

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

RAFAEL GONÇALVES SANTOS

GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO DO
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC, NO SISTEMA
AQUÍFERO GUARANI EM RIBEIRÃO BONITO - SP.

Rio Claro - SP
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

RAFAEL GONÇALVES SANTOS

GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO DO
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC, NO SISTEMA
AQUÍFERO GUARANI EM RIBEIRÃO BONITO - SP.

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

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Sturaro
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mara Lúcia Marques

Rio Claro - SP
2014

RAFAEL GONÇALVES SANTOS

GEOPROCESSAMENTO APLICADO AO MAPEAMENTO DO
ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC, NO SISTEMA
AQUÍFERO GUARANI EM RIBEIRÃO BONITO - SP.

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

Comissão Examinadora

Rio Claro, SP ____ de _____ de _____

AGRADECIMENTOS

A minha admiração e os meus sinceros e especiais agradecimentos ao Prof. Dr. José Ricardo Sturaro, pela oportunidade, confiança, paciência, e compreensão que contribuíram para a realização deste trabalho.

De igual modo, reconheço e agradeço toda a atenção e ajuda prestada pela Dra. Mara Lúcia Marques, pelo carinho, paciência e amizade, como professora de graduação e co-orientadora desta dissertação de mestrado.

À Prof. Dra. Paulina Setti Riedel, agradeço o convite e a oportunidade, por ser a precursora e mediadora da realização deste mestrado em Geociência e Meio Ambiente.

Ao Prof. Dr. Didier Gastmans pelo apoio, sugestões e discussões em temas relevantes desta pesquisa.

À Prof. Dra. Maria Isabel Castreghini de Freitas, pela ajuda no desenvolvimento e revisão criteriosa do trabalho.

Aos funcionários da Unesp – Rio Claro, em especial à querida secretária da pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente Rosangela Vacello e à técnica e amiga Darlene de Cássia Armbrust, pelo indispensável apoio técnico no decorrer do trabalho.

Aos meus familiares e em especial a minha mãe, pelo amor carinho, e compreensão durante esse período.

Aos meus amigos e companheiros Tiago, Ludmila, Júlio, Paulo, Frank, e Keile, obrigado pelo apoio e por sempre estarem comigo.

À CAPES pela concessão de bolsa durante o período de realização do mestrado.

À todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o mapeamento da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guarani no município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo, mediante a aplicação dos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*. A análise da vulnerabilidade buscou identificar áreas vulneráveis à contaminação, por meio do uso de técnicas de geoprocessamento, análise e integração de dados em SIG. A caracterização do uso e cobertura da terra foi delineada mediante o uso de imagem LANDSAT 5 (TM) e técnicas de sensoriamento remoto. Na metodologia, foram utilizados os softwares SPRING, eCognition e ArcGis, durante as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento, sendo identificadas sete tipologias distintas: Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias (Cana-de-Açúcar e Cítricos), Áreas de Reflorestamento, Áreas de Vegetação Natural, Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, Áreas de Vegetação Rasteira, Áreas Urbanizadas e Água. Os resultados indicam que, em ambos os índices de vulnerabilidade, o percentual de áreas com alta vulnerabilidade, mostrou-se superior ao somatório das áreas com baixa e média vulnerabilidade. Com relação à análise de uso e cobertura da terra, as principais atividades mapeadas, como as Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias e as Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, quando somadas ultrapassam mais da metade da área total do município, confirmando o potencial agrícola do município de Ribeirão Bonito, justificando a implementação do DRASTIC *Pesticida*. Verificou-se que todos os usos e coberturas da terra no município de Ribeirão Bonito, apresentam mais da metade de suas áreas em terrenos de alta vulnerabilidade. Os principais usos e coberturas potencialmente poluidores, como as Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, Áreas Urbanizadas e Áreas de Uso Não Identificado, localizam-se principalmente em áreas de alta e média vulnerabilidade, elevando a vulnerabilidade SAG, o qual encontra-se em área aflorante. O mapeamento da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito constitui uma importante ferramenta e instrumento de gestão pública, fornecendo ao município, diretrizes para o gerenciamento das atividades a serem instaladas, colaborando para o melhor e ordenamento do atual uso e cobertura da terra e atuando na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, com vistas a minimizar os impactos em áreas de recarga do SAG.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Sistema Aquífero Guarani; Índice de Vulnerabilidade de Aquíferos DRASTIC; Uso e Cobertura da Terra; Ribeirão Bonito.

ABSTRACT

The present work provides the vulnerability mapping of the Guarani Aquifer System in Ribeirão Bonito, municipally located at the center of São Paulo state, through the application of DRASTIC and DRASTIC Pesticide indices. The vulnerability analyses searched to identify vulnerable areas to contamination, through the use of geoprocessing technics, analyses and index integration in SIG. The characterization of the land use and land cover was outlined through the use of LANDSAT 5 (TM) images and techniques of remote sensing. In the methodology were used the softwares SPRING, eCognition and ArcGis during the steps of Pré-processing, Processing and Post-processing, being identified seven distinct typologies: Areas of Agriculture and Temporary Culture (Sugar Cane and Citrus), Reforestation Areas, Natural Vegetation Areas, Agriculture Areas of Use Non Identified, Low Scrubland Areas, Urban Areas and Water. The results indicated that, in both vulnerability indices, the percentage of areas with high vulnerability shows itself higher than the sum of areas with low and mid vulnerability. With regard to the land use and land cover, the principal mapped activities, as Areas of Agriculture and Temporary Culture and the Agricultural Areas of Use Non Identified, when summed go beyond the half total area of the municipality, confirming the agriculture potential of Ribeirão Bonito, justifying the implementation of DRASTIC Pesticide. It was found that all the land use and land cover in the Municipality of Ribeirão Bonito presents more than half of your areas in high vulnerability lands. The main polluters potentially of use and land cover as Areas of Agriculture and Temporary Culture, Urban Areas and Agricultural Areas of Use Non Identified, are located mainly in high and mid vulnerability areas, raising the SAG vulnerability, which is found in outcropping area. The mapping of the SAG vulnerability in Ribeirão Bonito constitutes an important tool and instrument of public administration, providing to the municipally, guidelines to activities management to be installed, collaborating to the best ordering of the actual use and land cover, and acting in the protection of groundwater resources, with views to minimize the impacts in SAG recharge areas.

Key-Words: Geoprocessing; Guarani Aquifer System; Index of DRASTIC Aquifer Vulnerability; Land Use and Land Cover; Ribeirão Bonito.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa esquemático do SAG (BOSCARDIN BORGHETTI et al, 2004).....	20
Figura 2	Parâmetros utilizados no método DRASTIC (OLIVEIRA E LOBO FERREIRA, 2004).....	24
Figura 3	Escala de Vulnerabilidade DRASTIC (MELO JUNIOR, 2008).....	28
Figura 4	Localização da área de estudo em Ribeirão Bonito - SP.....	35
Figura 5	Principais formações geológicas do município de Ribeirão Bonito.....	36
Figura 6	Geomorfologia do município de Ribeirão Bonito.....	37
Figura 7	Principais tipos de solos encontrados no município de Ribeirão Bonito.....	38
Figura 8	Hipsometria do município de Ribeirão Bonito.....	40
Figura 9	Principais bacias hidrográficas do município de Ribeirão Bonito.....	41
Figura 10	Espessura do SAG no município de Ribeirão Bonito.....	42
Figura 11	Precipitação média anual do município de Ribeirão Bonito.....	43
Figura 12	Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	44
Figura 13	Fluxograma dos procedimentos metodológicos para o DRASTIC.....	46
Figura 14	Fluxograma de entrada de dados temáticos (GOMES, 2005).....	49
Figura 15	Fluxograma das representações Geo-Campos (GOMES, 2005).....	50
Figura 16	Fluxograma de PDI e softwares utilizados.....	55
Figura 17	Profundidade da zona não-saturada (D), no município de Ribeirão Bonito.	64
Figura 18	Taxas de Recarga (R) do SAG, no município de Ribeirão Bonito.....	65
Figura 18	Material do aquífero (A) no município de Ribeirão Bonito	66
Figura 20	Classes de tipos de solo (S) no município de Ribeirão Bonito.....	67
Figura 21	Topografia (T) do município de Ribeirão Bonito.....	69
Figura 22	Impacto da Zona não-saturada (I) do SAG, no município de Ribeirão Bonito.....	70
Figura 23	Condutividade Hidráulica (C) do SAG, no município de Ribeirão Bonito..	71
Figura 24	Vulnerabilidade do Aquífero Guarani no Município de Ribeirão Bonito....	73
Figura 25	DRASTIC <i>Pesticida</i> aplicado ao mapeamento da vulnerabilidade no Município de Ribeirão Bonito.....	76
Figura 26	Comparação entre o mapeamento dos índices DRASTIC e DRASTIC <i>Pesticida</i>	79
Figura 27	Resultados do realce e filtragem da imagem.....	82

Figura 28	Resultados da segmentação multi-resolução no eCognition.....	83
Figura 29	Resultados da segmentação e classificação no eCognition.....	83
Figura 30	Mapa de uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito – SP....	85
Figura 31	Classes de uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito – SP: a) Áreas Agrícolas, cultivos de cana-de-açúcar, b) Áreas Agrícolas, cultivos de cítricos, c) Áreas não Agrícolas, d) Reflorestamento, e) Vegetação Nativa.	86
Figura 32	Índice de Vulnerabilidade DASTIC <i>Pesticida</i> nos usos e coberturas da terra do município de Ribeirão Bonito – SP.....	88
Figura 33	Mapa de uso e cobertura da terra e índice DRASTIC na rede de drenagem do município de Ribeirão Bonito – SP.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Descrição dos materiais utilizados	47
Tabela 2	Fontes dos dados para elaboração do DRASTIC	47
Tabela 3	DRASTIC e percentuais de ponderação no ArcGis 10.1	53
Tabela 4	DRASTIC <i>Pesticida</i> percentuais de ponderação no ArcGis 10.1	53
Tabela 5	Descrição dos materiais utilizados	55
Tabela 6	Características dos dados orbitais utilizados no trabalho	56
Tabela 7	Arranjos dos Níveis de Segmentação	60
Tabela 8	Valores da ponderação do DRASTIC	72
Tabela 9	Índice DRASTIC	73
Tabela 10	Valores da ponderação do DRASTIC <i>Pesticida</i>	75
Tabela 11	Índice DRASTIC <i>Pesticida</i>	76
Tabela 12	Parâmetros de Registro Imagem x Imagem	80
Tabela 13	Matriz de Covariância.	80
Tabela 14	Matriz de Correlação.	81
Tabela 15	Classes de uso e cobertura da terra.	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos.	23
Quadro 2	Parâmetros e variáveis do DRASTIC	26
Quadro 3	Parâmetros DRASTIC da Área de Estudos	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAG	Sistema Aquífero Guarani
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UGRHI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PC	Personal Computer
MDE	Modelo Digital de Elevação
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
TM	Thematic Mapper (Mapeador Temático)
UNESP	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
UTM	Universal Transversa de Mercator
PDI	Processamento Digital de Imagem
APC	Análise das Principais Componentes
WGS	World Geodetic System (Sistema Geodésico Global)
OEA	Organização dos Estados Americanos
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
APP	Área de Preservação Permanente
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite (Satélite de Detecção Remota da Terra)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	11
1.1 – JUSTIFICATIVAS.....	13
1.2 – OBJETIVOS.....	16
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 - SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG).....	19
2.1.1 – SAG – Confinado.....	19
2.1.2 – SAG – Livre.....	21
2.2 - VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFEROS.....	21
2.2.1 – Principais Fontes de Contaminação e Poluição.....	22
2.2.2 – Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos.....	22
2.2.3 – Índice DRASTIC e DRASTIC <i>Pesticida</i>	24
2.2.4 - Descrição da metodologia DRASTIC.....	28
2.2.5 - Escala de vulnerabilidade para os Índices Finais DRASTIC.....	28
2.2.6 – Limitações dos Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural.....	29
2.2.7 - Construção de Mapas de Vulnerabilidade.....	29
2.3 – GEOPROCESSAMENTO.....	31
2.4 – SENSORIAMENTO REMOTO.....	32
2.5 – USO E COBERTURA DA TERRA.....	33
CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.....	35
3.1 – GEOLOGIA.....	36
3.2 – GEOMORFOLOGIA.....	37
3.3 – PEDOLOGIA.....	38
3.4 – HIPSOMETRIA.....	40
3.5 – HIDROGRAFIA.....	40
3.5.1 - Bacias Hidrográficas.....	41
3.5.2 - SAG em Ribeirão Bonito.....	41
3.6 – CLIMATOLOGIA.....	42

