plantio de espécies vegetais é realizado sobre substrato alterado sem a realização de atividades de reconstrução do solo. Embora esta classe de cobertura não possa ser considerada típica de áreas em processo de recuperação ambiental pode ser considerada indicativa do processo.

iii) Remanescente Florestal: classe de cobertura composta por fragmentos de vegetação nativa que não foram totalmente suprimidos ou que estão em processo avançado de regeneração natural. Além disso, o solo desta área precisa apresentar características semelhantes às naturais, como a presença de serrapilheira, a cor e a textura. Esta classe de cobertura geralmente é representada por pequenos remanescentes florestais alterados e intensamente fragmentados pertencentes a estágios iniciais de regeneração natural. Funcionam como núcleos de dispersão de propágulos e podem ser utilizados por animais como abrigo, potencializando o processo de recuperação ambiental de áreas adjacentes.

iv) Argila: indica que a área pode estar em processo de recuperação ambiental, pois a argila compõe parte da reconstrução do solo para introdução de novas espécies vegetais. Outra possibilidade de utilização da argila é de impermeabilização do solo, uma vez que este material possui características de atenuação da infiltração e percolação das águas meteorológicas nas pilhas de estéreis ou rejeitos, diminuindo assim a lixiviação e a geração de drenagem ácida de mina. Ela também é usada em taludes dos depósitos de rejeitos e em bacias de decantação para impermeabilização da base e das laterais, para evitar o desencadeamento de processos erosivos ou infiltrações.

v) Lagoa Ácida Interna: são lagoas impactadas pela mineração de carvão que estão dentro dos limites das áreas impactadas por depósitos de rejeito ou mineração a céu aberto. Estas lagoas surgem a partir cavas de mineração ou em bacias de decantação e uma de suas características é que são formadas pelo próprio material estéril ou de rejeito.

vi) Lagoa Ácida Externa: são lagoas que recebem a contribuição de drenagens ácidas de áreas impactadas próximas, não estando inseridas, entretanto, no limite destas. De origem natural, essas áreas vêm sofrendo influência do escoamento superficial de drenagem ácida.

vii) Urbanização Residencial: são áreas urbanizadas que possuem uma densidade de construções composta principalmente por moradias residenciais.

Essas urbanizações estão inseridas em áreas que possuem depósitos de rejeito ou que foi minerada a céu aberto no passado. A diferenciação desta classe é importante do ponto de vista ambiental, pois muitas destas áreas são zonas frágeis, propícias a invasões, e cuja ocupação desordenada (muitas vezes por segmentos sociais de baixa renda) dificultam ou inviabilizam quaisquer ações de recuperação.

viii) Urbanização Industrial: são áreas urbanizadas que possuem atividades industriais dentro dos limites de áreas impactadas, além daquelas onde estão as construções das atividades mineiras, nos seus respectivos pátios operacionais.

ix) Rejeito ou Estéril Exposto: são áreas onde o rejeito ou estéril resultante da mineração estão expostos, sem a realização de atividades de reconstrução do solo e ações de recuperação.

## 4.5 Mapa de Vulnerabilidade

Para verificar a vulnerabilidade natural dos aquíferos na bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia foi utilizada a metodologia desenvolvida por Foster e Hirata (1987), conhecida como GOD. Segundo os autores, a abordagem mais lógica para definir o risco de poluição da água subterrânea é imaginá-lo como a interação entre a carga de contaminantes que pode ser aplicada na superfície como resultado de atividades antrópicas e a vulnerabilidade do aquífero conseqüente das características naturais do estrato que o separa da carga na superfície.

Foi escolhida a metodologia GOD devido a as informações disponíveis na área de estudo.

A metodologia GOD consiste em combinar três parâmetros físicos e assim gerar um índice de vulnerabilidade natural para o aquífero. Esses parâmetros são: G (*Groundwater occurrence*) tipo de ocorrência da água subterrânea, O (*Overall Litology of Aquiperm or Aquitard*) litologias gerais dos aquíferos ou aquitardos e D (*Depth to Groundwater Table*) profundidade do nível freático.



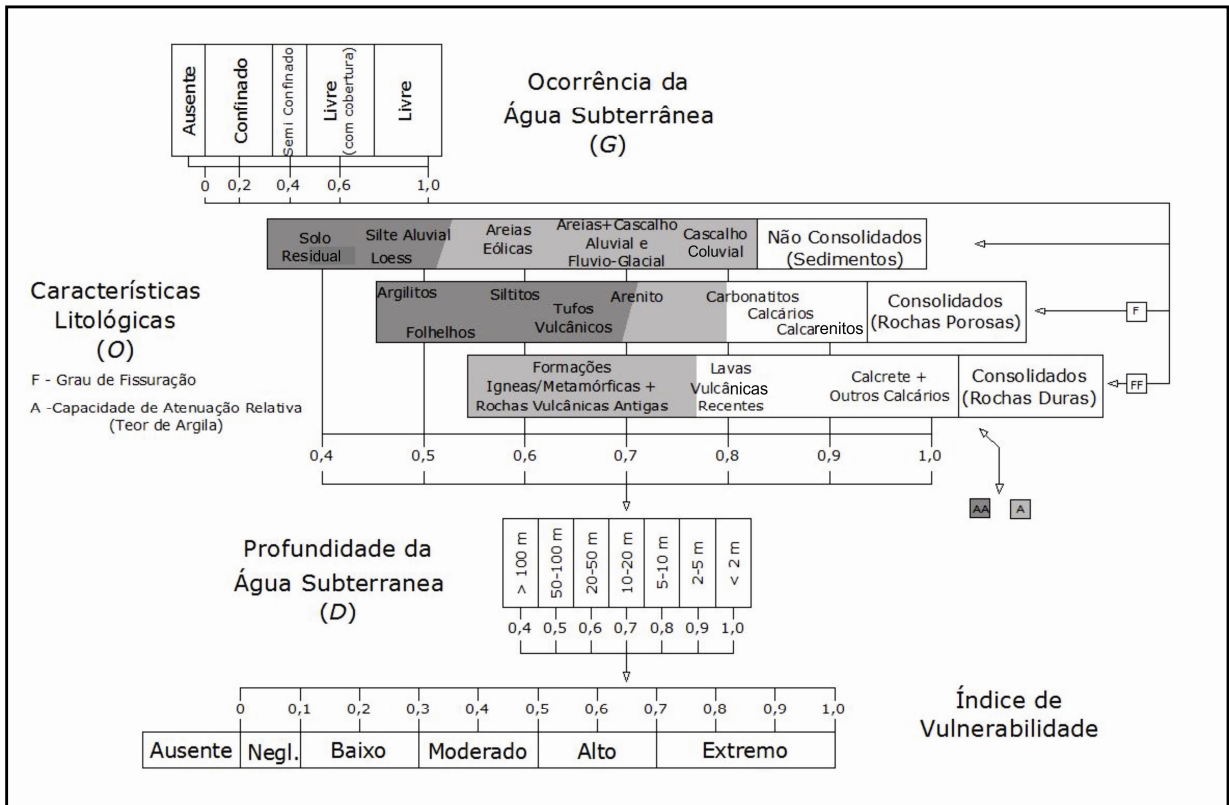


Figura 4.2 – Metodologia GOD (adaptado de Foster e Hirata 1987)

Após a identificação desses parâmetros, eles são classificados dentro de uma faixa de variação: tipo de ocorrência de água subterrânea de 0 a 1, descrição da zona não saturada de 0,4 a 1 e a profundidade do nível freático de 0,4 a 1. O índice de vulnerabilidade é o produto dos três fatores, variando de ausente até extremo, conforme a Figura 4.2 acima.

#### 4.6 Mapa de Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas

Para a avaliação de risco realizou-se interação e a sobreposição dos mapas de vulnerabilidade dos sistemas de aquíferos e cobertura do solo atual nas áreas impactadas. A cobertura atual do solo nessas áreas nos fornece a informação onde o rejeito e o estéril foram isolados cessando a oxidação da pirita, evitando a geração da drenagem ácida. As classes de cobertura do solo foram divididas em um índice de acordo com seu potencial de dano ambiental. Consideraram-se quatro níveis (baixo, moderado, alto e extremo) com relação ao potencial de geração de DAM pelo rejeito e estéril que foram expostos previamente pela mineração. Na Tabela 4.1 é

apresentada a tabela desenvolvida para separar as classes de cobertura de solo de acordo com seu potencial de dano ambiental .

Tabela 4.1 - Fonte potencial de dano ambiental e classes de cobertura do solo

Fonte Potencial de Dano Ambiental	Extremo	*Vegetação Espontânea *Lagoa Ácida Interna *Lagoa Ácida Externa *Rejeito ou Estéril Exposto
	Alto	*Urbanização Industrial *Urbanização Residencial
	Moderado	*Vegetação Induzida *Argila
	Baixo	*Remanescente Florestal

Para realizar a avaliação de risco e a determinação do grau de risco, utilizou-se a matriz de risco (Figura 4.3) para a interação entre a vulnerabilidade e a fonte potencial de dano ambiental sobrepondo os dois mapas.

		Fonte Potencial de Dano Ambiental			
		Baixo	Moderado	Alto	Extremo
Vulnerabilidade do Aquífero	Alta	Mínimo	Moderado	Alto	Máximo
	Moderada	Mínimo	Baixo	Moderado	Alto
	Baixa	Mínimo	Baixo	Baixo	Moderado
	Neglig.	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo

Grau de Risco				
Mínimo	Baixo	Moderado	Alto	Máximo

Figura 4.3 - Matriz de avaliação de risco

O mapa gerado mostra espacialmente as áreas com graus de risco variando entre mínimo, baixo, moderado, alto e máximo.

A Figura 4.4 mostra o passo a passo metodológico e as interações dos mapas para se chegar ao mapa de risco. Em suma, é realizada a organização, digitalização e georreferenciamento das informações sobre a ocorrência da água subterrânea, características litológicas e profundidade da água subterrânea para gerar o mapa de vulnerabilidade, posteriormente é feita a combinação com o mapa de cobertura do solo (fonte potencial de dano ambiental) resultando no mapa de risco.

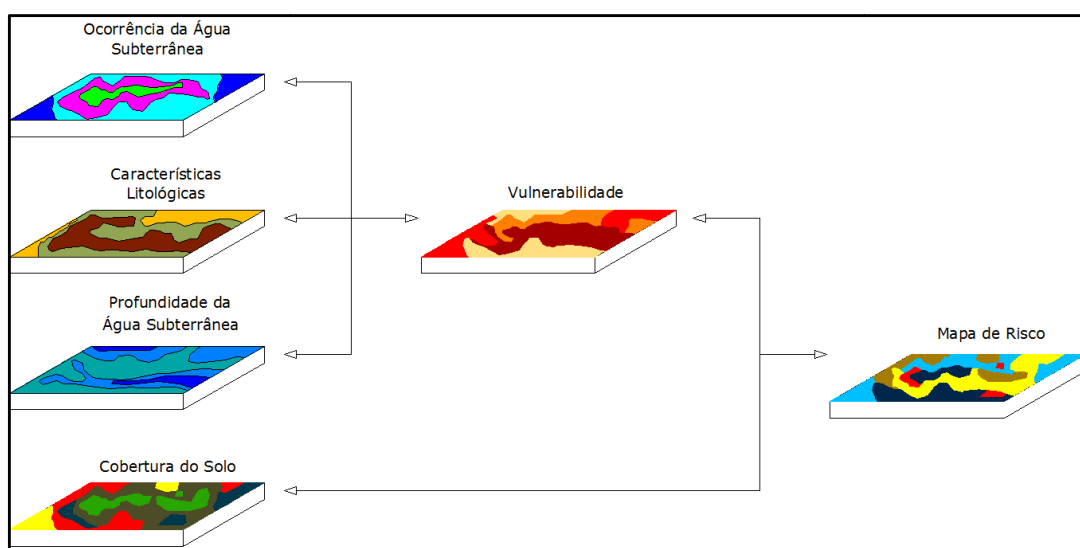


Figura 4.4 - Avaliação de risco.

Para exemplificar a metodologia será utilizado o distrito de Siderópolis. A Figura 4.5 mostra combinação dos três parâmetros físicos utilizados na metodologia GOD para se chegar ao mapa de vulnerabilidade e a Figura 4.6 mostra as interações para chegar ao mapa de risco.