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	44
4.1 – GEOPROCESSAMENTO.....	44
4.1.1 - Definição dos Equipamentos e Aplicativos.....	45
4.1.2 – SIG Aplicado ao Mapeamento do Índice DRASTIC.....	46
4.1.2.1 – Fase I: Aquisição e seleção de Dados.....	46
4.1.2.1.1 - Seleção de Materiais.....	47
4.1.2.1.1.1 – Dados Temáticos.....	47
4.1.2.1.1.2 – Cartas Topográficas.....	47
4.1.2.1.1.3 – Dados Orbitais.....	48
4.1.2.2 – Fase II: Banco de Dados.....	48
4.1.2.2.1 – Entrada de Dados.....	49
4.1.2.3 - Fase III: Manipulação e Análise dos Dados.....	49
4.1.2.3.1 – Álgebra de Mapas.....	49
4.1.2.3.1.1 – Geo-Campos Temáticos.....	50
4.1.2.3.2 – Integração e Manipulação de dados em SIG.....	50
4.1.2.3.3 – Somatório dos Pesos Inferidos aos Parâmetros e Variáveis do DRASTIC e DRASTIC <i>Pesticida</i>	51
4.1.2.3.4 - Análise Multicritério - Weighted Overlay (ArcGis 10.1)....	51
4.2 – SENSORIAMENTO REMOTO.....	54
4.2.1 – Fase I: Pré-Processamento e Aquisição de Dados Orbitais.....	55
4.2.1.1 - Seleção de Materiais.....	55
4.2.1.2 – Dados Orbitais.....	56
4.2.1.3 – Pré-Processamento.....	56
4.2.1.3.1 – Correção Geométrica e Registro da Imagem.....	56
4.2.2 – Fase II – Processamento.....	57
4.2.2.1 – Realce.....	47
4.2.2.1.1 - Análise dos Principais Componentes (APC).....	58
4.2.2.1.2 – Contraste (Linear e Equalização).....	58
4.2.2.2 – Filtragem.....	59

4.2.2.3 – Segmentação (Multi Resolução).....	59
4.2.2.4 – Classificação (Baseada no Objeto).....	60
4.2.3 – Fase III - Pós-Processamento.....	61
4.2.3.1 – Pós-Classificação e Validação dos Resultados.....	61
4.2.3.2 – Extração de Atributos e Reconhecimento de Padrões.....	62
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1 – PARÂMETROS DRASTIC.....	63
5.1.1 – Profundidade da Zona Não-Saturada (D).....	63
5.1.2 – Recarga do Aquífero (R).....	64
5.1.3 – Material do Aquífero (A).....	65
5.1.4 – Tipo de Solo (S).....	66
5.1.5 – Topografia (T).....	68
5.1.6 – Material da Zona Não-Saturada (I).....	70
5.1.7 – Condutividade Hidráulica (C).....	71
5.2 - ÍNDICE DRASTIC.....	72
5.3 - DRASTIC PESTICIDA.....	75
5.4 - USO E COBERTURA DA TERRA.....	80
5.4.1 - Pré-processamento.....	80
5.4.2 – Processamento.....	80
5.4.2.1 Realce de Imagens.....	80
5.4.2.2 – Segmentação e Classificação.....	82
5.4.3 - Pós-processamento.....	84
5.4.3.1 – Reconhecimento de Padrões e Extração de Atributos.....	84
5.4.3.2 – Mapa temático.....	84
5.5 - ÍNDICE DRASTIC <i>Pesticida</i> NOS USOS E COBERTURAS DA TERRA..	87
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	94
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A água é o elemento natural presente em todas as atividades desenvolvidas pelo homem, sendo um dos recursos naturais que mais apresentaram aumento na exploração nas últimas décadas. Avalia-se que todas as atividades que necessitam de seu uso, tais como: a recreação, indústria, agricultura, produção de energia, navegação e principalmente o abastecimento público, também podem ser consideradas potencialmente poluentes, com variação de intensidade e formas (ALBERTI e SILVA, 2005).

Segundo Dorst (1973), a conservação da natureza e a exploração racional dos recursos hídricos, são problemas que remontam desde o surgimento do homem, influenciando no seu habitat, a partir da exploração em seu proveito, alterando o equilíbrio natural e provocando profundas modificações na natureza mais do que qualquer outra espécie animal.

Os estudos relacionados aos recursos hídricos ganharam impulso após a Conferência de Estocolmo (1972), a qual o mundo começou a despertar para as questões ambientais, principalmente relacionados ao gerenciamento dos recursos hídricos e a escassez em algumas regiões do globo.

Odum (1988) considera que, para a sociedade contemporânea, a escassez de água doce utilizável é potencialmente um fator limitante maior para a população do que a energia. Nesta perspectiva, deve-se levar em consideração, para melhor equacionamento dos recursos hídricos, e o seu gerenciamento.

Em todos os continentes os recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, deterioram-se rapidamente colocando em risco as fontes de suprimento. As causas desta crise são geralmente múltiplas, relacionadas ao aumento da população mundial e a taxa de urbanização, que têm produzido um aumento no consumo e a rápida deterioração da qualidade da água (TUNDISI, 2000).

Verifica-se que a exploração de águas subterrâneas para abastecimento, ou complementação do fornecimento de água nas áreas urbanas, tornou-se uma opção que vem registrando um expressivo incremento nos últimos anos, sendo vários núcleos urbanos abastecidos de forma exclusiva ou complementar por esta fonte (MENESES, 2007).

A utilização das águas subterrâneas tornou-se uma das soluções para a escassez de água em diversos países: Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Marrocos,

Holanda, Rússia e Suíça. Nestes países, mais de 70% das demandas de água são atendidas por mananciais subterrâneos (BANCO MUNDIAL, 1994).

No caso brasileiro, a utilização das águas subterrâneas cresce com o passar dos anos. Segundo Silva (2003), nas últimas décadas verificou-se uma tendência da captação e utilização de águas subterrâneas para abastecimento público, além de uma crescente preocupação do risco de contaminação nos aquíferos, relacionada à exploração irracional.

Um dos maiores reservatórios de água doce do mundo é o Sistema Aquífero Guarani (SAG), sua grandeza e, principalmente, a sua localização geográfica envolvendo quatro países do MERCOSUL (Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina) faz dele um importantíssimo manancial hídrico, constituindo-o em uma reserva estratégica para o abastecimento da população e para o desenvolvimento socioeconômico da região de sua abrangência (BOSCARDIN BORGUHETTI, 2004).

O SAG apresenta em suas bordas, áreas consideradas naturalmente vulneráveis, nas quais ocorrem a recarga direta, pois as unidades que o constituem, o afloram em superfície. Segundo Gomes et al (2006), as áreas de recarga direta, ou de afloramento do SAG, tem se mostrado altamente expostas ao risco de degradação, principalmente, por causa de agrotóxicos, processos erosivos e avanços das atividades agrícolas.

Diante dessa problemática, os estudos relacionados à disponibilidade hídrica, destinada ao consumo humano, ganham impulso devido ao crescimento populacional e ao aumento da demanda de água doce nos últimos séculos, sendo atualmente uma das principais questões que norteiam as discussões relacionadas ao meio ambiente. Ressalta-se a necessidade de estudos relacionados à vulnerabilidade dos aquíferos em áreas de recarga, uma vez que, encontram-se diretamente associadas à manutenção do regime hídrico.

Apoiado nessas premissas, este trabalho objetiva elaborar o mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG na região de Ribeirão Bonito – SP, por meio da integração de mapas temáticos em SIG, utilizando a metodologia DRASTIC e complementado pela análise do uso e cobertura da terra, mediante o emprego de produtos de sensoriamento remoto, objetiva-se a proposição de medidas mitigadoras que propiciem a melhor proteção das áreas de recarga do aquífero, colaborando para o gerenciamento dos recursos hídricos, crescimento e ordenamento territorial da cidade de Ribeirão Bonito.

1.1 – JUSTIFICATIVAS

A crescente demanda pelos recursos hídricos subterrâneos, a ausência de diretrizes no gerenciamento e manutenção dos usos e coberturas da terra em áreas de recargas do SAG, são as bases para realização deste estudo. Segundo IBGE apud Silva (2003), cerca de 61% da população brasileira é abastecida por águas subterrâneas, por meio de poços tubulares profundos (43%), poços rasos (cacimbas ou escavados, tipo amazônico, 6%) e nascentes ou vertentes (12%).

O mesmo quadro é verificado no Estado de São Paulo, no qual, a maior parte dos núcleos urbanos é suprida total ou parcialmente por águas subterrâneas. Em sua maioria, por meio do uso da rede pública, ao passo que, em algumas bacias no oeste do Estado, estes valores podem atingir cifras superiores a 85% (HIRATA e SUHOGUSOFF, 2004).

Dados da CETESB (1997) indicam que as águas subterrâneas representam o mais importante recurso para o abastecimento público dos municípios paulistas. No estado de São Paulo, dos 645 municípios, 462 (71,6%) são abastecidos total ou parcialmente por águas subterrâneas, sendo que deste total, 308 (47,7%) são municípios totalmente abastecidos por este recurso.

No Estado de São Paulo, o SAG vem sendo crescentemente utilizado, principalmente a partir da década de 1970 (ALBUQUERQUE FILHO *et al*, 2010). Como resultado da aceleração no processo de concentração populacional urbana, verificam-se diariamente casos de degradação dos mananciais de superfície, pela falta de saneamento ambiental adequado das cidades (esgoto, lixo e outros), assim como a contaminação e poluição das águas subterrâneas.

Segundo *Albuquerque Filho et al* (op. cit.), o SAG é explorado por cerca de 1.500 poços e ocorre em grande parte do Estado de São Paulo, a partir da sua região central para norte, sul e oeste. Sua área de ocorrência ocupa cerca de 140 mil km², sendo apenas 16,5 % em área exposta, situada a leste do Estado e por onde ocorre o afloramento e 83,5 % em área confinada, a Oeste, recoberta pelos derrames de basaltos da Formação Serra Geral e os sedimentos das formações geológicas do Grupo Bauru.