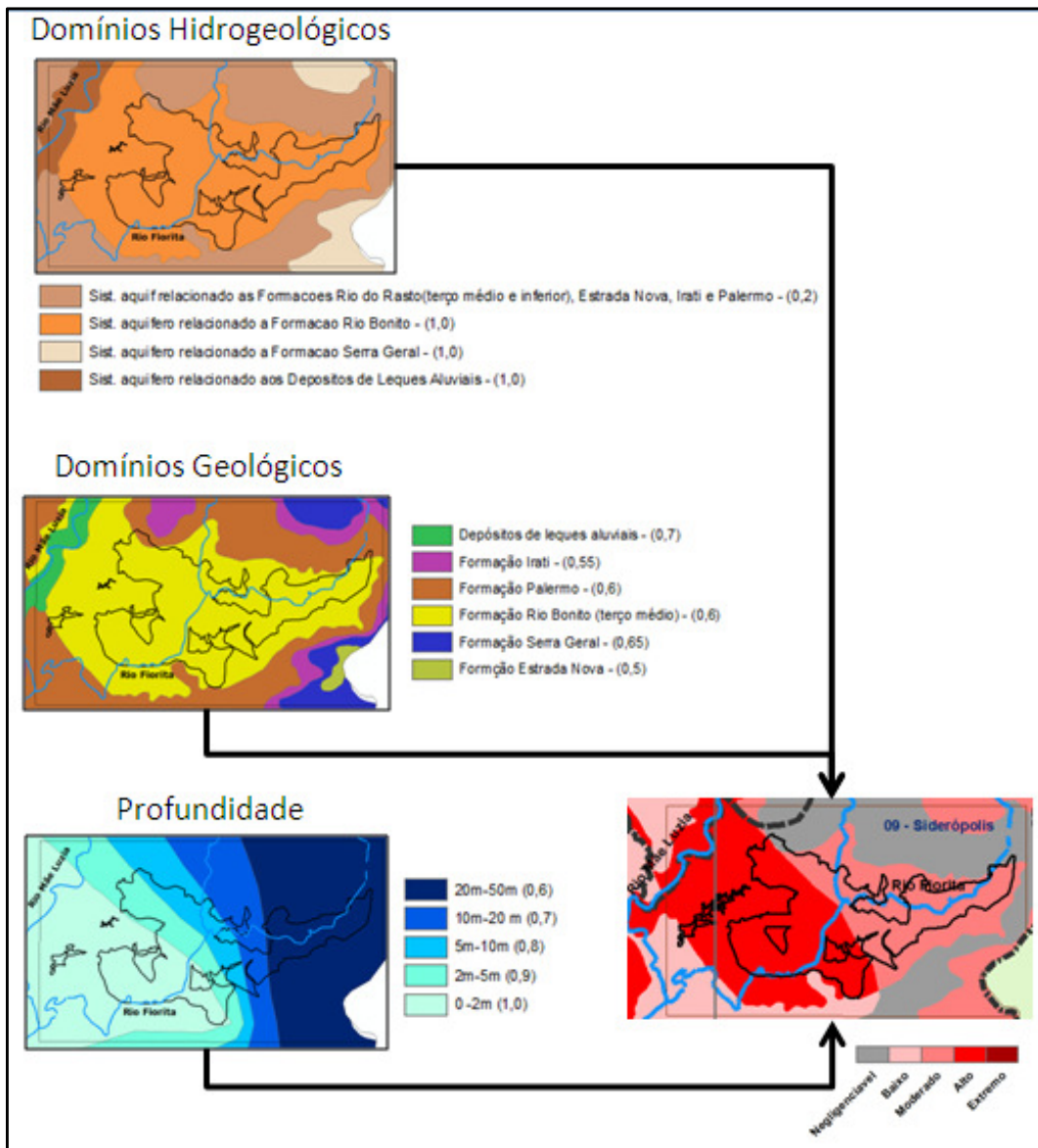


Figura 4.5 – Fluxograma para a avaliação da vulnerabilidade

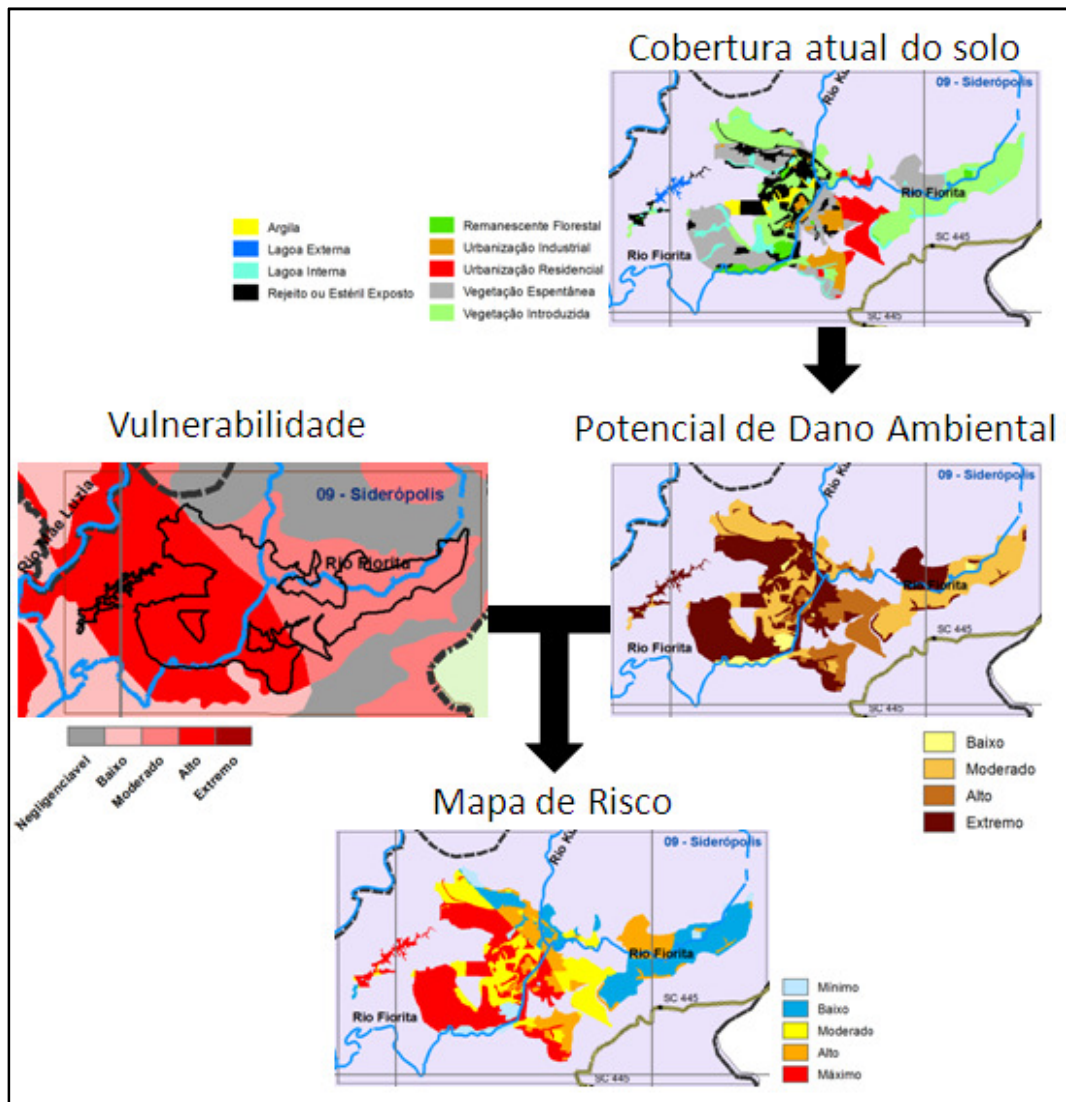


Figura 4.6 – Fluxograma para a avaliação de risco

No Capítulo 5 é explicado detalhadamente todas as interações necessárias e as transformações realizadas para gerar os mapas de vulnerabilidade e risco.

## 5 Análise de Resultados

As análises de resultados das áreas impactadas foram separadas seguindo a classificação utilizada pelo Grupo Técnico de Assessoramento ao cumprimento da sentença da ação civil pública n° 2000.72.04.002543-9/SC (GTA). O relatório elaborado pelo GTA divide em 16 distritos as áreas impactadas pelo carvão mineral na bacia carbonífera catarinense, dos quais oito dentro da bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia (Figura 5.1).

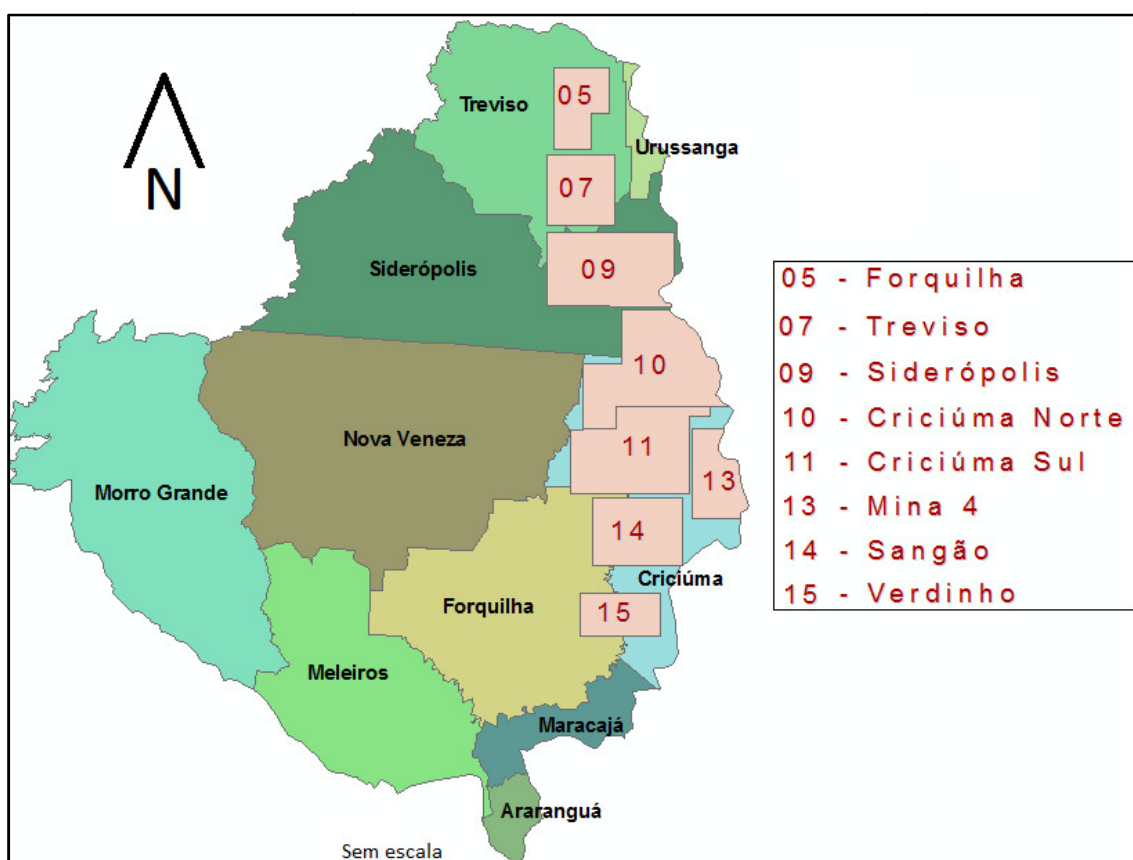


Figura 5.1 - Municípios e distritos na bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia (GTA 2009 e EPAGRI\CIRAM 2009).

### 5.1 Vulnerabilidade natural

O mapa de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos na bacia hidrográfica, obtido por meio da metodologia GOD, baseia-se na combinação de três parâmetros físicos intrínsecos ao meio, são eles: tipo de ocorrência da água

subterrânea, descrição da zona não saturada em termos de grau de consolidação e características litológicas e profundidade do nível freático.

Para o primeiro parâmetro da metodologia, tipo de ocorrência da água subterrânea, *Groundwater occurrence*, os sistemas de aquíferos na região foram classificados em: confinado, semi confinado e livre. Na área da bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia identificaram-se 7 sistemas de aquíferos. Esses sistemas estão apresentados na Tabela 5.1, assim como suas características, e apresentados graficamente na Figura 5.2.

Tabela 5.1 - Sistemas de aquíferos (fonte: Krebs, 2004)

Sistema Aquífero	Características
Formações Rio do Rasto (terço médio e inferior), Estrada Nova, Irati e Palermo	Constituído por um pacote de rochas sedimentares predominantemente argilosas cuja espessura alcança 350 metros em alguns locais. Afloram de maneira contínua ao longo do vale do rio Mãe Luzia e tributários. À medida que se dirige para o sul são encobertas pelos depósitos de leques aluviais ou afloram em áreas com declividade elevada onde não atuam como unidade aquífera. Possui porosidade intergranular e é extenso. Mesmo em suas áreas de afloramento, comporta-se como aquífero confinado, extenso.
Formação Serra Geral	Constituída por rochas cristalinas, maciças, praticamente sem poros e, de modo geral, impermeáveis, com exceção da zona amigdaloidal que pode apresentar incipiente porosidade. O armazenamento e a circulação das águas subterrâneas dão-se através das fraturas e juntas. Na encosta média à superior do planalto, ocorrem linhas de fontes de água que dão origem aos cursos d'água da região. Normalmente funciona como um aquífero livre.
Formações Botucatu e Rio do Rasto (terço superior)	Está relacionado ao Sistema de Aquífero Guarani. Na porção média e inferior desse sistema predominam litologias da Formação do Rio do Rasto, relacionadas a processos fluviais e lacustres. Na porção superior afloram litologias da Formação Botucatu, relacionadas a processos eólicos. A natureza arenosa de seus litotipos e distribuição em área indicam tratar-se de um aquífero com porosidade intergranular, extenso, livre ou confinado.
Depósitos Marinhamos com retrabalhamento eólico	Ocorre em uma pequena área ao sul da bacia e apresentam boas condições para captação de água através de poços tubulares ou ponteiros. A natureza essencialmente arenosa de seus depósitos bem como sua distribuição em área indica tratar-se de um aquífero com porosidade intergranular, extenso, livre.
Depósitos Fúlvio-Lagunares	Ocupa a área sul da bacia. Constitui-se de intercalações de siltes, argilas e areias. Do ponto de vista hidrogeológico, constitui um aquífero com porosidade intergranular, extenso, livre ou confinado, com nível estático raso.
Formação Rio Bonito	Possui porosidade intergranular e é extenso. É aflorante na porção norte e leste da bacia, ocupando parte das áreas dos municípios de Criciúma, Siderópolis e Treviso. Nessas áreas comporta-se geralmente como aquífero livre, extenso. Onde as camadas de arenito são capeadas por camadas de siltitos ou carvão ou ainda é capeado pela Formação Palermo, comporta-se como aquífero extenso, confinado.
Depósitos de Leques Aluviais	Estes depósitos são constituídos por duas sequências distintas: uma inferior, formada quase exclusivamente por material grosso, grânulos, seixos cascalhos e blocos (que constituem o intervalo aquífero), e outra superior, de natureza areno-argilosa. O intervalo inferior apresenta boas perspectivas para a exploração de água através de poços escavados, ponteiros ou poços tubulares. A sequência superior é de fundamental importância para a proteção deste aquífero. É um aquífero intergranular extenso, com regime de fluxo livre, semi-confinado ou confinado.

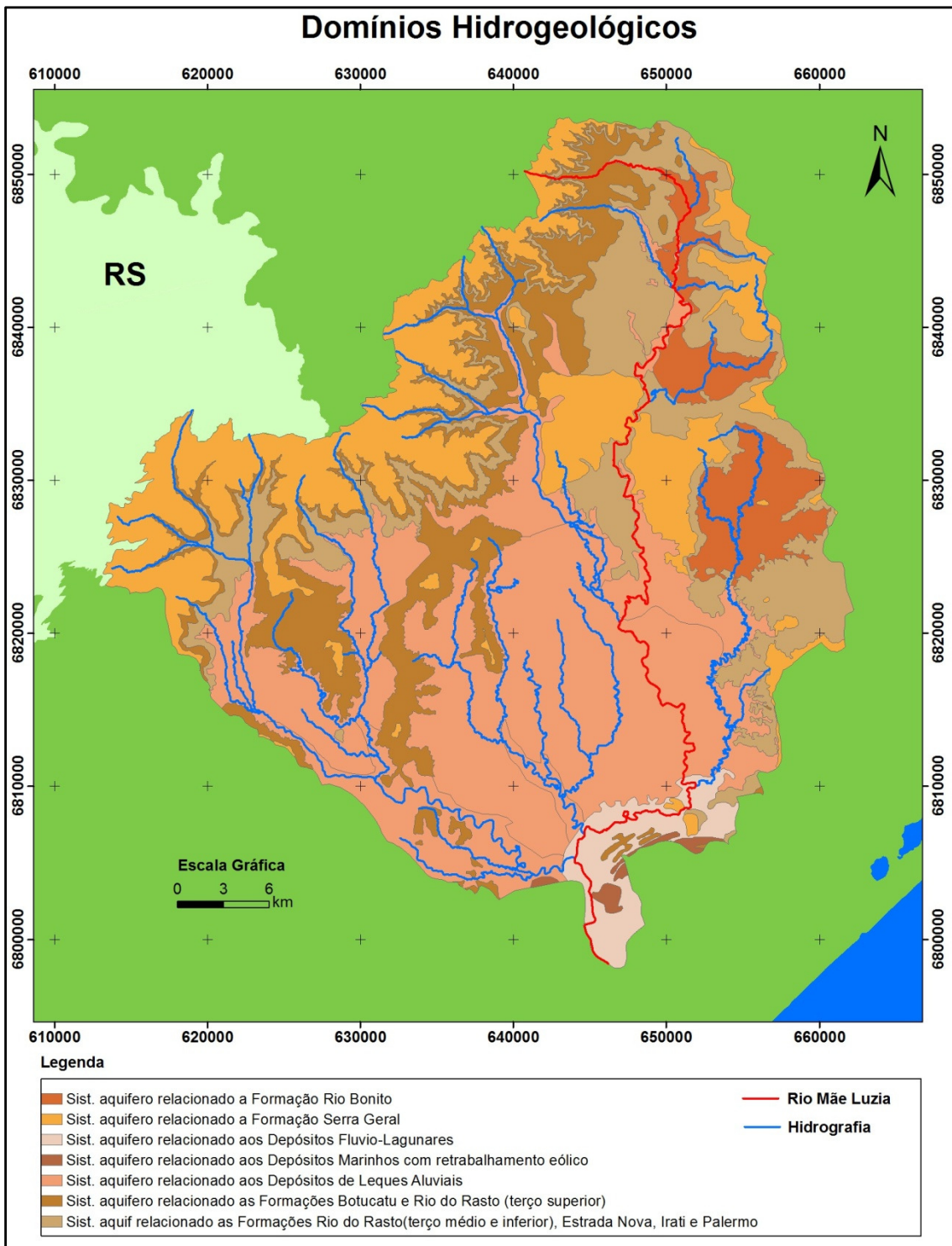


Figura 5.2 – Mapa de Domínios Hidrogeológicos (Krebs, 2004).