O panorama da crescente demanda e exploração de água do SAG nos municípios paulistas, implica em especial preocupação com a proteção dos aquíferos, devido à dificuldade e a impraticabilidade de se promover à remoção de poluentes de fontes pontuais de captação (poços), e devido ao fato da reabilitação de um aquífero poluído requerer custos muitos elevados (FOSTER, 1988).

Conforme a análise de *Albuquerque Filho et al* (op. cit.), as características físicas e hidráulicas do SAG, o qual se apresenta confinado (com águas muito antigas) em algumas regiões e livre em outras (com alta vulnerabilidade à poluição), desperta preocupação por parte dos órgãos políticos e científicos, uma vez que, o SAG apresenta significado estratégico para abastecimento das próximas gerações, e manutenção das atividades geradoras de renda, as quais necessitam da água subterrânea.

As áreas de afloramento do SAG caracterizam-se como regiões de interesse estratégico, tanto pelo significado em termos da recarga, como pelas atividades econômicas que ali se desenvolvem.

Diante dessa problemática a análise da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos tem por objetivos, gerenciar a utilização de águas subterrâneas, o que significa propor medidas e soluções que garantam que os aquíferos sejam fontes seguras e confiáveis de capitação abastecimento de água a população (FOSTER e HIRATA, 1988).

A denominação vulnerabilidade do aquífero frente à potencial poluição é usada para representar características intrínsecas que determinam a possibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta (FOSTER, 1987 apud FOSTER e HIRATA, op. cit.).

Mediante essas constatações, conhecer o comportamento do SAG, sobretudo nas áreas sujeitas à recarga direta, naturalmente mais vulneráveis e com maior interação com o manancial de superfície, tem uma importância maior para sua conservação e fornecimento de subsídios aos intentos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável, que visem assegurar a qualidade e a quantidade de seu manancial às futuras gerações (OAS/GEF, 2001).

A presente área de estudo, compreende uma região em que o SAG encontra-se, em sua maior parte, aflorante, exigindo maior atenção e preocupação com os usos e coberturas da terra instalados, os quais possam potencializar a contaminação e a poluição do aquífero. O município de Ribeirão Bonito apresenta as características citadas acima, além de apresentar disponibilidade de dados a serem empregados nas variáveis referentes à análise e mapeamento da vulnerabilidade.

Para a determinação da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito este trabalho utilizou o método DRASTIC, de avaliação e mapeamento da vulnerabilidade, proposto por Aller et al (1987).

Com relação ao mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos, o uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem auxiliado na sobreposição e interpretação de informações

espaciais adquiridas de uma determinada área, permitindo a elaboração de uma informação única, por meio da elaboração de um mapa síntese.

Para análise, integração de dados e geração do mapeamento da vulnerabilidade, uma das técnicas de álgebra de mapas mais difundida é a análise multicriterial ponderada. Trata-se de uma técnica eficiente para os casos em que se têm diferentes parâmetros, ou variáveis, que contribuam para a ocorrência de um determinado processo, como é o caso da metodologia DRASTIC, devendo-se, portanto, determinar a importância relativa de cada uma delas.

Para complemento da análise e mapeamento da vulnerabilidade intrínseca do SAG na região de Ribeirão Bonito, este estudo associa às formas de usos e coberturas da terra, mediante a utilização de imagem e produtos de sensoriamento remoto, ressaltando a interação entre as diferentes superfícies inseridas sobre o SAG. O mapeamento do uso e cobertura da terra é essencial para determinação de qual índice de vulnerabilidade deve ser dado enfoque, pois regiões com predominância agrícola é utilizado o DRASTIC *Pesticida*.

O planejamento dos usos da terra,, em áreas de captação dos recursos hídricos subterrâneos, tem por finalidade a prevenção frente à potencial poluição, evitando sua contaminação. O planejamento é realizado com base em estudos relacionados à proteção dos aquíferos, os quais objetivam controlar e ordenar atividades humanas por meio da identificação de áreas vulneráveis à contaminação.

Baseando-se nessas premissas, este estudo ressalta a importância dos aquíferos como fontes de abastecimento de água. Visando garantir o melhor aproveitamento e gerenciamento desses recursos, tornam-se primordiais estudos que caracterizem ou quantifiquem sua vulnerabilidade natural frente à potencial poluição, propondo-se medidas mitigadoras que visem garantir o melhor ordenamento do território.

12 – OBJETIVOS

Geral

O principal objetivo deste estudo é mapear o índice de vulnerabilidade DRASTIC no SAG, concomitante ao mapeamento do uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo, baseado no uso dos métodos DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*. Baseando-se em técnicas de geoprocessamento, análise e integração de dados em SIG, procurou-se identificar áreas vulneráveis à potencial poluição, com vistas a colaborar com o ordenamento adequado do uso e cobertura da terra e a proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

Específicos

- Elaboração de um banco de dados geográficos com informações temáticas sobre a área estudada, para o mapeamento da vulnerabilidade do SAG em Ribeirão Bonito, mediante o emprego dos métodos DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*.
- Utilizar as geotecnologias: ArcGis 10.1, *eCognition 7.0* e *SPRING 5.2*, para fins de aplicação das técnicas de álgebra de mapas, análise, integração de dados e elaboração de mapas temáticos.
- Confeção de mapas temáticos do meio físico da área de estudo e mapeamento do uso e cobertura da terra, por meio de imagem orbital e produtos de sensoriamento remoto, para análise e identificação das áreas mais vulneráveis, relacionando-as ao uso e cobertura vigente.
- Elaborar o mapeamento e análise, os quais possam ser utilizados como importante ferramenta e instrumento de gestão pública, para elaboração do ordenamento territorial da cidade de Ribeirão Bonito.
- Diagnosticar eventuais perdas da qualidade ambiental, colaborando para o melhor planejamento hídrico e proteção do SAG.

O levantamento e a revisão dos materiais bibliográficos e cartográficos compõem etapas importantes para o desenvolvimento e evolução do estudo. Para facilitar a análise, este documento foi dividido em seis grandes capítulos.

- O Capítulo 1 apresenta a **introdução** do trabalho, apresentando principais justificativas para implementação deste estudo e o delineamento dos objetivos do trabalho.
- O Capítulo 2 elabora uma **revisão bibliográfica** com vistas a esclarecer alguns conceitos relacionados aos recursos hídricos, vulnerabilidade natural de aquíferos; principais métodos de avaliação; noções gerais sobre geoprocessamento, análise em sistemas de informação geográfica e técnicas sensoriamento remoto; finalizando com o mapeamento do uso e cobertura da terra nos estudos relacionados à vulnerabilidade de aquíferos.
- O Capítulo 3 trata-se de uma **caracterização da área de estudos** em um contexto regional e local, apontando os principais aspectos relacionados ao meio físico (geologia, geomorfologia, climatologia, hidrografia, pedologia e topografia).
- O Capítulo 4 apresenta os **procedimentos metodológicos** essenciais para o mapeamento e aplicação da metodologia DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, apresentando o processo de aquisição de materiais e análise em ambiente SIG. São definidos os passos para a montagem do banco de dados, manipulação dos mapas, etapas necessárias para a avaliação da vulnerabilidade e as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao uso e cobertura da terra mediante o processamento digital de imagens.
- O Capítulo 5 enumera os **resultados** e apresenta as **discussões** dos diferentes produtos gerados resultantes do mapeamento da vulnerabilidade do índice DRASTIC e DRASTIC *Pesticida* e o mapeamento do uso e cobertura da terra.
- O Capítulo 6 avalia os resultados obtidos e **conclui**, baseado nos objetivos, a aplicabilidade da metodologia DRASTIC utilizada em área de afloramento do SAG,

por meio do mapeamento do uso e cobertura da terra como subsídio para o gerenciamento das águas subterrâneas em Ribeirão Bonito, ao mesmo tempo em que colabora com o ordenamento territorial na região.

- O Capítulo 7 lista as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste estudo.

Ao longo dos itens que se seguem, são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa para a construção de cada um dos mapas temáticos do índice DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, ao mesmo tempo em que são apresentados os dados utilizados para a construção de cada um dos mapas e os procedimentos adotados para o mapeamento do uso e cobertura da terra.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG)

O Brasil, por ter 70% da área do SAG em seu território, acumulou ao longo dos últimos 30 anos muitas informações seja pelos levantamentos regionais realizados, como por exemplo, no Estado de São Paulo, ou mesmo pelas pesquisas acadêmicas desenvolvidas pelas suas universidades.

O SAG é um grande reservatório de águas subterrâneas, que se estende por uma área de 1.087.879,15 km², ocupando partes do território do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Segundo a OEA (2009), no Brasil ocorre em uma área que compreende 735.917,75 km², estendendo-se pelas regiões central e oeste de São Paulo (155.800 km²), Triângulo Mineiro/MG (43.642 km²), região sul de Goiás (45.575 km²), sudeste de Mato Grosso (26.400 km²), Mato Grosso do Sul (213.200 km²), Paraná (131.300 km²), Santa Catarina (49.200 km²) e Rio Grande do Sul (157.600 km²).

A denominação de Aquífero Guarani foi sugerida pelo geólogo uruguaio Danilo Anton em homenagem à grande nação indígena Guarani, cuja população, antes da colonização europeia, se concentrava principalmente nas terras que compreendem as regiões fronteiriças entre Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai, (ROCHA, 1996).

2.1.1 – SAG – Confinado

Corresponde a todas as áreas do SAG com espessuras confinantes de basalto, onde a água disponível provém dos efeitos mecânicos da compressão do corpo do aquífero. Suas velocidades de circulação são extremamente baixas levando a taxas muito baixas de recarga (OEA, op. cit.). O Guarani é um aquífero do tipo poroso, em termos gerais, aproximadamente 90% do SAG está confinado e o restante ocupa áreas em faixas de afloramentos.

2.1.2 – SAG – Livre

Segundo a OEA (2009), correspondem às áreas que podem atuar como zonas de recarga ou descarga. Em áreas de descarga regional, é possível que ocorram também recargas locais. Existe interação entre as águas subterrâneas e as superficiais e, geralmente, os fluxos de base dos rios e de outros corpos de água equivalem às descargas geradas a partir do SAG (Figura 1).

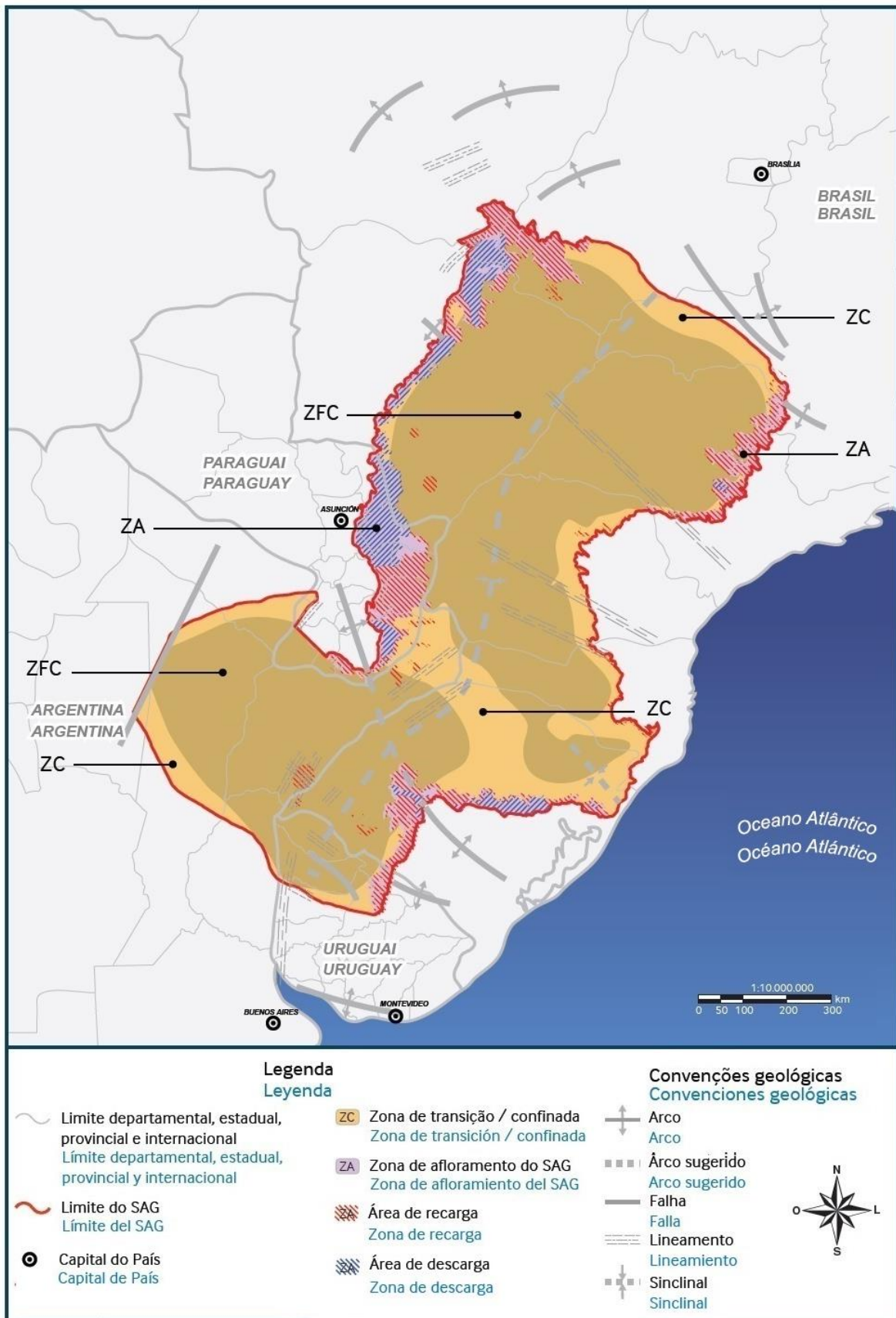


Figura 1 – Zoneamentos Básicos para Gestão do SAG
Fonte – OEA (2009).

As áreas de recarga direta do SAG localizam-se nas bordas da bacia em faixas alongadas de rochas sedimentares que afloram à superfície. Essas áreas encontram-se ausentes em uma faixa na porção norte-nordeste (Triângulo Mineiro e sul de Goiás) e na porção sudoeste que envolve a Argentina. A alimentação do aquífero se dá por dois mecanismos: a) infiltração direta das águas de chuva nas áreas de recarga direta; e b) infiltração vertical ao longo de descontinuidades nas áreas de confinamento, em um processo mais lento (ROCHA, 1996; GOMES, 2008).

A área de recarga do SAG no Estado de São Paulo abrange os seguintes municípios: Franca, Batatais, Brodósqui, Altinópolis, Cajuru, Serrana, Ribeirão Preto, Ribeirão Bonito, Cravinhos, São Simão, Luiz Antônio, Araraquara, Corumbataí, São Carlos, Ibaté, Analândia, Itirapina, Brotas, Bocaina, Dois Córregos, Boa Esperança do Sul, Bariri, São Pedro, Águas de São Pedro, Santa Maria da Serra, São Manoel, Botucatu, Pardinho, Bofete, Torre de Pedra, Paranapanema, Avaré, Itaí e Tejuapá. (GOMES et al, 2006).

2.2 - VULNERABILIDADE NATURAL DE AQUÍFEROS

O conceito de vulnerabilidade é definido de diferentes formas, o que acaba por se tornar um tema amplo, e muitas vezes confuso. Nobre (2006) define a vulnerabilidade de aquíferos, como a facilidade com que cargas de contaminantes, com origem na superfície, têm em atingir uma posição específica no sistema aquífero subjacente à região poluída.

Segundo Lobo-Ferreira e Cabral (1991) entende-se por vulnerabilidade a poluição das águas subterrâneas, a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero.

De acordo com Foster e Hirata (1988), a acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes (advecção de contaminantes) e a capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação), são fatores condicionantes da vulnerabilidade.

Aller et al (1987), consideram que, além das características e matérias que compõem a zona saturada, os materiais da zona não saturada também apresentam importância relevante, pois influenciam as migrações dos contaminantes para o aquífero, ou seja, influenciam a vulnerabilidade dos aquíferos frente à poluição.

2.2.1 – Principais Fontes de Contaminação e Poluição.

Os conceitos de poluição e contaminação da água são distintos e se complementam. Segundo Branco et al (1991), o conceito de poluição é definido como uma alteração na qualidade da água onde os parâmetros alterados não atingem os valores máximos de referência, enquanto que a contaminação é a introdução de elementos prejudiciais à saúde humana ou animal. A contaminação, portanto, seria um caso particular da poluição, onde o uso da água fica comprometido. Para este estudo não se diferenciam os conceitos de contaminação e poluição, uma vez que, busca-se identificar as áreas onde o aquífero é mais propenso à entrada de algum tipo de material capaz de alterar suas qualidades.

A vulnerabilidade se diferencia de risco de poluição por esta última depender, além da vulnerabilidade do aquífero, da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo alterando a qualidade das águas subterrâneas (LOBO FERREIRA, 1998).

As possíveis fontes de contaminação da água subterrânea podem ser classificadas conforme sua forma de ocorrência em pontuais e difusas. Mook (2002) cita que as fontes mais comuns de contaminação das águas subterrâneas são: áreas urbanas; atividades agrícolas e industriais; águas residuais despejadas nos rios e nos drenos; depósitos de resíduos; água salgada contaminada, atraída pela exploração intensiva dos recursos de água subterrânea na região litorânea (intrusão salina).

2.2.2 – Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos

Os estudos relacionados à vulnerabilidade de aquíferos por meio de mapeamento têm sido extensivamente utilizados em todo mundo, com a finalidade de auxílio a programas de prevenção a contaminação da água subterrânea.

Segundo Melo Junior (2008), vários são os sistemas de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos existentes na literatura como, por exemplo, Albinet e Margat (1970), Haertle (1983 apud Lobo Ferreira e Cabral 1991), Aller et al (1987), Foster (1987), Foster e Hirata (1988) e Oliveira e Lobo Ferreira (2004).

A maior parte desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos (Quadro 1).

Quadro 1 – Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos.		
Índice	Fatores	Referência
Surface Impoundment Assessment	Zona não saturada; Importância do recurso; Qualidade das águas subterrâneas; Periculosidade do material.	Le Grand, 1964
Site Ranking Methodology	Uso da água e qualidade; Nível e tipos de contaminação; Profundidade do nível d'água; Permeabilidade do solo; Características dos resíduos (toxicidade e persistência).	Kulfs et al, 1980
DRASTIC	Profundidade da zona insaturada (D); Recarga do aquífero (R); Material do aquífero (A); Tipo de solo (S); Topografia (T); Influência da zona Insaturada (I); Condutividade hidráulica (C).	Aller et al, 1987
GOD	Ocorrência de água subterrânea (G); Classificação geral do aquífero (O); Profundidade do nível d'água (D).	Foster, 1987
AVI (Aquifer Vulnerability Index)	Espessura da Zona Insaturada Condutividade hidráulica (Ki).	Stempvoort, 1992
SINTAC	Igual ao DRASTIC, mas com pesos diferentes.	Civita et al, 1994
EPPNA (Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água)	De acordo com as características de cada formação litológica/hidrogeológica.	EPPNA, 1998

2.2.3 – Índice DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*

O modelo DRASTIC foi desenvolvido na década de 1980, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*) como o intuito de reduzir a subjetividade dos processos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos à poluição, apresentando-se como um sistema padronizado de avaliação, tendo como principais pressupostos elencados por Aller et al (1987):

- O contaminante é introduzido à superfície do terreno;
- O contaminante é infiltrado verticalmente até o aquífero pela água;
- O contaminante possui a mesma mobilidade da água;
- A área mínima avaliável pelo DRASTIC é de 0,4 km².

O método DRASTIC proposto por Aller et al (op. cit.), é um sistema paramétrico de avaliação, corresponde ao somatório ponderado dos 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos. Foi desenvolvido para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, procurando sistematizar a determinação do potencial do poluente em alcançar a zona saturada, considerando 7 parâmetros (Figura 2):

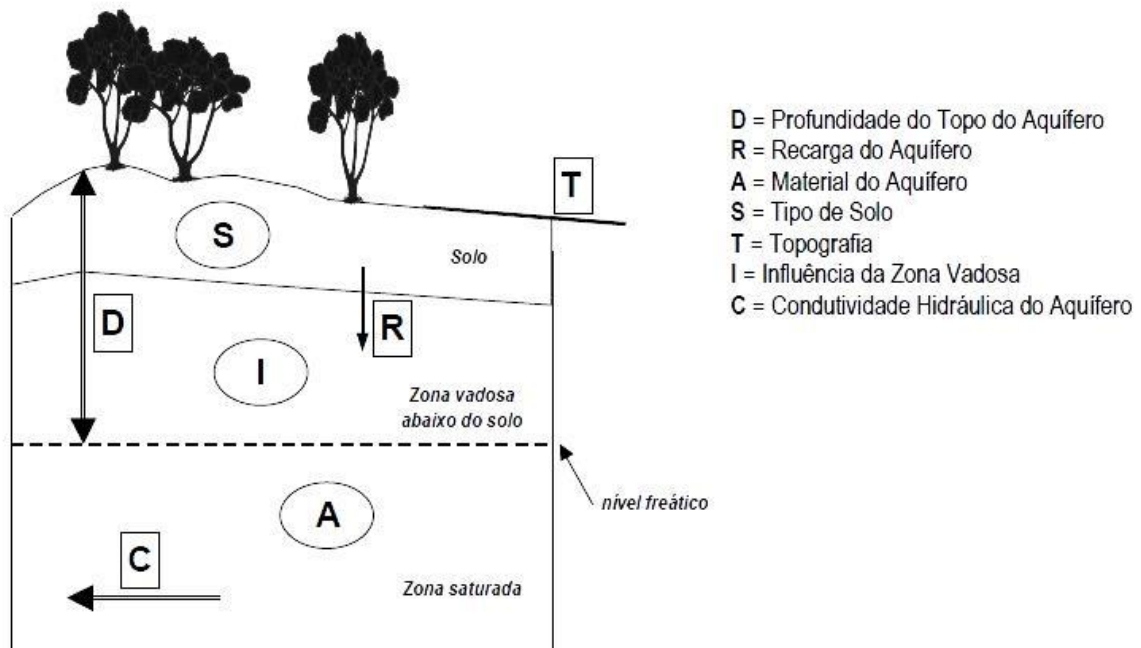


Figura 2 - Parâmetros utilizados no método DRASTIC.