Para a aplicação da metodologia, os sistemas de cada tipo de ocorrências de aquífero recebem um índice de acordo com suas características, como mostra a Figura 5.3.



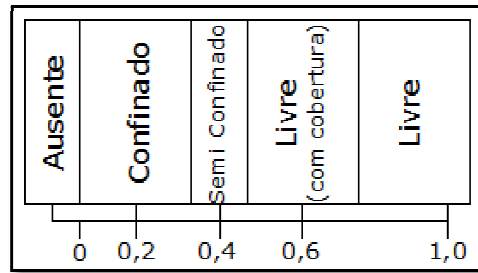


Figura 5.3 - Índices de variação (G) para o tipo de ocorrência da água subterrânea (fonte: Foster e Hirata, 1987).

A Tabela 5.2 mostra a classificação de cada sistema de aquíferos e seus respectivos índices G.

Tabela 5.2 – Tipos de sistemas de aquíferos

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Índice <i>G</i>
Formações Rio do Rasto (terço médio e inferior), Estrada Nova, Irati e Palermo	Confinado	0,2
Formação Serra Geral	Livre	1
Formações Botucatu e Rio do Rasto (terço superior)	Livre ou Confinado	1 / 0,2
Depósitos Marinheiros com retrabalhamento eólico	Livre	1
Depósitos Flúvio-Lagunares	Confinado	0,2
Formação Rio Bonito	Livre	1
Depósitos de Leques Aluviais	Livre, Semi-confinado ou Confinado	1 / 0,4 / 0,2

Na Figura 5.4 é representado o mapa com o tipo de ocorrência dos sistemas de aquíferos. Ao sul da bacia a maioria dos sistemas de aquíferos é do tipo confinado; estão nessa categoria os sistemas de aquíferos relacionados aos depósitos Flúvio-Lagunares e uma parte dos Leques Aluviais. Os sistemas que são livres nessa região correspondem aos Depósitos Marinheiros com retrabalhamento eólico e a formação Serra Geral quando aflora.

O leste da bacia, onde estão localizadas as áreas degradadas pela exploração de carvão, possui regiões com aquíferos confinados e livres. Confinados correspondem ao sistema de aquífero relacionado às Formações Rio do Rasto (terço médio e inferior), Estrada Nova, Irati e Palermo e os livres aos sistemas de aquíferos relacionados às Formações Rio Bonito, Serra Geral e uma parte dos Depósitos de Leques Aluviais. Nota-se que grande parte das áreas impactadas está sobre domínios de aquíferos livres.

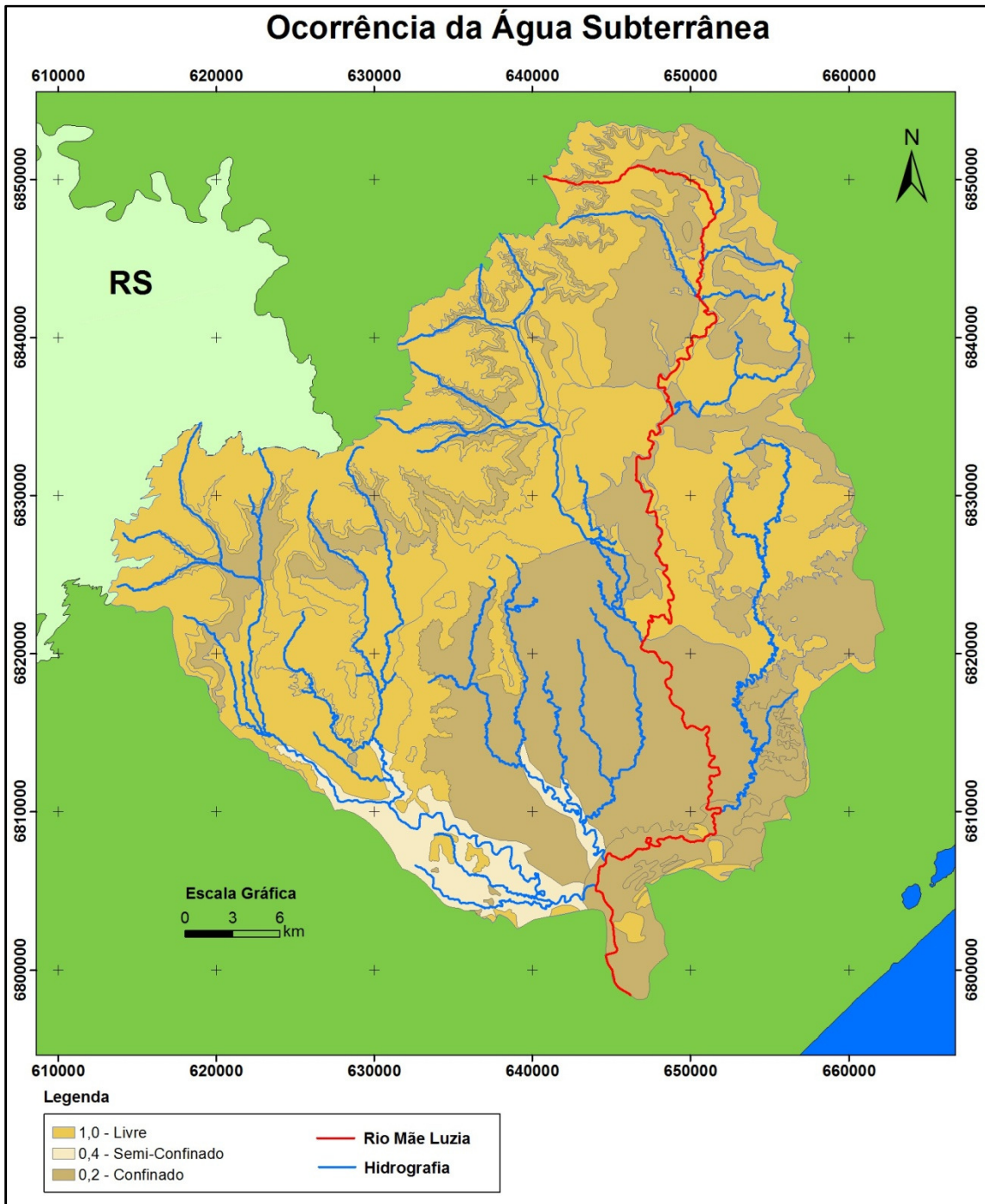


Figura 5.4 - Ocorrência da água subterrânea relacionadas ao tipo de aquífero (índice  $G$ ).

Para o segundo parâmetro da metodologia, litologias gerais dos aquíferos ou aquitardos, *Overall Litology of Aquiperm or Aquitard*, as 11 formações geológicas presentes na bacia, que estão mapeadas na Figura 5.6, foram separados por suas características, conforma a Figura 5.5 ilustra, e atribuídos os respectivos índices.

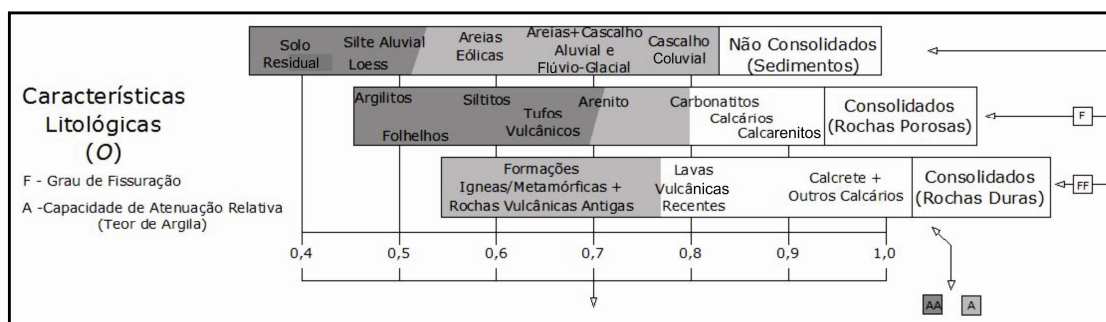


Figura 5.5 - Índices para as diferentes características geológicas (fonte: Foster e Hirata, 1987).

A Tabela 5.3 mostra as 11 formações geológicas, suas características e seus respectivos índices. A Figura 5.7 mostra a espacialização deste segundo parâmetro da metodologia na bacia hidrográfica.

Tabela 5.3 - Formações geológicas (fonte: Krebs, 2004)

Formação	Litologia	Índice <i>O</i>
Formação Estrada Nova <b>-Pen-</b>	No topo argilitos, folhelhos e siltitos ritmicamente intercalados com arenitos muito finos, cinza-claros a escuros, esverdeados, violáceos, bordos ou avermelhados, com lentes de calcários, laminações onduladas, estratificação hummcky, flazer, marcas onduladas e gretas de contração. Na basal, folhelhos, argilitos e siltitos cinza-escuros a pretos, cinza-esverdeados a amarelados quando interperizados, fratura conchoidal, com lentes e concreções calcíferas.	0,5
Depósitos Aluvionares e de Retrabalamento Fluvial <b>-QHa-</b>	Areias e lamas, eventualmente em cascalheiras, que preenchem as calhas dos rios e suas planícies de inundações. Em algumas situações, ocorrem interdigitados com depósitos paleolagunares ou praias marinho/eólico.	0,55
Depósitos de Leques Aluviais <b>-TQi-</b>	cascalhos, areias e lamas resultantes de ação de processos de fluxos gravitacionais e aluviais. Espessura, extensão e granulometria variada, desde argila até bloco e matacões.	0,7
Formação Serra Geral <b>-Ksg-</b>	Derrames basálticos, soleiras e diques de diabásio, realcionados ao magnetismo toleítico da Bacia do Paraná.	0,65
Formação Palermo <b>-Pp-</b>	Siltitos e siltitos arenosos, cinza-esverdeados a amarelados, intensamente bioturbados, laminações onduladas wavy, lisen e flazer com intercalações de leitões e lentes de arenitos finos a médios, ortoquartzíticos com estratificação hummcky, e cimento carbonático.	0,6
Formação Botucatu <b>JKb-</b>	Arenitos finos e médios, róseos a avermelhados, bem selecionados, bimodais, com estratificação cruzadas tangenciais e plano-paralelas de médio a grande porte.	0,7
Formação Rio do Rasto <b>PTRrr-</b>	Arenitos fino bem selecionados, lenticulares, siltitos e argilitos cinza-esverdeados, bordos ou avermelhados, com laminações plano-paralelas e onduladas, climbing, flazer e cruzadas acanaladas.	0,6
Formação Irati <b>-Pi-</b>	Siltitos e siltitos arenosos, cinza-escuros a pretos, eventualmente cinza-claros a azulados, folhelhos pirobetuminosos, intercalados com lentes de margas.	0,55
Depósitos Praias Marinhos e Eólicos <b>-QPb-</b>	Areias marinhas quartzosas, finas a médias, amarelo-claras a acastanhadas, eventualmente contendo estruturas do tipo estratificada cruzada acanalada (3D), espinha de peixe ( <i>herringbone</i> ) e tubos fósseis de <i>Calichirus Majoey</i> . Areias quartzosas eólicas que recobrem os terraços marinhos, muitas vezes, enriquecidas em matriz secundária composta por argilas e óxidos de ferro.	0,6
Depósitos Fluvio Lagunares <b>-QHfl-</b>	Areias e lamas lagunares, com restos orgânicos vegetais, interdigitais com cascalhos e areias grossas a finas relacionadas à sedimentação fluvial.	0,55
Formação Rio Bonito <b>-PRbss-</b> <b>-PRbsm-</b> <b>-PRbsi-</b>	Arenitos finos e grossos, cinza-esbranquiçados, localmente conglomeráticos, com estratificações paralelas, cruzadas tabular e acanalada; arenitos sigmoidais e arenitos quartzosos, bem selecionados. Siltitos cinzas com lentes de arenitos muito finos, apresentando laminações paralelas e onduladas, estruturas tipo herringbone e hummcky, folhelhos escuros carbonosos, leitões e camadas de carvão.	0,6

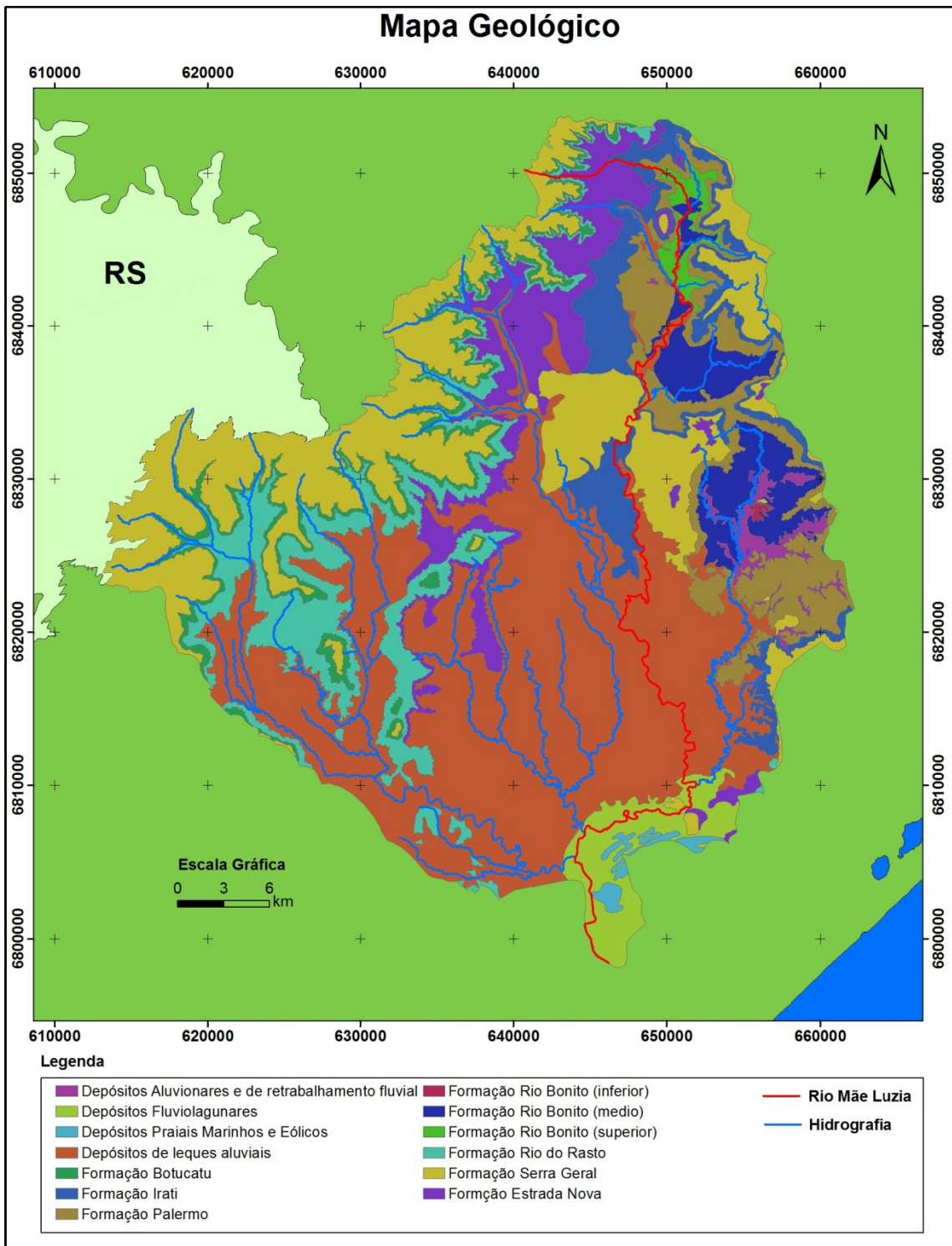


Figura 5.6 - Mapa Geológico (Krebs, 2004).