Fonte - OLIVEIRA e LOBO FERREIRA (2004).

Uma das justificativas referente à escolha do índice DRASTIC, para aplicação na presente pesquisa, deve-se à grande quantidade de referencial teórico, uma vez que, o mapeamento da vulnerabilidade baseado no método DRASTIC é bastante difundido. De acordo com os dados adquiridos verificou-se que a metodologia DRASTIC era a mais adequada para se alcançar os objetivos do trabalho. Compõem as justificativas referentes à escolha do método as seguintes premissas baseadas em Rosa et al (2001) e Santos (2010), elencadas abaixo:

- É um dos índices mais conhecidos e aplicados no mundo, utilizado em diversos trabalhos no Brasil; Melo Junior (2002), Nobre (2006), Camponogara (2006), Meneses (2007) e Santos (2010).
- Relaciona seus diversos parâmetros com os mecanismos que envolvem os transportes dos contaminantes no meio subterrâneo;
- É mais oneroso se comparado com os índices GOD e AVI, uma vez que, esses índices utilizam menos variáveis;
- A quantidade de parâmetros diretos e indiretos utilizados em sua determinação, apresentando maior variedade de fatores se comparado aos demais índices listados no Quadro 1.
- Índice melhor indicado para aplicação em escalas locais.
- A utilização dos parâmetros envolvendo dados de recarga e condutividade hidráulica, evitando assim a extrapolação de valores e a minimização da generalização dos resultados.
- Agrega na sua definição atributos de importância para a avaliação da vulnerabilidade, tais como: topografia, recarga, condutividade hidráulica.

Para cada parâmetro DRASTIC, Aller et al (1987), determinaram um peso relativo que varia entre 1 e 5, sendo o peso 5 inferido para o fator mais significativo e 1 para o menos importante. Esses pesos são uma constante e não podem ser mudados.

Cada parâmetro é avaliado em relação a outro, a fim de determinar o significado relativo de cada parâmetro frente à poluição potencial, a cada variável inserida nos parâmetros do DRASTIC é inferida uma pontuação que varia entre 1 a 10. O Quadro 02 apresenta o peso e as cargas atribuídos aos parâmetros e variáveis que compõem o DRASTIC, conforme indicado em Aller et al (op. cit).

Quadro 2 – Parâmetros e variáveis do DRASTIC		
PARÂMETROS	VARIÁVEIS	CARGAS
Profundidade da Zona Insaturada (m) 5	0 – 1.5	10
	1.5 – 4.5	9
	4.5 – 9.0	7
	9.0 – 15.0	5
	15.0 – 22.0	3
	22.5– 30.0	2
	>30.0	1
Recarga (mm/ano) 4	< 51	1
	51 – 102	3
	102 -178	6
	178 – 254	8
	> 254	9
Material do Aquífero 3	Folhelho maciço	1 – 3
	Ígneas/metamórficas	2 – 5
	Ígneas/metamórficas intemperizadas	3 – 5
	Till glacial	4 – 6
	Arenito, calcário e folhelho Sequencial	5 – 9
	Arenito maciço	4 – 9
	Calcário maciço	4 – 9
	Areia e cascalho	4 – 9
	Basalto	2 – 10
Calcário cárstico	9 – 10	
Tipo de Solo 2	Fino ou ausente	10
	Cascalho	10
	Arenoso	9
	Turfoso	8
	Argila agregada e/ou contraída	7
	Marga arenosa	6
	Marga	5
	Silte margoso	4
	Argila margosa	3
	Lixo/esterco	2
	Argila desagregada e não expansível	1

Topografia ou Inclinação do relevo (%) 1	0 – 1	10
	1 – 6	9
	6 – 12	5
	12 – 18	3
	> 18	1
Impacto da Zona Insaturada 5	Camada confinante	1
	Argila/ silte	2 – 6
	Xisto argiloso, argilito	2 – 5
	Calcário	2 – 7
	Arenito	4 – 8
	Arenito, calcário e argilito estratificados	4 – 8
	Areia e cascalho com significativa silte e argila	4 – 8
	Rocha metamórfica/ ígnea 2-8 4	2 – 8
Areia e cascalho	6 – 9	
Basalto	2 – 10	
Condutividade Hidráulica (m/dia) 3	0 – 1.5	1
	1.5 – 4.5	2
	4.5 – 9.0	3
	9.0 – 15.0	5
	15.0 – 22.0	7
	22.6– 30.0	9
	>30.0	10

Existe ainda um segundo método, desenvolvido por Aller et al (1987), para áreas onde há o uso de pesticidas agrícolas, *DRASTIC Pesticida* o qual é derivado do precedente. Foram apenas modificados os fatores de ponderação atribuídos aos parâmetros *DRASTIC* tendo em conta os processos de atenuação dos pesticidas nos solos e na zona vadosa. Ambos os métodos *DRASTIC* e *DRASTIC Pesticida* foram testados neste estudo, uma vez que, a área de estudo é constituída quase que totalmente de áreas agrícolas.

2.2.4 - Descrição da metodologia DRASTIC

A Equação (1) criada por Aller et al (1987), é utilizada para determinar o índice final DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*:

$$\text{DRASTIC e DRASTIC Pesticida} = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + IpIc + CpCc \quad (1)$$

Onde, Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip, Cp correspondem aos pesos dos fatores DRASTIC que não podem ser modificados, enquanto que:

Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic, Cc correspondem aos fatores de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método.

2.2.5 - Escala de vulnerabilidade para os Índices Finais DRASTIC

Com base a multiplicação entre os pesos dos índices intermediários (constantes) DRASTIC e as cargas individuais (variáveis) de cada parâmetro, de acordo com a Fórmula 1, obtém-se o Índice Final DRASTIC.

Para representação cartográfica do índice de vulnerabilidade DRASTIC, este estudo utilizou a escala de cores apresentada por Struckmeier e Margat (1995) apud Melo Junior (2008), cujos valores de baixa vulnerabilidade são representados pela cor verde; vulnerabilidade média pela cor amarela, alta vulnerabilidade com coloração rosa e vulnerabilidade muito alta representada por vermelho (Figura 03).

Segundo Melo Junior (op. cit.), os valores limite de vulnerabilidade 26 e 226 representam índices de vulnerabilidade incipiente e extrema, respectivamente. Entre este intervalo, valores de vulnerabilidade obtidos entre 26 e 71 são considerados baixos; entre 71 a 126 a vulnerabilidade é média; entre 126 e 180 a vulnerabilidade é considerada alta; e, valores localizados entre 180 e 226 representam uma vulnerabilidade muito alta.

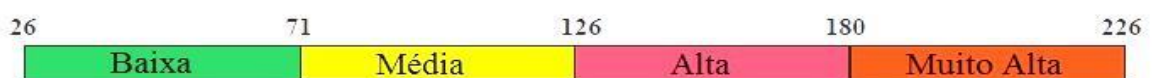


Figura 3 - Escala de Vulnerabilidade DRASTIC.

Fonte – Melo Junior (2008).

2.2.6 - Limitações dos Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural

Segundo Foster e Hirata (1993), se considerados todos os fatores, seria necessária a geração de uma série de mapas de vulnerabilidade natural à poluição, que poderiam ser compilados em um Atlas de Vulnerabilidade de Aquíferos. Contudo, ainda não é possível atingir tal ideal, por não existirem informações suficientes e/ou dados adequados.

Muitos autores consideram o emprego dos índices de vulnerabilidade natural em escala local como fator limitante. Este estudo objetivou mapear a vulnerabilidade do SAG em Ribeirão Bonito, em escala 1: 200.000, aplicável para todo o limite do município, porém, não recomendado para gestão de usos e coberturas da terra inseridas apenas nas áreas urbanizadas, uma vez que, a imagem Landsat e os mapas temáticos apresentam baixa resolução para o ordenamento dos usos e coberturas da terra nessas áreas.

2.2.7 - Construção de Mapas de Vulnerabilidade

Para Vrba e Zaporozec (1994, apud Hirata, 2001) a elaboração de mapas de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, auxiliados pelas técnicas digitais, tem revolucionado o procedimento de mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos. Essas técnicas melhoram os métodos de análise, reduzindo o tempo de confecção de mapas; a precisão na definição das classes de vulnerabilidade, baseado no conhecimento do fluxo subterrâneo e mecanismos de transportes de contaminantes; bem como tem permitido a atualização rápida dos mapas existentes com a entrada de novos dados.

Como resultados da avaliação da vulnerabilidade podem ser obtidos mapas que apresentam zonas com maior ou menor vulnerabilidade à contaminação, que geralmente são construídos para o aquífero livre. Segundo Monteiro et al (2008), a principal finalidade destes mapas é servir de instrumentos na definição de políticas públicas tanto no planejamento do uso e cobertura da terra como no gerenciamento das águas subterrâneas.

Meneses (2007) ressalta que, o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos apresenta-se útil na medida em que pode auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades de monitoramento ambiental. Pode-se, através da utilização de mapas de vulnerabilidade, definir áreas em que o monitoramento deva ser executado de maneira mais intensiva, bem como, auxiliar no planejamento de práticas conservacionistas com vistas à

definição de áreas que devam ser protegidas de modo a garantir a integridade do aquífero em termos de qualidade da água.

Conforme a análise de Meneses (op. cit.), ainda que seja possível a realização da integração de mapas de forma manual, através da sobreposição de mapas em papel, a grande quantidade de informações exigida em cada um dos métodos torna esta tarefa bastante enfadonha e passível de imperfeições, em especial quando se deseja trabalhar com cenários futuros.

O desenvolvimento das técnicas computacionais direcionadas à cartografia tem auxiliado enormemente tarefas em que a variável “onde” é essencial. Ferramentas como os Sistemas de Informações Geográficas, que permitem a realização de análises complexas, integrando dados de diversas fontes a bancos de dados georreferenciados (CÂMARA e DAVIS, 2001), vem sendo utilizados em aplicações dos mais diversos campos do conhecimento e, em especial, em estudos ambientais.

A representação dos fenômenos e das feições geográficas é realizada por tipos especiais de dados que, mediante o uso de SIG, podem ser armazenados, manipulados e integrados entre si, de forma a viabilizar a elaboração de novas informações que subsidiem análises diversas.

Trabalhos como os de Esteller, Quentin e Díaz-Delgado (2002), Coridola et al (2005), e Meneses (op. cit.), apresentam a utilização dos SIG na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, mostrando o potencial da ferramenta pra estudos desta natureza. A utilização de métodos paramétricos de avaliação leva em consideração, via de regra, a junção de dois ou mais mapas temáticos para a elaboração de um mapa síntese. Tal operação é denominada de álgebra de mapas e busca combinar atributos diferentes em busca de identificar alguma correlação espacial entre eles (BARBOSA, 1997).