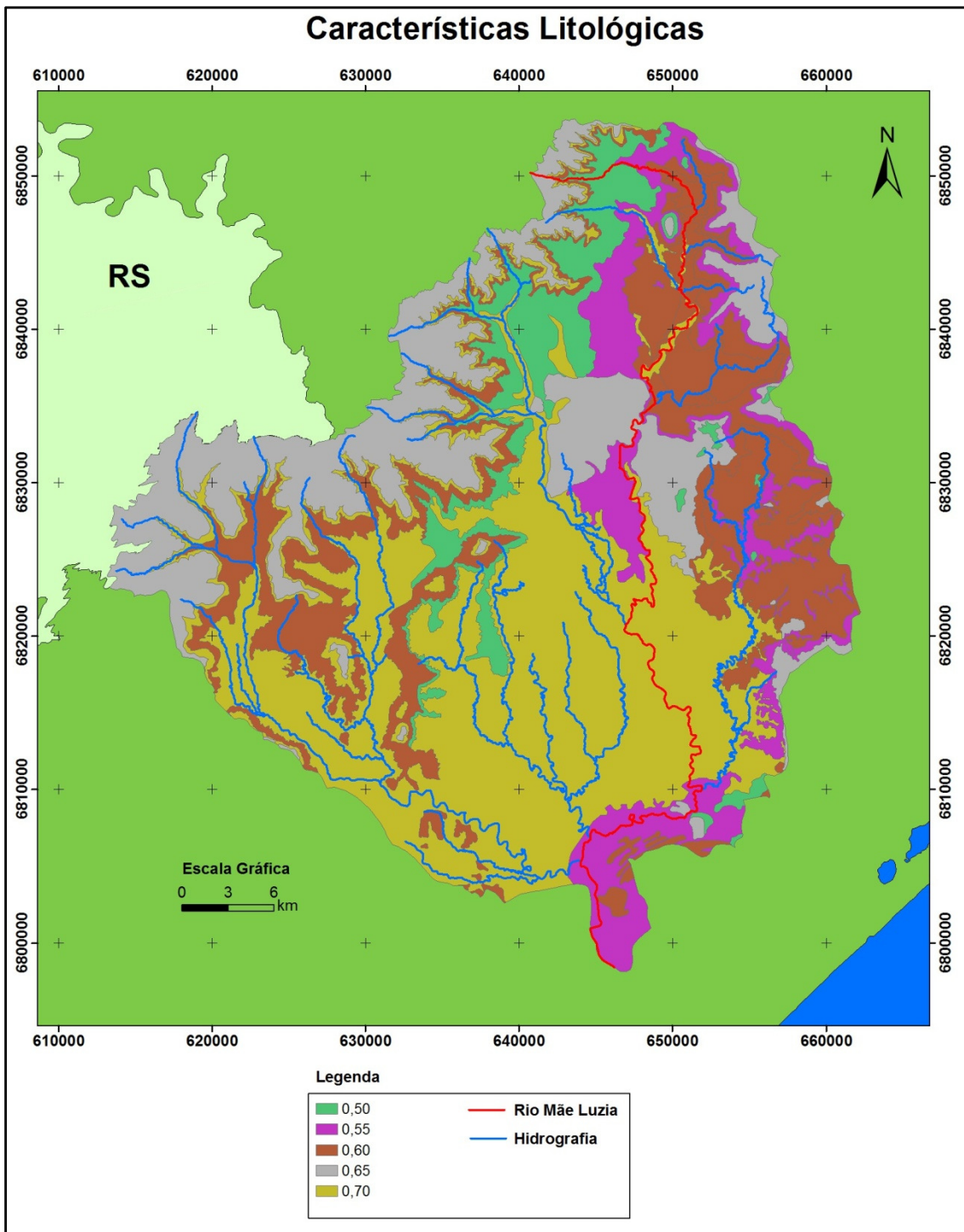


Figura 5.7 - Características litológicas quanto ao índice **O**.

A espacialização do terceiro parâmetro físico, profundidade do nível freático, *Depth to Groundwater Table*, foi realizada com as informações dos 145 poços existentes cadastrados no SIAGAS na bacia hidrográfica; a Tabela 5.4 apresenta os números dos poços e o município onde eles se localizam.

Tabela 5.4 - Localização dos poços de monitoramento (fonte: SIAGAS, 2010).

Nº do poço	Município	Nº do poço	Município	Nº do poço	Município	Nº do poço	Município
4300003031	Criciúma	4300018009	Criciúma	4300003053	Forquilha	4300017922	Nova Veneza
4300003032	Criciúma	4300018010	Criciúma	4300003054	Forquilha	4300017923	Nova Veneza
4300003034	Criciúma	4300018011	Criciúma	4300003055	Forquilha	4300017924	Nova Veneza
4300003035	Criciúma	4300018012	Criciúma	4300003056	Forquilha	4300017925	Nova Veneza
4300003040	Criciúma	4300018013	Criciúma	4300003057	Forquilha	4300017927	Nova Veneza
4300003041	Criciúma	4300018014	Criciúma	4300003058	Forquilha	4300017947	Nova Veneza
4300003042	Criciúma	4300018015	Criciúma	4300003059	Forquilha	4300017948	Nova Veneza
4300003043	Criciúma	4300018016	Criciúma	4300004248	Forquilha	4300017949	Nova Veneza
4300003044	Criciúma	4300018017	Criciúma	4300017930	Forquilha	4300017998	Nova Veneza
4300003045	Criciúma	4300018023	Criciúma	4300017931	Forquilha	4300017999	Nova Veneza
4300003048	Criciúma	4300018031	Criciúma	4300017986	Forquilha	4300018030	Nova Veneza
4300004227	Criciúma	4300019674	Criciúma	4300017990	Forquilha	4300019612	Nova Veneza
4300004235	Criciúma	4300019675	Criciúma	4300017991	Forquilha	4300019613	Nova Veneza
4300004236	Criciúma	4300019676	Criciúma	4300018021	Forquilha	4300003137	Siderópolis
4300004237	Criciúma	4300019720	Criciúma	4300004230	Maracajá	4300003138	Siderópolis
4300004239	Criciúma	4300019721	Criciúma	4300017921	Maracajá	4300003139	Siderópolis
4300004240	Criciúma	4300019722	Criciúma	4300003113	Meleiro	4300003454	Siderópolis
4300004241	Criciúma	4300019723	Criciúma	4300004228	Meleiro	4300003455	Siderópolis
4300004242	Criciúma	4300019725	Criciúma	4300017914	Meleiro	4300003456	Siderópolis
4300004243	Criciúma	4300019730	Criciúma	4300017928	Meleiro	4300017926	Siderópolis
4300004244	Criciúma	4300019732	Criciúma	4300017929	Meleiro	4300017932	Siderópolis
4300004249	Criciúma	4300019733	Criciúma	4300017987	Meleiro	4300017933	Siderópolis
4300017853	Criciúma	4300019734	Criciúma	4300017988	Meleiro	4300017934	Siderópolis
4300017915	Criciúma	4300019736	Criciúma	4300019599	Meleiro	4300017943	Siderópolis
4300017916	Criciúma	4300019737	Criciúma	4300019600	Meleiro	4300017944	Siderópolis
4300017938	Criciúma	4300019738	Criciúma	4300019601	Meleiro	4300018024	Siderópolis
4300017939	Criciúma	4300019739	Criciúma	4300019602	Meleiro	4300019604	Siderópolis
4300017985	Criciúma	4300019745	Criciúma	4300019603	Meleiro	4300019605	Siderópolis
4300017989	Criciúma	4300019746	Criciúma	4300003118	Morro grande	4300019606	Siderópolis
4300018000	Criciúma	4300019747	Criciúma	4300003119	Nova Veneza	4300019607	Siderópolis
4300018002	Criciúma	4300019748	Criciúma	4300003120	Nova Veneza	4300019608	Siderópolis
4300018003	Criciúma	4300019749	Criciúma	4300003121	Nova Veneza	4300017911	Treviso
4300018004	Criciúma	4300019750	Criciúma	4300003122	Nova Veneza	4300019595	Treviso
4300018005	Criciúma	4300003049	Forquilha	4300004231	Nova Veneza	4300017890	Urussanga
4300018006	Criciúma	4300003050	Forquilha	4300004232	Nova Veneza		
4300018007	Criciúma	4300003051	Forquilha	4300004233	Nova Veneza		
4300018008	Criciúma	4300003052	Forquilha	4300004234	Nova Veneza		

Dos 145 poços existentes cadastrados no SIAGAS na bacia hidrográfica, somente 61 possuem a informação sobre o nível estático, necessário para obter a profundidade do aquífero. Na Tabela 5.5 é mostrado o número do poço, município onde está localizado, localização geográfica e o nível estático.

Tabela 5.5 – Nível estático dos poços monitorados.

Nº do poço	Município	Coord. (UTM)		N,E.(m)	Nº do poço	Município	Coord. (UTM)		N,E.(m)
		Oeste	Sul				Oeste	Sul	
4300003031	Criciúma	6826480	659200	30,00	4300017921	Maracajá	6806417	651341	1,40
4300003034	Criciúma	6826750	658620	9,00	4300004228	Meleiro	6807900	638400	2,00
4300003035	Criciúma	6826800	658780	4,00	4300017914	Meleiro	6808015	633813	3,94
4300003040	Criciúma	6827550	660000	23,00	4300017928	Meleiro	6807863	638467	6,00
4300003044	Criciúma	6826100	659350	4,00	4300017987	Meleiro	6808106	633770	3,36
4300003048	Criciúma	6823100	655650	9,40	4300017988	Meleiro	6809879	633270	4,56
4300004236	Criciúma	6825100	658750	0,00	4300019599	Meleiro	6809863	633206	4,56
4300017916	Criciúma	6824948	654307	18,00	4300019602	Meleiro	6809981	633160	4,21
4300017985	Criciúma	6826080	657558	1,10	4300019603	Meleiro	6809592	633191	4,00
4300018006	Criciúma	6825967	655467	5,20	4300003118	M. Grande	6813700	624900	24,00
4300018012	Criciúma	6825997	653715	14,00	4300003119	N. Veneza	6823400	640500	3,00
4300019676	Criciúma	6825668	659281	11,00	4300003120	N. Veneza	6829750	646200	4,00
4300019720	Criciúma	6825614	659289	11,20	4300017924	N. Veneza	6830522	645924	5,00
4300019721	Criciúma	6822976	658877	45,40	4300017925	N. Veneza	6830276	646384	4,80
4300019722	Criciúma	6822850	658861	4,00	4300017927	N. Veneza	6831314	646463	1,00
4300019725	Criciúma	6825126	658436	12,50	4300017948	N. Veneza	6820437	634935	4,00
4300019730	Criciúma	6825539	657204	5,00	4300017949	N. Veneza	6820446	635415	1,50
4300019747	Criciúma	6820546	659322	20,00	4300017998	N. Veneza	6824505	644254	5,00
4300019748	Criciúma	6820355	659097	18,00	4300017999	N. Veneza	6823544	645263	3,80
4300003049	Forquilha	6814650	639250	3,00	4300003137	Siderópolis	6835500	650145	0,00
4300003050	Forquilha	6817800	646650	3,00	4300003138	Siderópolis	6837533	653282	9,50
4300003051	Forquilha	6817600	646750	3,00	4300003139	Siderópolis	6836050	655250	37,50
4300003052	Forquilha	6820650	649300	2,00	4300003456	Siderópolis	6836672	650289	0,09
4300003056	Forquilha	6819250	650300	1,73	4300017926	Siderópolis	6835088	641690	6,00
4300003057	Forquilha	6816950	646800	0,80	4300017934	Siderópolis	6835256	654064	4,70
4300003058	Forquilha	6820950	648650	1,30	4300017944	Siderópolis	6834461	653965	6,80
4300003059	Forquilha	6819300	648900	2,50	4300018024	Siderópolis	6833260	651930	13,00
4300017930	Forquilha	6816592	644646	2,20	4300019607	Siderópolis	6835328	653874	0,00
4300017986	Forquilha	6821447	649139	7,00	4300017911	Treviso	6846894	648988	8,78
4300017991	Forquilha	6820650	649100	2,00	4300017890	Urussanga	6846926	655103	34,20
4300018021	Forquilha	6814831	653524	5,60					

Para a profundidade do aquífero ser utilizada na metodologia, dividiram-se as profundidades em faixas de intervalos e atribuídos índices, como mostrados na Figura 5.8.

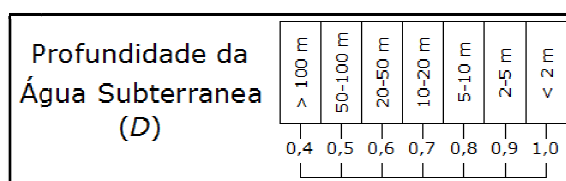


Figura 5.8 - Índices para os diferentes intervalos de profundidade (fonte: Foster e Hirata, 1987).

Na Tabela 5.6, os poços estão divididos de acordo com seus respectivos índices.

Tabela 5.6 - Poços e índice para a profundidade da água subterrânea.

Número do poço	Índice <i>D</i>
4300004236, 4300003137, 4300019607, 4300003456, 4300003057, 4300017927, 4300017985, 4300003058, 4300017921, 4300017949, 4300003056	1
4300003052, 4300017991, 4300004228, 4300017930, 4300003059, 4300003049, 4300003050, 4300003051, 4300003119, 4300017987, 4300017999, 4300017914, 4300003035, 4300003044, 4300019722, 4300019603, 4300003120, 4300017948, 4300019602, 4300017988, 4300019599, 4300017934, 4300017925	0,9
4300019730, 4300017924, 4300017998, 4300018006, 4300018021, 4300017928, 4300017926, 4300017944, 4300017986, 4300017911, 4300003034, 4300003048, 4300003138	0,8
4300019676, 4300019720, 4300019725, 4300018024, 4300018012, 4300017916, 4300019748	0,7
4300019747, 4300003040, 4300003118, 4300003031, 4300017890, 4300003139, 4300019721	0,6

Na Figura 5.9, podemos observar a localização dos poços e a estimativa de profundidade do aquífero, já separadas nos intervalos predeterminados pela metodologia. No mapa nota-se a escassez de dados no lado oeste da bacia, desse modo a estimativa do nível freático pode estar pouco acurada. Entretanto, é a leste da bacia que estão localizadas as áreas degradadas pelo carvão, onde se encontra a maioria dos poços com dados disponíveis de profundidade.



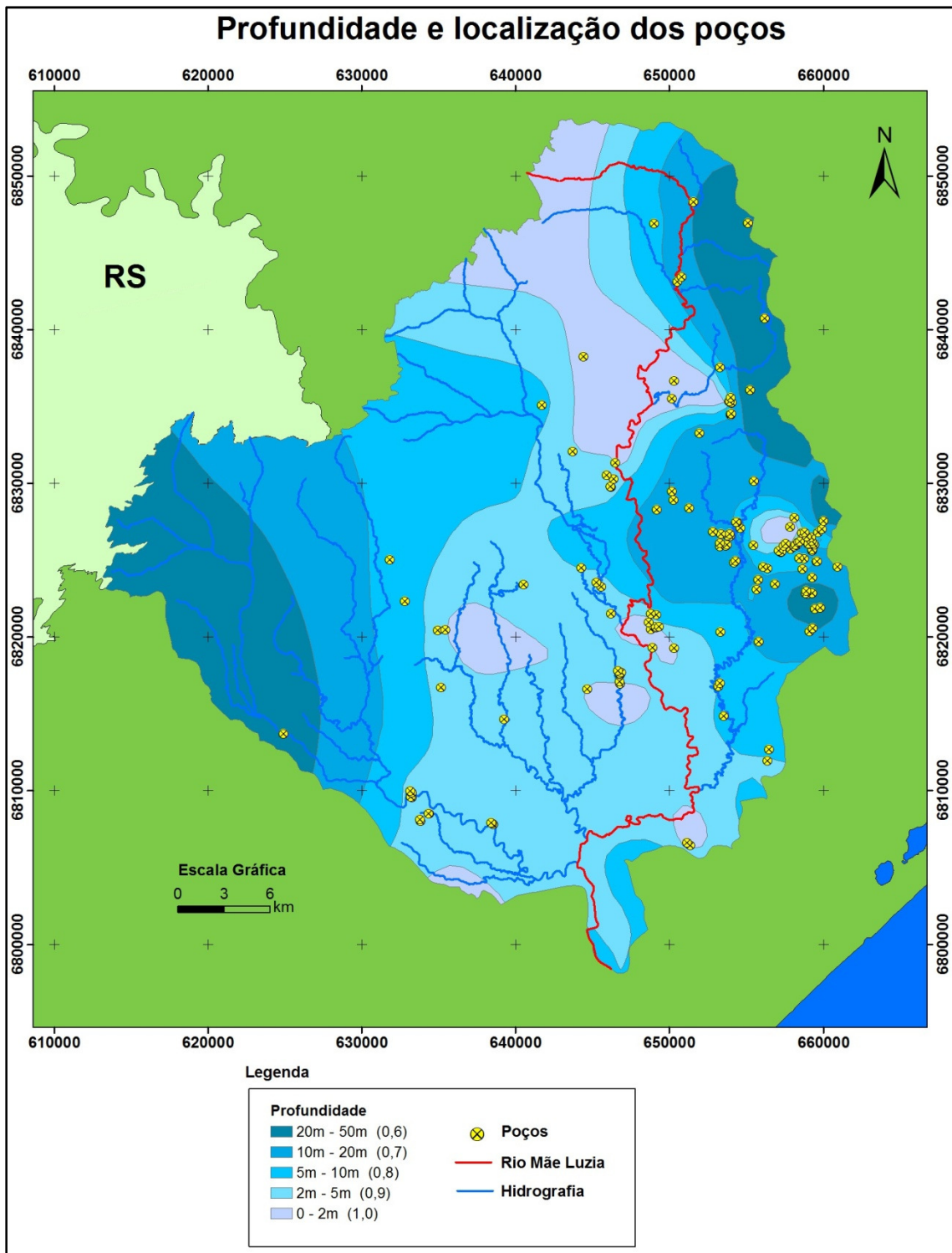


Figura 5.9 - Profundidade (índice  $D$ ) e localização dos poços

O mapa de vulnerabilidade (anexo 1) gerado pela sobreposição desses três *layers* (ocorrência da água subterrânea, litologias gerais dos aquíferos ou aquitardos e profundidade da água subterrânea) revela que grande parte da área, ou 53% da bacia apresenta vulnerabilidade alta e moderada (Figura 5.10 (a)). Observando o mapa de vulnerabilidade identifica-se a área com alta vulnerabilidade na região

central ao norte, devido aos sistemas de aquíferos nessas regiões serem livres e apresentarem uma profundidade pequena, de no máximo 10 metros. Considerando apenas as áreas impactadas pelo carvão, 80,12% dessas áreas estão sobre regiões de vulnerabilidade alta e moderada (Figura 5.10 (b)).

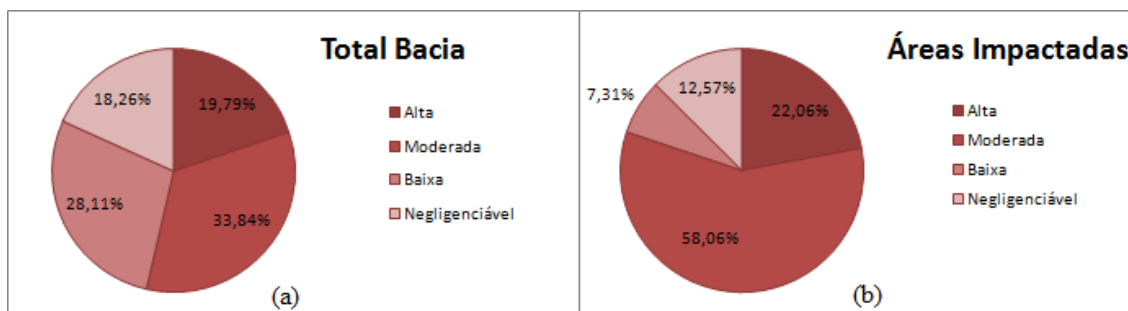


Figura 5.10- Vulnerabilidade natural na bacia (a) e nas áreas impactadas (b).

Dividindo-se a bacia por distritos, nota-se que a maioria deles apresenta grau de vulnerabilidade alta e moderada na maior parte das regiões impactadas, exceto os distritos Mina 4 e Verdinho (Figura 5.11). No distrito Mina 4 toda área impactada está sobre uma região com vulnerabilidade negligenciável, devido à profundidade do aquífero (maior que 10 metros) e o tipo de ocorrência do aquíferos, confinado. No distrito Verdinho as áreas impactadas estão sobre uma região com baixa vulnerabilidade, apesar possuir uma profundidade menor que no distrito Mina 4, está sobre um sistema de aquíferos confinado.

O distrito de Siderópolis é o que apresenta um grau de vulnerabilidade mais preocupante, com 54,56% das áreas impactadas em uma região de alta vulnerabilidade e 43,88% com vulnerabilidade moderada. Os distritos de Forquilha, Treviso, Criciúma Norte e Criciúma Sul possuem mais de 80% das regiões impactadas em áreas com vulnerabilidade moderada.

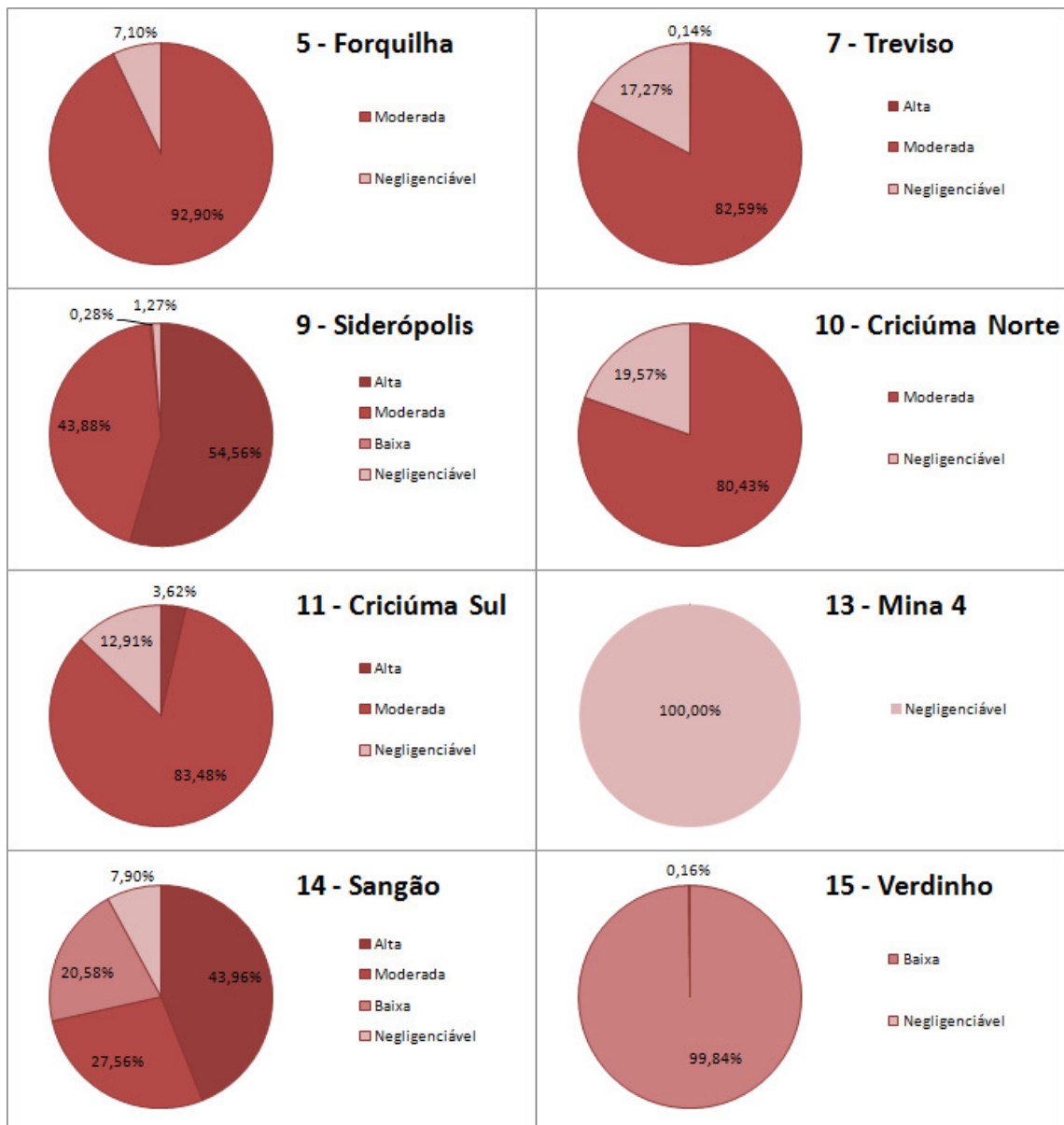


Figura 5.11 - Vulnerabilidade nas áreas impactadas separada por distritos.

## 5.2 Avaliação de risco de contaminação

Para realizar a avaliação de risco e o seu mapeamento, foi preciso separar os diversos tipos de cobertura atual do solo em um índice relacionado com seu potencial de dano ambiental, devido à geração da DAM a partir do rejeito e estéril previamente exposto. Na Tabela 5.7 estão os índices relacionados ao potencial de dano ambiental para cada classe de coberturas do solo e a área ocupada nas regiões degradadas.

Tabela 5.7 - Índice potencial de dano ambiental para cada classe de cobertura do solo.

Fonte Potencial de Dano Ambiental	Índice		Classe	%
	4	Extremo	*Vegetação Espontânea *Lagoa Ácida Interna *Lagoa Ácida Externa *Rejeito ou Estéril Exposto	14,88 4,25 0,63 20,57
3	Alto	*Urbanização Industrial *Urbanização Residencial	5,17 14,24	
2	Moderado	*Vegetação Induzida *Argila	30,51 6,95	
1	Baixo	*Remanescente Florestal	2,79	

Os mapas com a cobertura atual do solo nos distritos podem ser conferidos no anexo 2, e no anexo 3 estão separados de acordo com seu potencial de dano ambiental. Pode-se observar na Figura 5.12 que 40,33% da área impactada possui um potencial extremo de dano ambiental. Nessa região a cobertura do solo é composta por vegetação espontânea, lagoa ácida interna, lagoa ácida externa e rejeito ou estéril exposto.

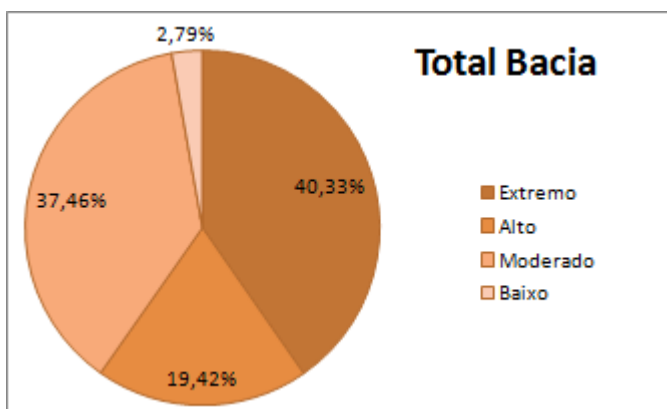


Figura 5.12 - Cobertura do solo nas áreas impactadas da bacia separada pelo índice potencial de dano ambiental.

Dentre os distritos, o que apresenta maior área com o índice extremo é o distrito de Verdinho, com 57,76% da área. Destacam-se, também, com grandes áreas consideradas como fonte potencial de dano ambiental extremo, os distritos de Siderópolis (47,45%), Sangão (47,28%), Forquilha (45,69%) e Treviso (43,19%). Criciúma Norte é o distrito que apresenta menor porcentagem de área com o índice extremo, 26,94%, seguido pelos distritos Mina 4 (38,40%) e Criciúma Sul (39,95%).

O maior índice de baixo potencial de dano ambiental, ou seja, onde a vegetação nativa não foi totalmente suprimida ou existe um processo avançado de regeneração natural, é apresentado pelo distrito de Verdinho, 9,80% da área. Isso mostra que apesar de ser o distrito com a maior porcentagem da área com índice de extremo potencial de dano ambiental (57,76%), possui, também, a maior porcentagem de área recuperada.