Segundo Meneses (op. cit.), cada SIG apresenta ferramentas diferentes para a realização da operação de álgebra de mapas. Alguns apresentam ferramentas prontas, outros disponibilizam linguagens de programação que, possibilitam ao usuário a construção de suas próprias ferramentas. A seleção de qual ferramenta utilizar fica a critério dos usuários e deve levar em consideração, quase sempre, a facilidade no manuseio e a experiência na utilização do sistema a ser empregado.

2.3 – GEOPROCESSAMENTO

Segundo de Xavier da Silva (2001), o Geoprocessamento pode ser compreendido como um conjunto de técnicas computacionais, que operam sobre base de dados (que são registro de ocorrências) georreferenciados, para transformá-los em informação (que é um acréscimo de conhecimento) relevante.

Câmara e Davis (2001) ressaltam que, as técnicas e ferramentas computacionais utilizadas pelo Geoprocessamento, também conhecidas como de *Sistemas de Informação Geográfica (SIG)*, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes, e ao criar bancos de dados geo-referenciados. Tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

Um SIG, ou no inglês GIS (Geographic Information System), pode ser considerado um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados sendo uma ferramenta que automatiza tarefas até então realizadas manualmente e facilita a realização de análises complexas, através da integração de dados de diversas fontes (ARONOFF, 1991).

De acordo com Câmara (1995), as principais características de um SIG, compreendem integrar numa única base de dados informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados de censo e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno; oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise e para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados.

A principal diferença de um SIG para qualquer outro sistema de informação é sua capacidade de armazenar tanto atributos descritivos como a geometria dos diversos dados geográficos (CÂMARA, 2005).

2.4 – SENSORIAMENTO REMOTO

O mapeamento do uso e cobertura da terra, proposto nos objetivos deste estudo, com vistas à colaboração e enriquecimento da análise da vulnerabilidade, será delineado com base em imagem orbital e produtos de sensoriamento remoto.

O termo Sensoriamento refere-se à aquisição de informação sobre um objeto por um sensor que está a certa distância desse objeto (MATHER, 1999). Conforme a análise de Novo (1993), o sensoriamento remoto é uma técnica que, permite analisar diferentes alvos a partir da energia eletromagnética emitida ou refletida por eles, captada por diferentes sensores que operam em diferentes comprimentos de onda (faixas espectrais) e em diferentes plataformas.

De acordo com Mather (op. cit.), o sensoriamento remoto é a tecnologia que consiste na interpretação das medidas da energia eletromagnéticas refletidas ou emitidas por diferentes alvos da superfície terrestre. A radiação eletromagnética refletida ou emitida numa dada direção depende da intensidade e da faixa espectral do fluxo radiante incidente e das características físico-químicas do alvo em estudo.

Para Crosta (1992), o conhecimento do comportamento espectral dos alvos é importante na otimização do uso dos dados coletados remotamente, visto que o sinal registrado por um sensor depende das características espectrais da superfície observada.

Novo (1989) descreve que, o sensoriamento remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados e equipamentos para transmissão de dados, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta terra em suas mais diversas manifestações.

Os produtos fornecidos por sensoriamento remoto podem ser imagens orbitais, fotografias aéreas, dados de variáveis climáticas e ambientais, com várias aplicações. Para interpretar as esses produtos é necessário avaliar as faixas espectrais captadas pelo sensor e ter em mente a detecção, identificação, medição e solução de problemas, além dos elementos de fotointerpretação (tonalidade, tamanho, forma, textura, padrão, altura, sombra, localização e vizinhança) (PINTO E VALÉRIO FILHO, 1996).

2.5 – USO E COBERTURA DA TERRA

Mediante o uso de imagens orbitais é possível à extração das informações básicas e recentes da área de estudo, com a possibilidade de se utilizar todo o potencial do sensoriamento remoto e dos SIG, aplicável ao mapeamento do uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito.

O conhecimento das características naturais do meio aquífero complementam o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação. As etapas de identificação e a localização de atividades produtoras de cargas potencialmente contaminadoras, decorrentes da ação antropogênica, em áreas sobrejacentes ao aquífero, também auxiliam os estudos sobre a questão das águas subterrâneas e a determinação o seu risco de contaminação (MARION, 2011).

Os estudos de vulnerabilidade frente à poluição potencial, que incluem um ensaio de uso e cobertura da terra, contam não só com dados referentes às características naturais do aquífero, como também, com dados referentes à intervenção antrópica. Uma caracterização mais aproximada da ideia de risco de poluição das águas subterrâneas consiste na associação e interação da vulnerabilidade natural do aquífero com a carga poluidora aplicada no solo ou em sub-superfície (MARION, op. cit.).

A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, mas o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, propriedade intrínseca do aquífero (FOSTER; HIRATA, 1993). Hassuda (1999) defende a importância de se correlacionar ao estudo da vulnerabilidade natural dos aquíferos às atividades exercidas em superfície, pois, embora o meio natural apresente uma estrutura frágil, é o tipo, intensidade, forma e tempo de disposição das atividades que determinam a real situação do risco, o qual os aquíferos estão submetidos. Em muitos casos, a forma de uso e cobertura da terra, pode modificar a qualidade dos recursos hídricos, pondo em risco sua conservação para o uso das atuais e futuras gerações.

Para Xavier da Silva e Carvalho Filho (1993), a poluição é um processo paulatino e sub-reptício. Entretanto, a previsão da possível ocorrência dessas áreas críticas pode ser apoiada no geoprocessamento, através do confronto entre mapas, para a identificação dos uso e coberturas da terra (pela localização e distribuição geográfica dos agentes poluidores) e, conseqüentemente, criação de normas eliminadoras e/ou mitigadoras da ação poluente.

A cobertura da terra é definida como os elementos da natureza, ou seja, a vegetação (natural e plantada), água, gelo, rocha nua, areia e superfícies similares, além das construções artificiais criadas pelo homem, que recobrem a superfície da terra (ANDERSON et al, 1976).

O termo ocupação da terra qualifica o uso da mesma, sendo que, o uso somente é efetivado a partir do momento em que a ocupação é processada (SIMON, 2007). Segundo IBGE (2006), os conceitos atribuídos à cobertura e ao uso da terra guardam íntima relação entre si e costumam ser aplicados alternativamente. Geralmente, as atividades humanas estão diretamente relacionadas com o tipo de revestimento do solo, seja ele florestal, agrícola, residencial ou industrial.

Dados de sensoriamento remoto, como fotografias aéreas e imagens de satélite, podem ser correlacionados com a cobertura da terra e usados para mapear o tema. Entretanto, como o sensor remoto não registra a atividade diretamente, mas as características da superfície da terra que retratam o revestimento do solo, as atividades de uso da terra correlacionadas à cobertura precisam ser interpretadas a partir de modelos, tonalidades, texturas, formas, arranjos espaciais das atividades e localização no terreno (IBGE, op. cit.).

Baseado nessas premissas, este estudo propõe o mapeamento do uso e cobertura da terra, como ferramenta de apoio e tomada de decisões no mapeamento da vulnerabilidade do SAG em Ribeirão Bonito, permitindo identificar e localizar as principais atividades produtoras de cargas potencialmente poluidoras.

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

Devido a sua localização em área de recarga do SAG, foi definida como área de estudos, o município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo, como pode ser constatado na Figura 4.

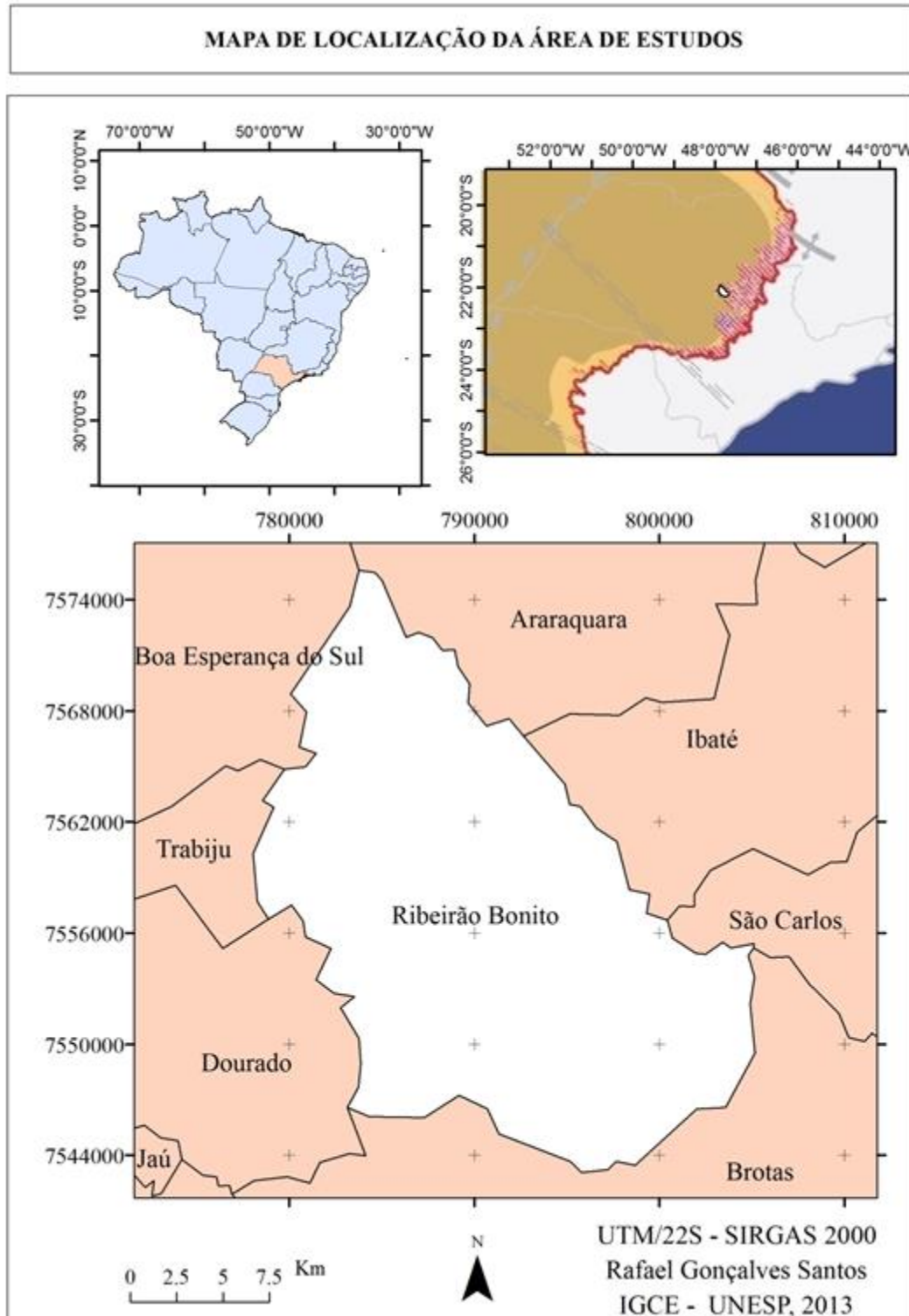


Figura 4 - Localização da área de estudo em Ribeirão Bonito - SP.