Na Figura 5.13 pode-se observar a distribuição dos índices de dano ambiental potencial.

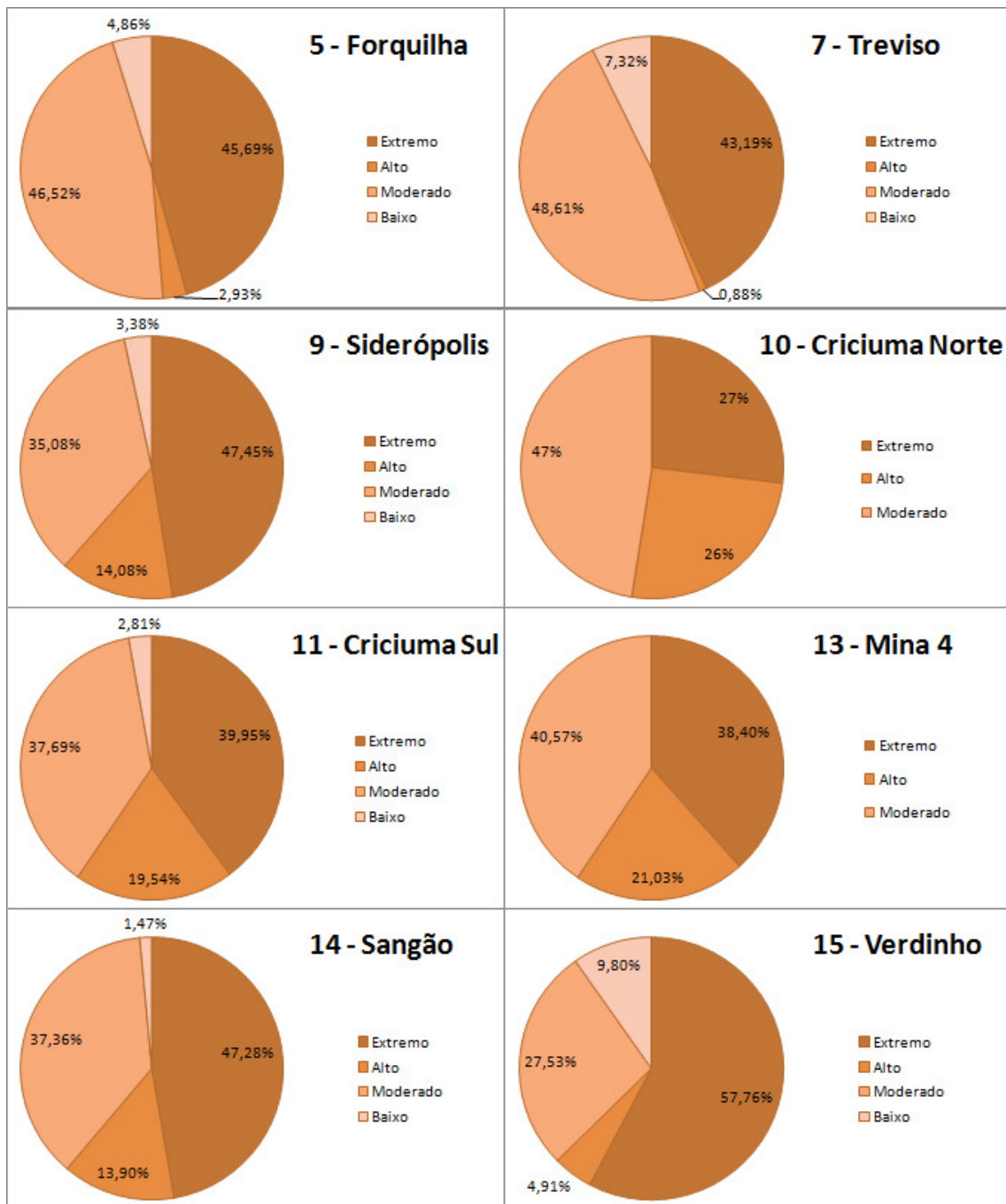


Figura 5.13 - Cobertura do solo por distrito separado pelo índice potencial de dano ambiental.

Com base nos mapas de vulnerabilidade e das fontes potenciais de dano ambiental, realizou-se a sobreposição dos dois mapas para a avaliação de risco. Utilizou-se a matriz de risco para fazer a interação dos índices de vulnerabilidade e dos índices de dano ambiental potencial para gerar o índice de risco nas áreas. A espacialização do risco de contaminação dos sistemas de aquíferos nas áreas degradadas está no mapa do anexo 4. Na Figura 5.14 pode ser observada a matriz

de risco e porcentagem da área impactada por categoria de risco em todos os distritos da bacia.

		Fonte pontencial de Dano Ambiental			
		Baixo	Moderado	Alto	Extremo
Vulnerabilidade do aquífero	Alta				
	Moderada				
	Baixa				
	Neglig.				

Grau de Risco				
Mínimo	Baixo	Moderado	Alto	Máximo
14,90%	27,06%	23,11%	22,28%	12,66%

Figura 5.14 - Estatísticas das áreas impactadas da bacia por categorias de risco.

Uma elevada parcela da área possui risco baixo de contaminação, 27,06%, o risco máximo aparece em apenas 12,66% das áreas degradadas. Observando os distritos separadamente (Figura 5.15) apenas 4 possuem risco máximo em suas áreas, Treviso (0,10%), Criciúma Sul (1,53%), Sangão (21,51%) e Siderópolis (33,45%).

Siderópolis apresenta risco máximo e alto em 52,67% das áreas degradadas, ou seja, possuem áreas com combinação entre vulnerabilidade alta com alto ou extremo potencial de dano ambiental ou vulnerabilidade moderada com extremo potencial de dano ambiental. Observa-se que é o distrito que apresenta os maiores índices, tanto no de vulnerabilidade como no de potencial de dano ambiental.

O distrito de Verdinho não possui riscos máximos e altos, mas tem uma grande parte de sua área apresentando risco moderado (57,25%), resultante da combinação de regiões com extremo potencial de dano ambiental e vulnerabilidade baixa.

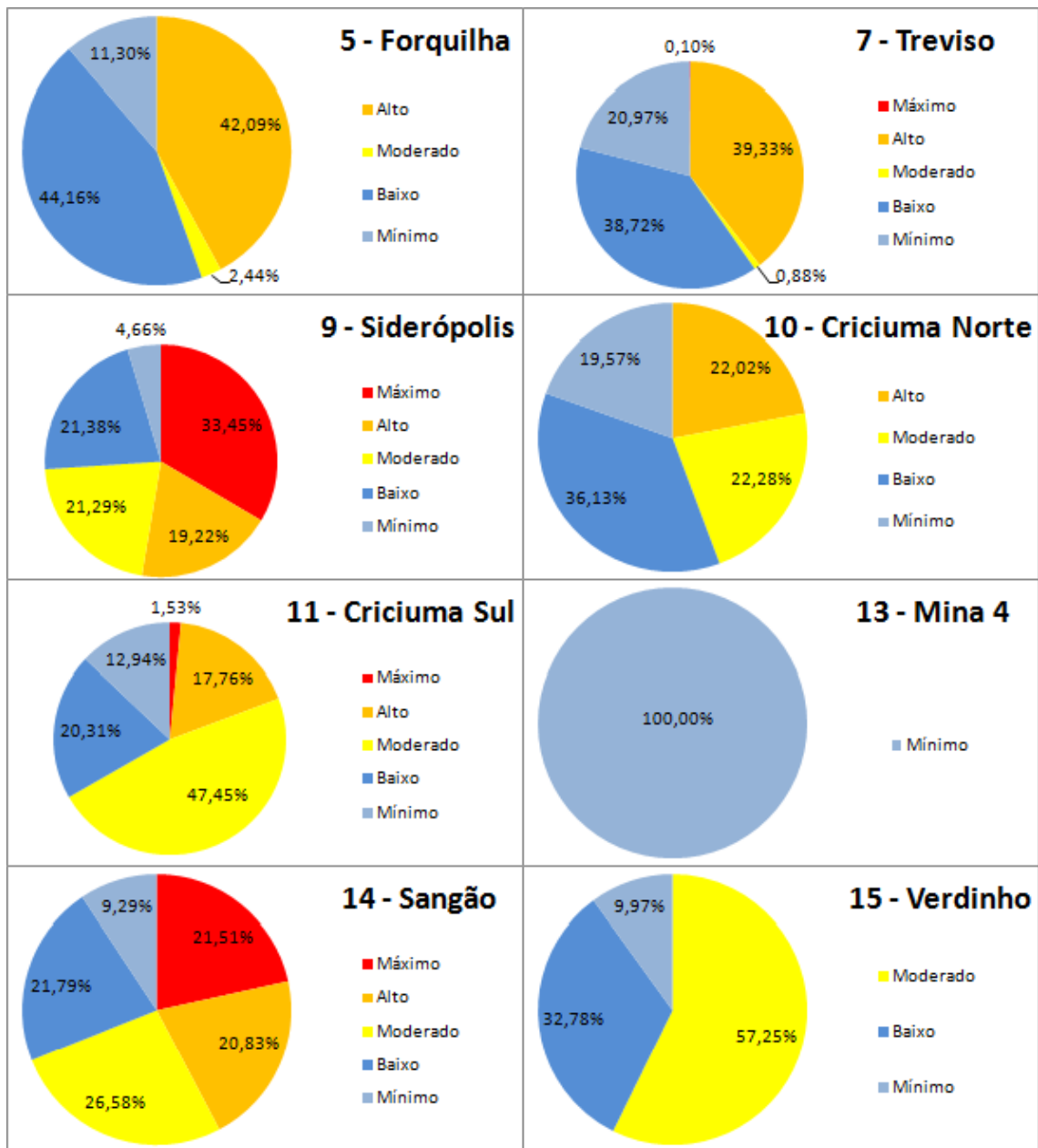


Figura 5.15 – Risco de contaminação nas áreas degradadas separado por distritos.

Treviso (59,69%), Criciúma Norte (55,70%) e Forquilha (55,47%) são os distritos onde mais da metade das áreas estão em regiões com risco baixo ou mínimo. Combinação da vulnerabilidade moderada e o moderado potencial de dano ambiental são predominantes nesses distritos.

Criciúma Sul, também, possui vulnerabilidade moderada predominante em suas áreas, mas a cobertura do solo no distrito é classificada como sendo de extremo e alto potencial de dano ambiental, resultando em uma grande parte da



área com risco moderado (47,45%) e, também, áreas com risco alto (17,76%) e máximo (1,53%).

O distrito de Mina 4 tem toda a sua área considerada como risco mínimo. Apesar de ter mais de um terço de sua área classificada com o índice de extremo potencial de dano ambiental, está sobre uma região com vulnerabilidade negligenciável.

Na Tabela 5.8, os distritos são hierarquizados de acordo com os riscos apresentados, do menor para o maior, considerando a soma das áreas com riscos mínimo, baixo e moderado.

Tabela 5.8 – Hierarquização dos riscos.

Distritos		Níveis de Risco	%
13	Mina 4	Mínimo	100,00
		Baixo	0,00
		Moderado	0,00
		Alto	0,00
		Máximo	0,00
15	Verdinho	Mínimo	9,97
		Baixo	32,78
		Moderado	57,25
		Alto	0,00
		Máximo	0,00
13	Criciúma Sul	Mínimo	12,94
		Baixo	20,31
		Moderado	47,45
		Alto	17,76
		Máximo	1,53
10	Criciúma Norte	Mínimo	19,57
		Baixo	36,13
		Moderado	22,28
		Alto	22,02
		Máximo	0,00
7	Treviso	Mínimo	20,97
		Baixo	38,72
		Moderado	0,88
		Alto	39,33
		Máximo	0,10
5	Forquilha	Mínimo	11,30
		Baixo	44,16
		Moderado	2,44
		Alto	42,09
		Máximo	0,00
14	Sangão	Mínimo	9,29
		Baixo	21,79
		Moderado	26,58
		Alto	20,83
		Máximo	21,51
9	Siderópolis	Mínimo	4,66
		Baixo	21,38
		Moderado	21,29
		Alto	19,22
		Máximo	33,45

## 6 Conclusões

Com o objetivo de realizar uma avaliação de risco de contaminação dos sistemas de aquíferos na bacia hidrográfica do rio Mãe Luzia, a presente dissertação buscou integrar as informações referentes à hidrogeologia, geologia, profundidade do sistema de aquíferos e das áreas com potencial de dano ambiental para avaliar o risco nas áreas degradadas pela exploração do carvão mineral na região.

Para calcular o índice de vulnerabilidade natural dos sistemas de aquíferos na bacia hidrográfica do Rio Mãe Luzia pela metodologia GOD, três parâmetros foram utilizados, quais sejam, tipo de ocorrência da água subterrânea (G - Groundwater occurrence), litologias gerais dos aquíferos ou aquíferos (O - Overall Litology of Aquifer or Aquitard) e profundidade do nível freático (D - Depth to Groundwater Table). Com a utilização da álgebra de mapas foi possível realizar o mapeamento da vulnerabilidade, verificando que o índice de alta vulnerabilidade está localizado na região central a norte, devido ao fato de os sistemas de aquíferos nessas regiões serem livres e apresentarem uma profundidade pequena, de no máximo 10 metros. Considerando somente as áreas previamente impactadas pelo carvão, o que predominam são as regiões com vulnerabilidade alta e moderada (80,12%).

O mapeamento das áreas com potencial de dano ambiental mostrou que uma grande parte das áreas impactadas não sofreu intervenção para a sua recuperação, sendo a categoria de extremo potencial de dano ambiental (regiões com rejeito ou estéril exposto, vegetação espontânea e lagoas ácidas) predominante nas áreas degradadas (40,33%).

Para a construção do mapa de risco foi feita a integração vulnerabilidade e das áreas com potencial de dano ambiental, chegando ao quadro atual de risco de contaminação dos sistemas de aquíferos na bacia do Rio Mãe Luzia nas áreas degradadas pela exploração do carvão mineral na região. Através da metodologia apresentada neste trabalho observou-se que existe elevado risco de contaminação em grande parte da área de estudo.

A espacialização da vulnerabilidade natural e da avaliação de risco se mostrou uma ferramenta de grande utilidade para a recuperação das áreas impactadas pela indústria carbonífera, pois por meio de sua representação em forma de mapa pode-se alocar melhor os recursos disponíveis para sua execução. No entanto é

importante salientar que condições locais devem ser levadas em consideração, como fraturas, poços e galerias subterrâneas que podem representar riscos locais.

A utilização de um Sistema de Informação Geográfica se mostrou eficiente na integração, análise e interpretação dos dados disponíveis. Deste modo mostra-se que as geotecnologias podem ser utilizadas como importantes ferramentas para auxiliar gestores, não só da área ambiental, mas de diferentes áreas, apenas sendo necessária uma mudança de dados e de variáveis a serem analisadas. Com isto é possível priorizar áreas de interesse, proporcionando maior agilidade e qualidade nas análises.