3.1 – GEOLOGIA

A geologia da área de estudos tem suas características compatíveis com o conjunto do SAG; incluem rochas do Cretáceo, Jurássico, Triássico e Neógeno, em um sistema estratificado, de modo geral, numa sequência que inclui o próprio SAG. Segundo o IPT (2000), os sedimentos arenosos da Formação Pirambóia afloram na área da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos – do Tietê-Jacaré (UGRHI – TJ), principalmente na região de Ribeirão Bonito, em duas manchas principais, ao longo das sub-bacias do Baixo e Médio Jacaré-Guaçu (Figura 5).

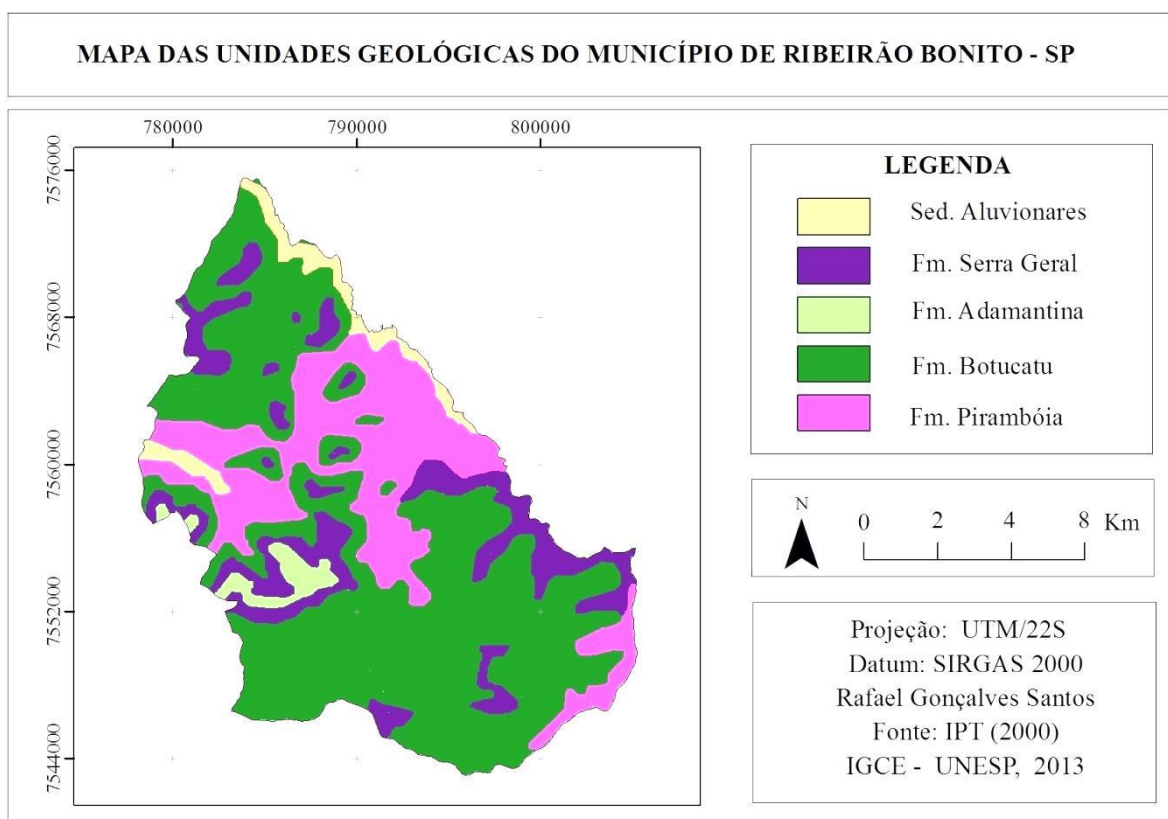


Figura 5 - Principais formações geológicas do município de Ribeirão Bonito.

Conforme o mapa das unidades geológicas do município, na presente área de estudo ocorre arenitos do período Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu), recobertos a leste, oeste e norte, por sucessivas camadas de derrame basáltico da Formação Serra Geral (Cretáceo), provenientes de atividade vulcânica, que por sua vez, encontra-se recoberto em pequenas áreas a oeste, por arenitos da Formação Adamantina. Os depósitos do Neógeno se constituem essencialmente de sedimentos aluvionares, cuja evolução e controlado pelos grandes cursos d'água e evolução do relevo.

3.2 – GEOMORFOLOGIA

O município de Ribeirão Bonito está inserido na Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista e das Cuestas Basálticas, segundo a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981).

Segundo o relatório do IPT (2000), no município de Ribeirão Bonito ocorrem os seguintes sistemas de relevo, como ilustra a Figura 6.

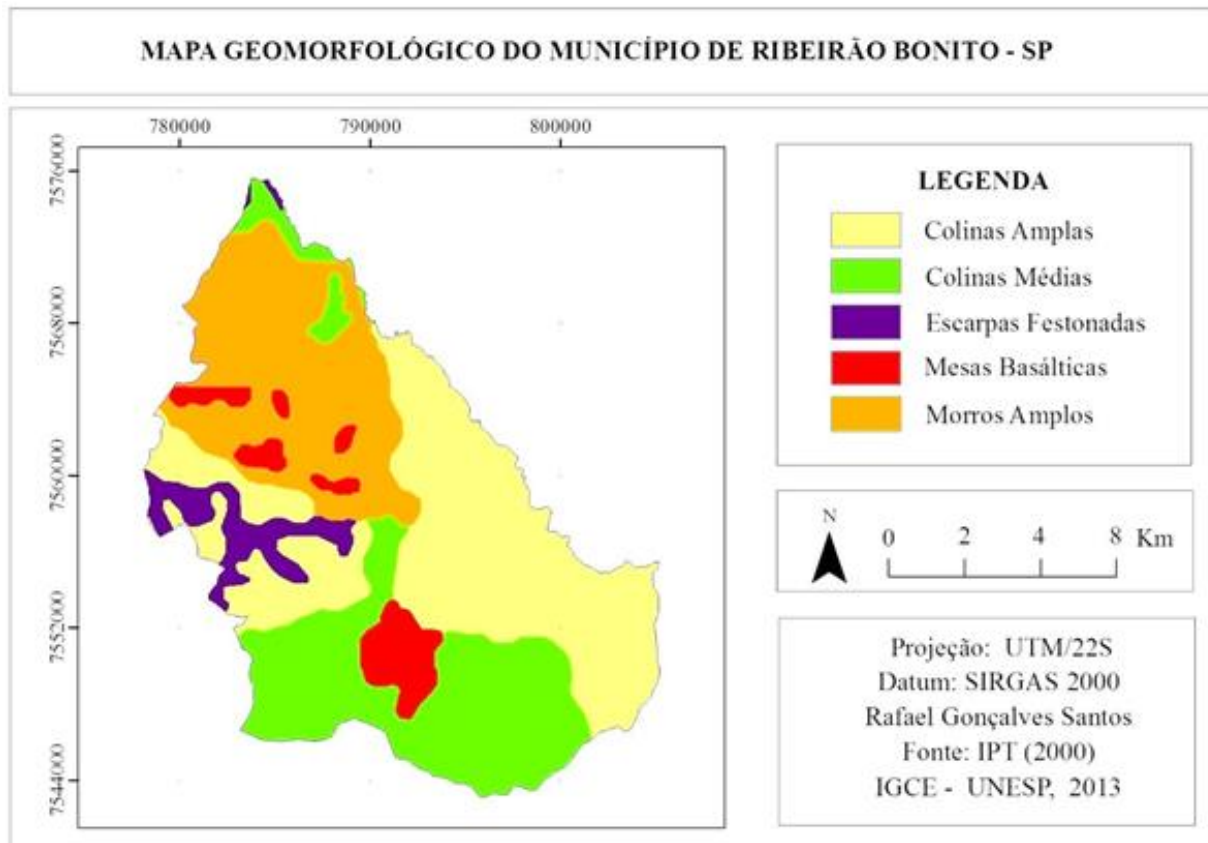


Figura 6 – Geomorfologia do município de Ribeirão Bonito.

a) Colinas Amplas: é o sistema de relevo predominante na área de estudo, onde predominam interflúvios com área superior a 4 km², drenagem de baixa densidade, topos extensos e aplainados, e vertentes com perfis retilíneos a convexos;

b) Colinas Médias: apresenta interflúvios com áreas de 1 a 4 km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes;

c) Escarpas Festonadas: correspondem aos basaltos da Formação Serra Geral e ocorrendo na margem esquerda do Rio Jacaré-Pepira. Apresentam-se desfeitas em anfiteatros

separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos, com drenagem de alta densidade, padrão subparalelo a dendrítico, vales fechados;

d) Mesas Basálticas: associadas à Formação Botucatu, representadas por morros testemunhos isolados (peões e baús), topos aplainados a arredondados, vertentes com perfis retilíneos, muitas vezes com trechos escarpados e exposições de rocha. Drenagem de média densidade, padrão pinulado a subparalelo, vales fechados;

e) Morros Amplos: relevo associado às formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral, com interflúvios apresentando área superior a 15 km², com topos arredondados a achatados. As vertentes apresentam perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, padrão dendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas.

3.3 – PEDOLOGIA

A caracterização das classes pedológicas encontradas na área de estudos, baseia-se no Relatório IPT (2000), como apresenta a Figura 7.

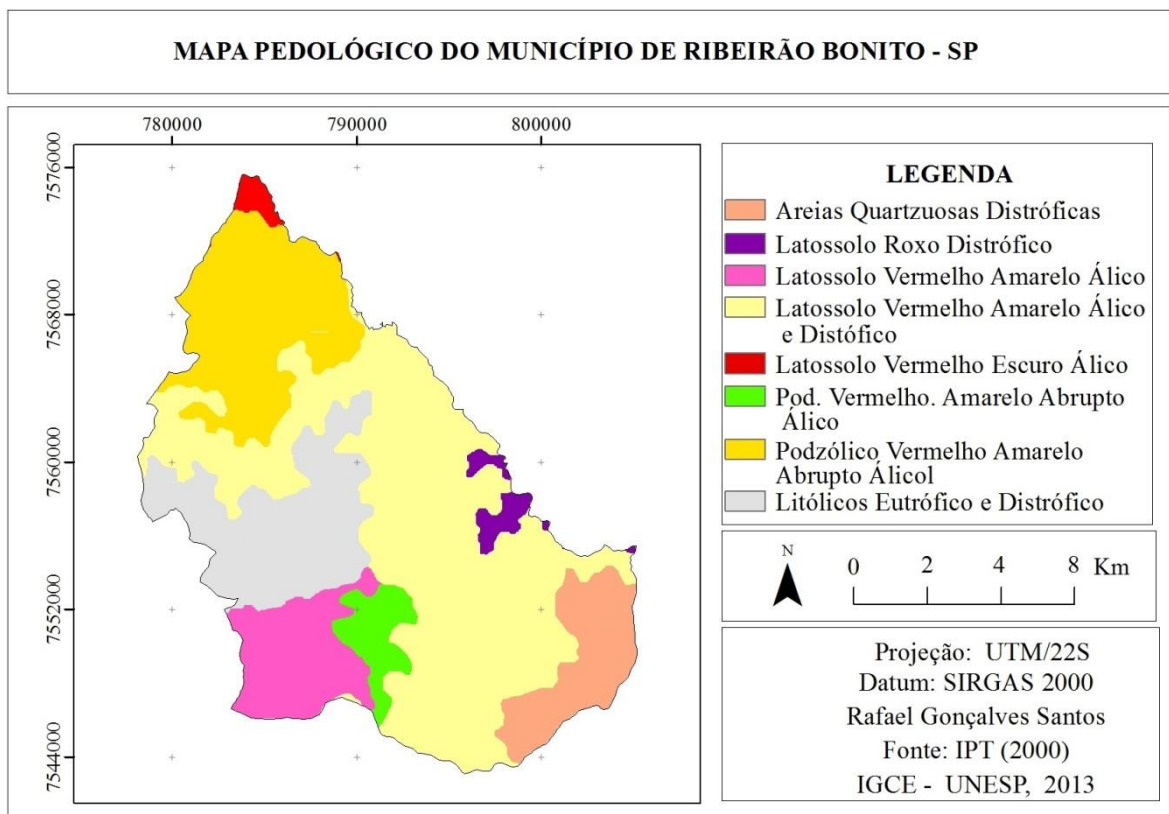


Figura 7 - Principais tipos de solos encontrados no município de Ribeirão Bonito.