Essa dissertação focou-se no estudo da influência das áreas superficiais onde ocorreram ou ainda ocorrem atividades ligadas à atividade carbonífera, não sendo considerado nenhum outro tipo de influência. Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Incluir na avaliação de risco as galerias subterrâneas e seu potencial poluidor para um estudo mais aprofundado do risco de contaminação dos sistemas de aquíferos;
- Considerar outras fontes potenciais de dano ambiental na área de avaliação de risco, como postos de gasolinas, cemitérios, aterros sanitários, áreas sem saneamento etc., para um diagnóstico mais completo;
- Estudos geofísicos e geoquímicos; plumas de contaminação; visando à validação do modelo de potencial de risco apresentado.

## Referências Bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas. 2006. *NBR 12212/2006 – Projeto de poços para a captação de água subterrânea*. Rio de Janeiro, 10 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas. 2006. *NBR 12244/2006 - Poço tubular - Construção de poço tubular para captação de água subterrânea*. Rio de Janeiro, 10 p.

AGUIAR, L. A.; ARAUJO, G. H.; ALMEIDA, J. R.; SOARES, P. S.; POSSA, M. V. 2008. *Análise e Avaliação de Risco Ambiental como Instrumento de Gestão em Instalações de Mineração*. Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, pp. 213-235.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETY, R. J.; HACKET, G. 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution hydrological settings*. USEPA Office of Research and Development, USA, 641p.

ANA – Agência Nacional de Águas. 2007. *Panorama do enquadramento dos corpos d'água do Brasil e Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil* (Caderno de Recursos Hídricos, 5). Brasília, ANA, 123p.

AS/NZS - Australian/ New Zealand Standard. 2004. *AS/NZS 4360/2004 - Risk Management*, 34 p.

BABIKER, I. S.; MOHAMED, A. A. M.; HIYAMA, T.; KATO, K. 2005. *A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan*. Science of the Total Environment, Vol. 345, p. 127-140;

BELLOLI, M.; GUIDI, A.; QUADROS, J. 2002. *História do Carvão de Santa Catarina*. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 287p.

CAMACHO, E. N. 2004. *Uma Proposta de Metodologia para Análise Quantitativa de Riscos Ambientais*. Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 140p.

CAMPONOGARA, I. 2006. *Vulnerabilidade Natural do Sistema Aquífero Guarani, em Santa do Livramento, RS, com Uso de Geotecnologias*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geomática, Universidade Federal de Santa Maria, 111p.

CIMINELLI, V. S.T.; SALUM, M. J. G.; RUBIO, J.; PERES, A. E. C. 2006. *Água e a Mineração*. Águas Doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo, Escrituras Editora, pp. 433-460.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. 2008. Resolução CONAMA nº 396. Disponível em:< [www.mma.gov.br/conama](http://www.mma.gov.br/conama)> Acesso em 17/04/2011.

COSTA, S. S. 2002. *Atividade Carbonífera no sul de Santa Catarina e suas Conseqüências Sociais e Ambientais, Abordadas através de análises Estatísticas Multiderivadas*. Tese de Doutorado. Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 180p.

DNPM. 2006. *Anuário Mineral Brasileiro*. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral

EASTMAN, J. R. 1998. *IDRISI for Windows: Introdução e Exercícios tutoriais*. Editores da versão em português, Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre, UFRGS Centro de Recursos Idrisi.

EPAGRI/CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. 2009 -. Disponível em: <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em: 25 set. 2009.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. 1987. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima. WHO/PAHO/HPE/CEPIS, 87p.

GIUPPONI, C.; EISELT, B.; GHETTI P. F. 1999. *A multicriteria approach for mapping risks of agricultural pollution for water resources: the Venice Lagoon watershed case study*. Journal of Environmental Management Vol. 56, p 259-269

GTA - Grupo Técnico de Assessoramento da ACP Nº 2000.72.04.002543-9/SC, Terceiro Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambiental. Disponível em: <<https://www.jfsc.jus.br/acpdocarvao/index.php>>. Acesso em: 10 dez. 2009.

KONTOPOULOS. A. 1998. *Acid Mine Drainage Control*. Effluent Treatment in the Mining Industry. University of Concepcion, Chile, p.57–118.

KREBS, A. S. J. 2004. *Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, 375 p.

LAHR, J.; KOOISTRA, L. 2010. *Environmental risk mapping of pollutants: State of the art and communication aspects*. Science of the Total Environment vol. 408, p.3899–3907

LEAL, O. 1997. *Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife*. Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife. Série Recursos Hídricos. Volume 2 . República Federativa do Brasil, Ministério de Minas e Energia, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 28p.

LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M.F, RHIND, D. W. 2005. *Geographical Information Systems and Science* – 2 Ed. John Wiley & Sons Ltd, England, 536p.

MARQUEZAN, R. G. 2008. *Análise de recursos digitais como ferramentas de avaliação em ações de proteção de aquíferos no trajeto de oleodutos*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 184 p.

MARTINS, A. A. 2005. *Sócio-economia do Carvão em Santa Catarina: uma Contribuição ao Estudo de Sua Trajetória*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Economia. Universidade Federal de Santa Catarina, 185p.

MATTA M. S. A. et al. 2007. *Vulnerabilidade e risco de contaminação do sistema aquífero superior da região de Barcaena/PA* . In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. São Paulo.

MCKENSEY, B. R. 1997. *Risk Management Handbook for the Mining Industry- MDG 010* (NSW Department of Mineral Resources). 96p.

MORIWAKI, H. 2005. *Informativo para técnicos de controle ambiental nas atividades de mineração*. Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA), Brasília.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1993. *Ground water vulnerability assessment—predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty*. Committee on Techniques for Assessing Ground Water Vulnerability, National Research Council, National Academy Press, Washington, 204p.

NIETO. J.M.; SARMIENTO. A. M.; OLIAS. M.; CASANOVA. C.R.; RIBA. I.; Kalman. J.; DELVALLS. T.A. 2007. *Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary*. Environment International Vol. 33, p.445-455.

NOBRE, R. C. M. et al. 2007. *Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool*. Journal of Contaminant Hydrology Vol.94, p277-292.

POLZ, J. A. 2008. *Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração a Céu Aberto em Santa Catarina: Gestão de Rejeitos e Revegetação*. Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, pp. 75-94.

QUADROS, T. F. P. 2000. *Integração de dados em ambiente SIG para mapeamento de favorabilidade mineral de ouro na Ilha Cristalina de Rivera (Uruguai)*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 285p..

RAHMAN, A. 2008. *A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India*. Applied Geography Vol.28, p.32-53.

REBOUÇAS, A.C. 2006. *Águas Subterrâneas*. Águas Doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo, Escrituras Editora, p.111-144.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. 1997. *Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica da bacia do rio Araranguá: caracterização hidrológica*. Florianópolis, 9v.

SANTOS, M. A. 1995. *Crescimento e Crise na Região Sul de Santa Catarina*. Dissertação de Mestrado. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Santa Catarina, 190p.

SCHEIBE, L. F. 2002. *O Carvão em Santa Catarina: Mineração e Conseqüências Ambientais*. Meio Ambiente e Carvão: Impactos da Exploração e Utilização. Porto Alegre, FINEP / CAPES / PADCT / GTM / PUCRS / UFSC / FEPAM, p.45-66

SCHEIBE, L. F.; BUSS, M. D.; FURTADO, S. M. A. 2010. *Atlas ambiental da bacia do rio Araranguá : Santa Catarina - Brasil*. Florianópolis : Cidade Futura, 64 p.

SNSA - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. 2010. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2008*. Brasília, MCIDADES. SNSA, 408p.

SDM - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. 1997. *Bacias Hidrográficas do Estado de Santa Catarina: diagnostico geral*. Florianópolis.

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 2010. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/portalsnirh/>>. Acesso em: 15 ago. 2010.

THAPINTA, A.; HUDAK, P. F. 2003. *Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand*. Environment International vol. 29, p.87-93.

TIXIER, J.; DUSSERRE, G.; SALVI, O.; GASTON, D. 2002. *Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries Vol.15 p.291-303.

UBALDO, M. O.; SOUZA, V. P. 2008. *Controle e Mitigação da Drenagem Ácida em Operações de Mineração*. Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p.129-151.

USEPA – United State Environmental Protection Agency. 1998. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*, Washington, 188p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. 1975. *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 245p.

VILLELA, R. 1989. Mineração de carvão em Santa Catarina e o meio ambiente. In: ENC. NAC. EST. SOBRE MEIO AMBIENTE, 2.,1989, Florianópolis. Florianópolis, Depto. Geociências da UFSC, v.3 . p. 50-61

VRBA, J. AND ZAPOROTEC, A. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. IAH International Contribution for Hydrogeology, Vol. 16, Heise, 131p.

SIECESC - Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina. 2010. *Carvão Mineral – Dados Estatísticos: 2010*. Criciúma. 12p.

SIAGAS. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Disponível em : <<http://siagasweb.cprm.gov.br>>. Acesso em: 10 ago. 2010.

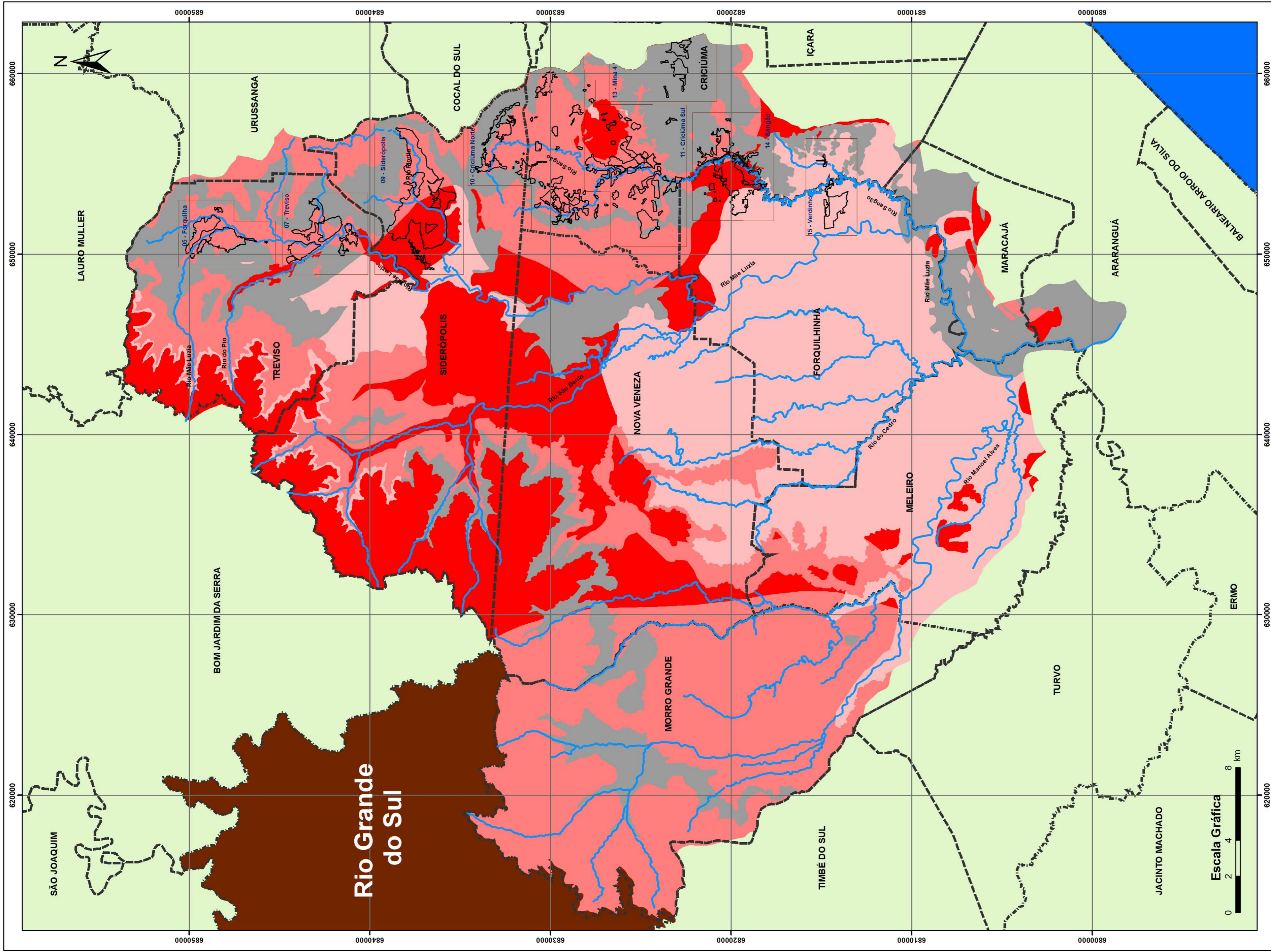


## **Anexo 1 - Mapa de Vulnerabilidade**

## **Anexo 2 - Mapa de cobertura atual do solo**

## **Anexo 3 - Mapa de potencial de dano ambiental**

## **Anexo 4 - Mapa de Risco**



**Legenda**

	<b>Vulnerabilidade</b>
Extremo	
Alto	
Moderado	
Baixo	
Negligenciável	

	Limites Municipais
	Distritos
	Área Degradada
	Hidrografia

**Mapa de Vulnerabilidade**

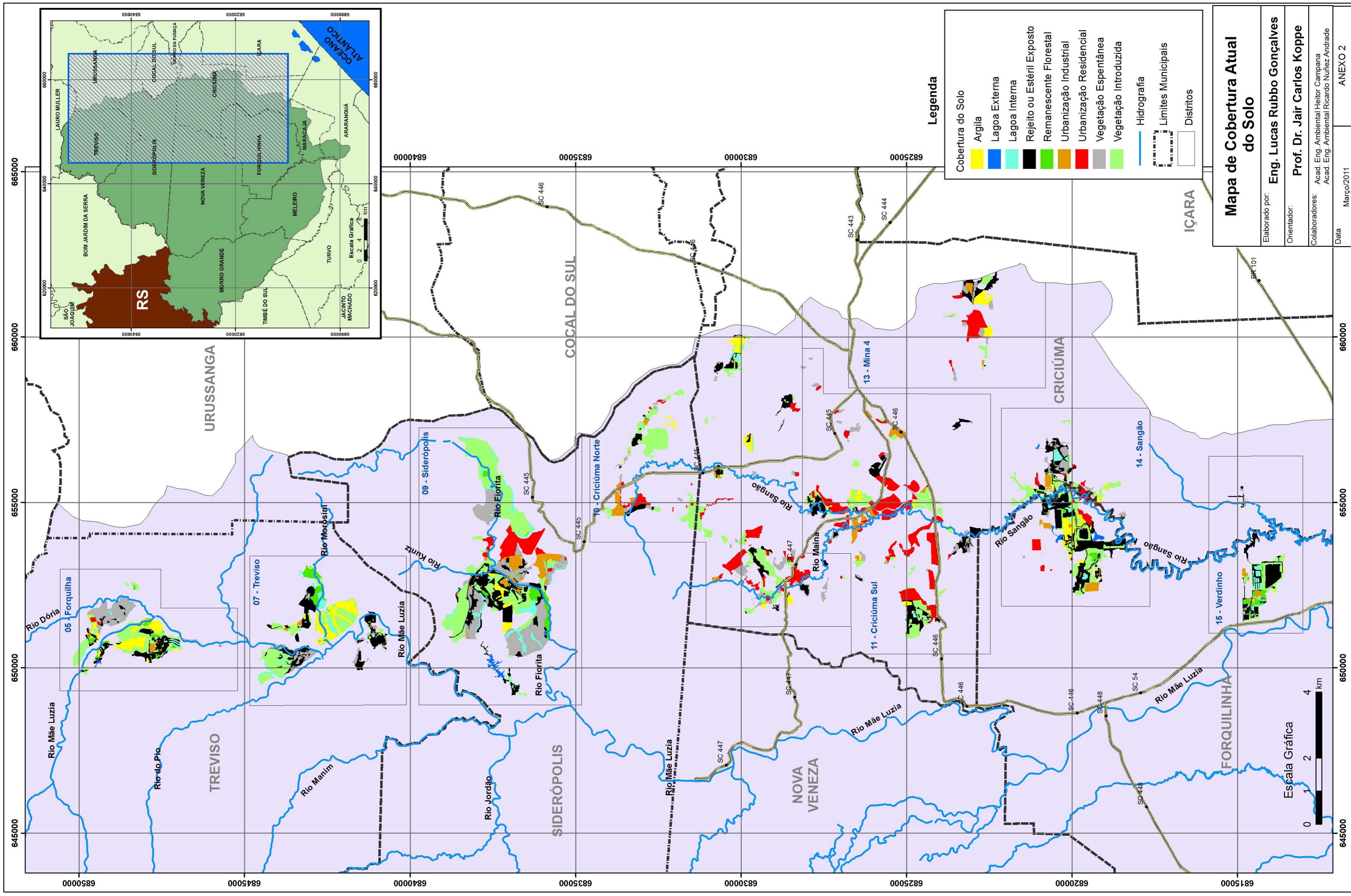
Elaborado por: **Eng. Lucas Rubbo Gonçalves**

Orientador: **Prof. Dr. Jair Carlos Koppe**

Colaboradores: Acad. Eng. Ambiental Heitor Campana  
Acad. Eng. Ambiental Ricardo Nuñez Andrade

Data: Março/2011

ANEXO 1

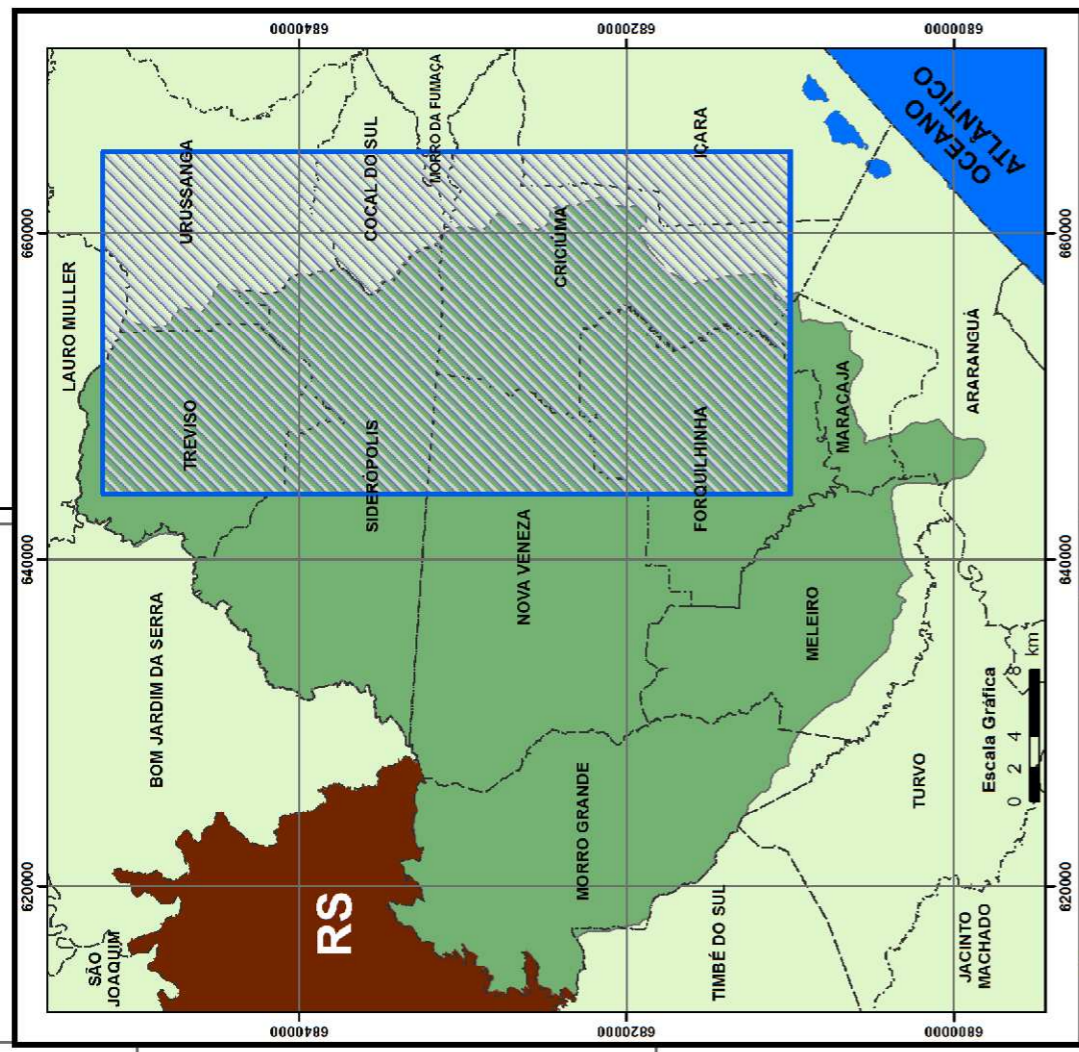
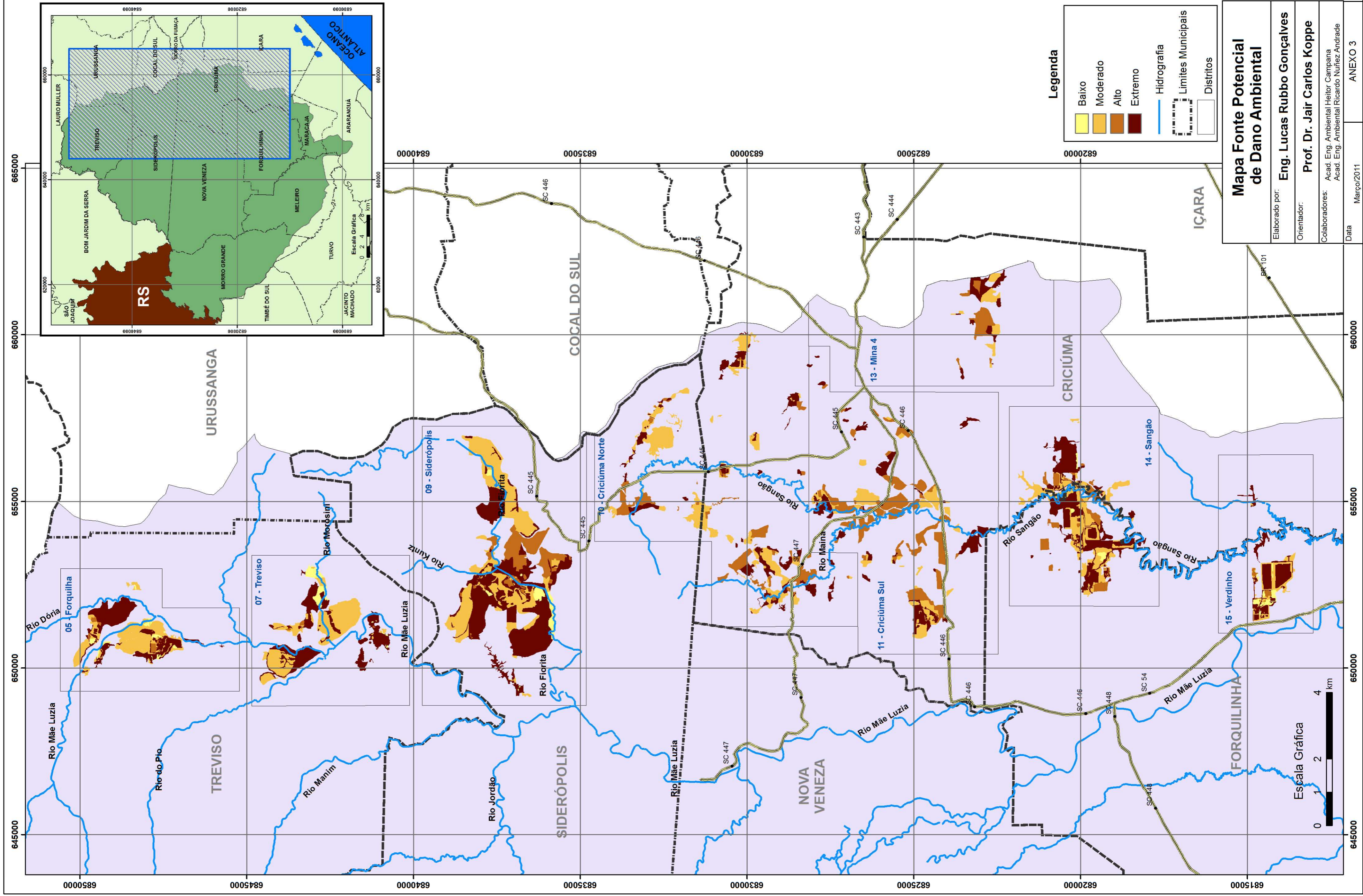


**Legenda**

- | Cobertura do Solo |                            |
|-------------------|----------------------------|
| [Yellow]          | Argilla                    |
| [Blue]            | Lagoa Externa              |
| [Light Blue]      | Lagoa Interna              |
| [Black]           | Rejeito ou Estéril Exposto |
| [Green]           | Remanescente Florestal     |
| [Orange]          | Urbanização Industrial     |
| [Red]             | Urbanização Residencial    |
| [Grey]            | Vegetação Espontânea       |
| [Light Green]     | Vegetação Introduzida      |
| [Blue Line]       | Hidrografia                |
| [Dashed Line]     | Limites Municipais         |
| [Dotted Line]     | Distritos                  |

**Mapa de Cobertura Atual do Solo**

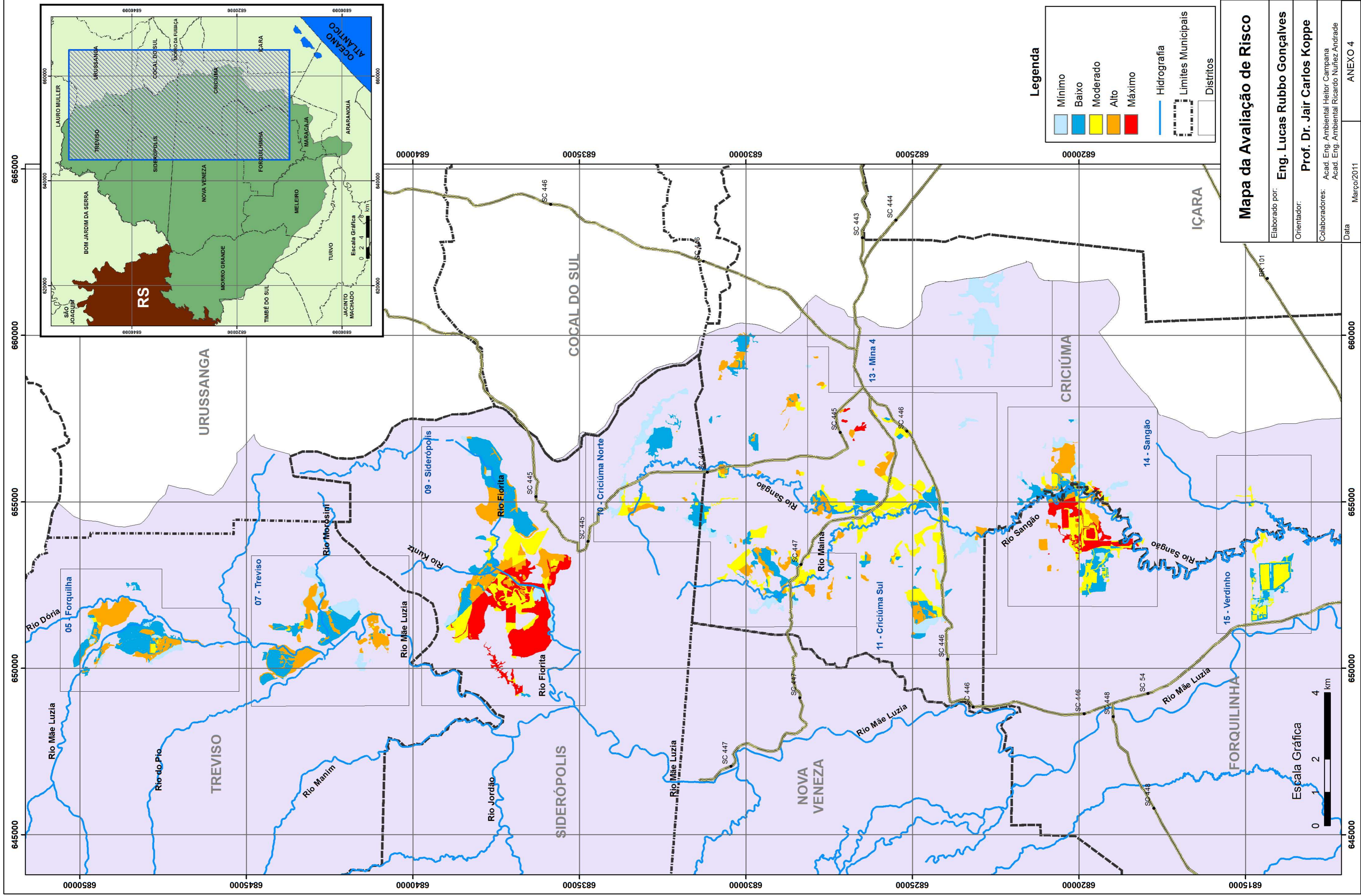
Elaborado por: **Eng. Lucas Rubbo Gonçalves**  
 Orientador: **Prof. Dr. Jair Carlos Koppe**  
 Colaboradores: Acad. Eng. Ambiental Heitor Campana  
 Acad. Eng. Ambiental Ricardo Nuñez Andrade  
 Data: Março/2011 ANEXO 2



**Legenda**

- Baixo
- Moderado
- Alto
- Extremo
- Hidrografia
- Limites Municipais
- Distritos

**Mapa Fonte Potencial de Dano Ambiental**  
 Elaborado por: Eng. Lucas Rubbo Gonçalves  
 Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
 Colaboradores: Acad. Eng. Ambiental Heitor Campana  
 Acad. Eng. Ambiental Ricardo Nuñez Andrade  
 Data: Março/2011 ANEXO 3



**Mapa da Avaliação de Risco**

Elaborado por: **Eng. Lucas Rubbo Gonçalves**

Orientador: **Prof. Dr. Jair Carlos Koppe**

Colaboradores: Acad. Eng. Ambiental Heitor Campana  
Acad. Eng. Ambiental Ricardo Nuñez Andrade

Data: Março/2011

ANEXO 4