De acordo com o Relatório IPT (2000), os solos do município de Ribeirão Bonito, analisados do ponto de vista do desenvolvimento pedológico, no que se refere à profundidade e a organização do perfil, apresentam as seguintes características, a saber:

a) Areias Quartzosas: são solos arenosos, pedologicamente pouco desenvolvidos, constituídos, essencialmente, por minerais de quartzo, excessivamente drenados, profundos e com estruturação muito frágil. O desenvolvimento desses solos é muito influenciado pelo substrato arenítico pobre em minerais ferromagnesianos, limitando-se, a áreas de ocorrência das formações Botucatu e Pirambóia;

b) Latossolo Roxo: correspondem a solos com horizonte B latossólico (espesso e homogêneo) e coloração vermelha. A textura argilosa e muito argilosa deve-se à pedogênese sobre materiais de alteração de rochas básicas da Formação Serra Geral. O Latossolo Roxo ocorre em relevos de colinas amplas, em ambiente que favorece a lixiviação de bases e apresenta alto teor de óxidos de ferro;

c) Latossolo Vermelho-Escuro textura média e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média: são solos semelhantes aos anteriores, diferenciando-se, principalmente, pela constituição granulométrica mais arenosa. Distribuem-se em extensas áreas de relevo pouco movimentado, constituído por colinas amplas, ou nos topos aplainados de relevos mais movimentados, como as colinas médias e os morros;

d) Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto e não abrupto textura média: compreendem solos minerais não hidromórficos, com horizonte B textural. São solos que variam, de bem à moderadamente drenados e relativamente profundos. A relação textural entre os horizontes superiores é muito variável, observando-se áreas com predominância de solos com baixo gradiente textural;

e) Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos: caracterizam-se por serem pouco desenvolvidos e apresentarem pequena espessura, normalmente com 20 a 40 cm de profundidade. Na UGRHI – TJ (Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos – do Tietê-Jacaré), estes solos encontram-se associados e condicionados a relevos muito movimentados, em vertentes de alta declividade. Ocorrem, principalmente, associados a relevos de escarpas e serras restritas, subordinadas às diferentes litologias existentes.

3.4 – HIPSOMETRIA

A Hipsometria da área de estudos foi obtida a partir do processamento dos dados da imagem SRTM, inserida em ambiente SIG para elaboração do Mapa Hipsométrico de Ribeirão Bonito (Figura 8). Elaborado no ArcGis 10.1, com equidistância de 20 metros entre as classes hipsométricas, a presente área de estudos apresentou uma variação altimétrica com intervalo de 320 metros.

No mapa hipsométrico pode se constatar uma acentuada elevação altimétrica nas regiões sudeste, sul e sudoeste do município de Ribeirão Bonito e uma menor altitude ao longo dos cursos d'água em direção as regiões centro e norte do município.

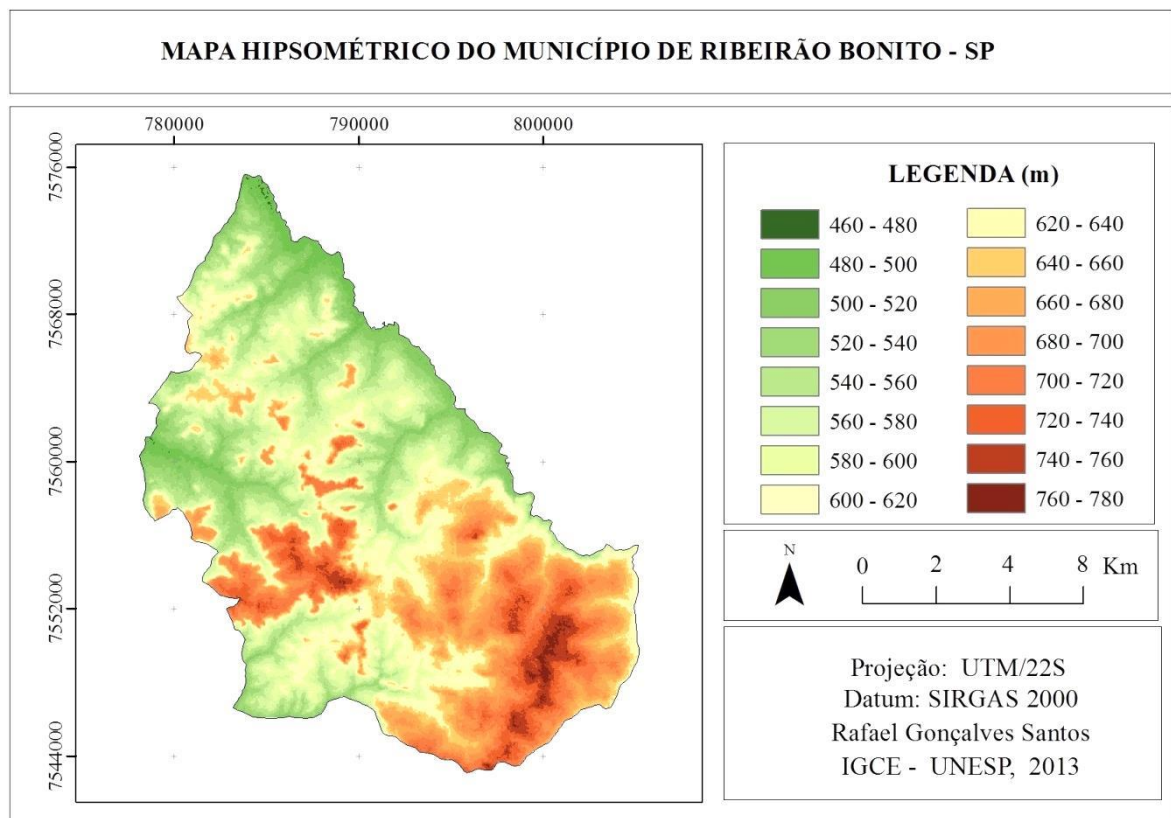


Figura 8 - Hipsometria do município de Ribeirão Bonito.

3.5 – HIDROGRAFIA

O município de Ribeirão Bonito encontra-se inserido na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI do Tietê-Jacaré (UGRHI do Tietê/Jacaré), a qual engloba outros 33 municípios. Destes 33 municípios, 16 estão totalmente inseridos na UGRHI-TJ, sendo Ribeirão Bonito um destes municípios.

3.5.1 - Bacias Hidrográficas

A UGRHI-TJ engloba as sub-bacias de três rios principais: Tietê, Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. O município de Ribeirão Bonito encontra-se inserido em partes do Alto Jacaré-Pepira e baixo, médio e alto Jacaré-Guaçu, como ilustra a Figura 9.

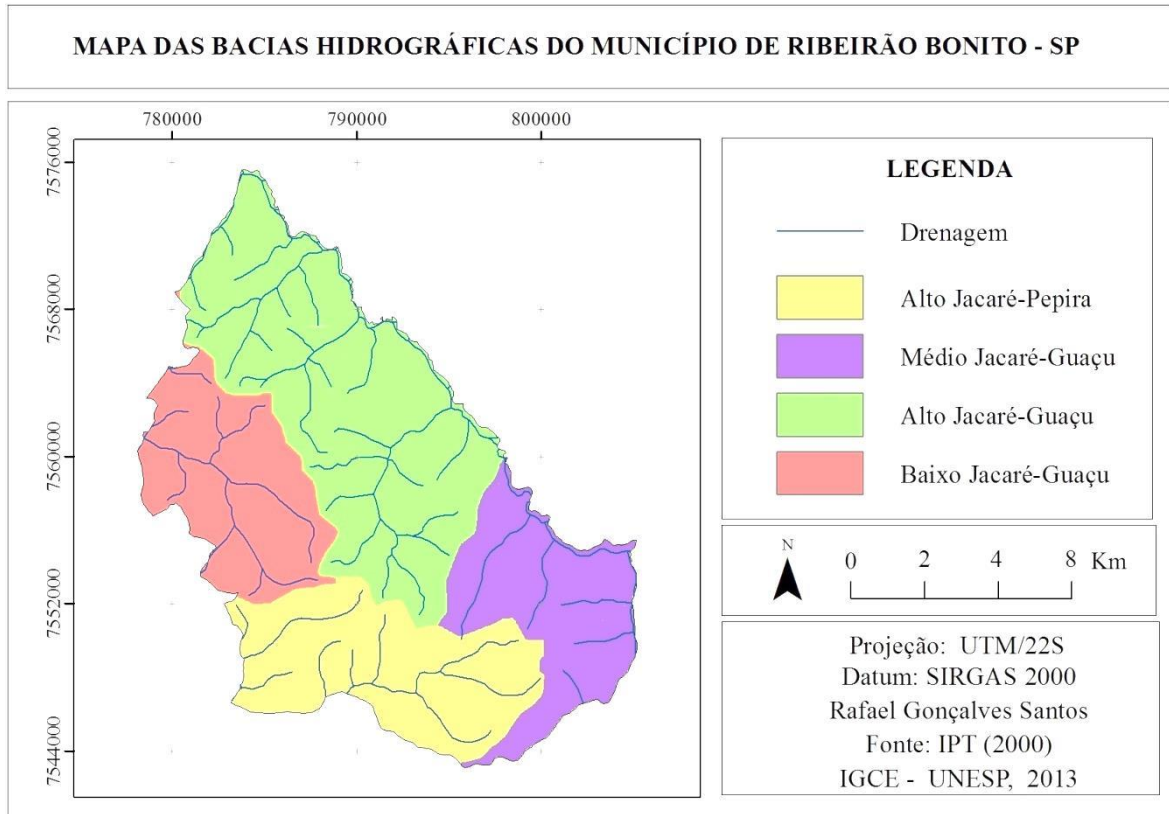


Figura 9 - Principais bacias hidrográficas do município de Ribeirão Bonito.

3.5.2 - SAG em Ribeirão Bonito

O município de Ribeirão Bonito, localiza-se em sua maior extensão, em áreas de afloramento do SAG, segundo Rabelo (2006), a espessura do SAG no município atinge valores entre 132 e 270m. Para bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, os valores variam entre 95 a 270 m, obtendo um valor médio de 187 m (Figura 10).

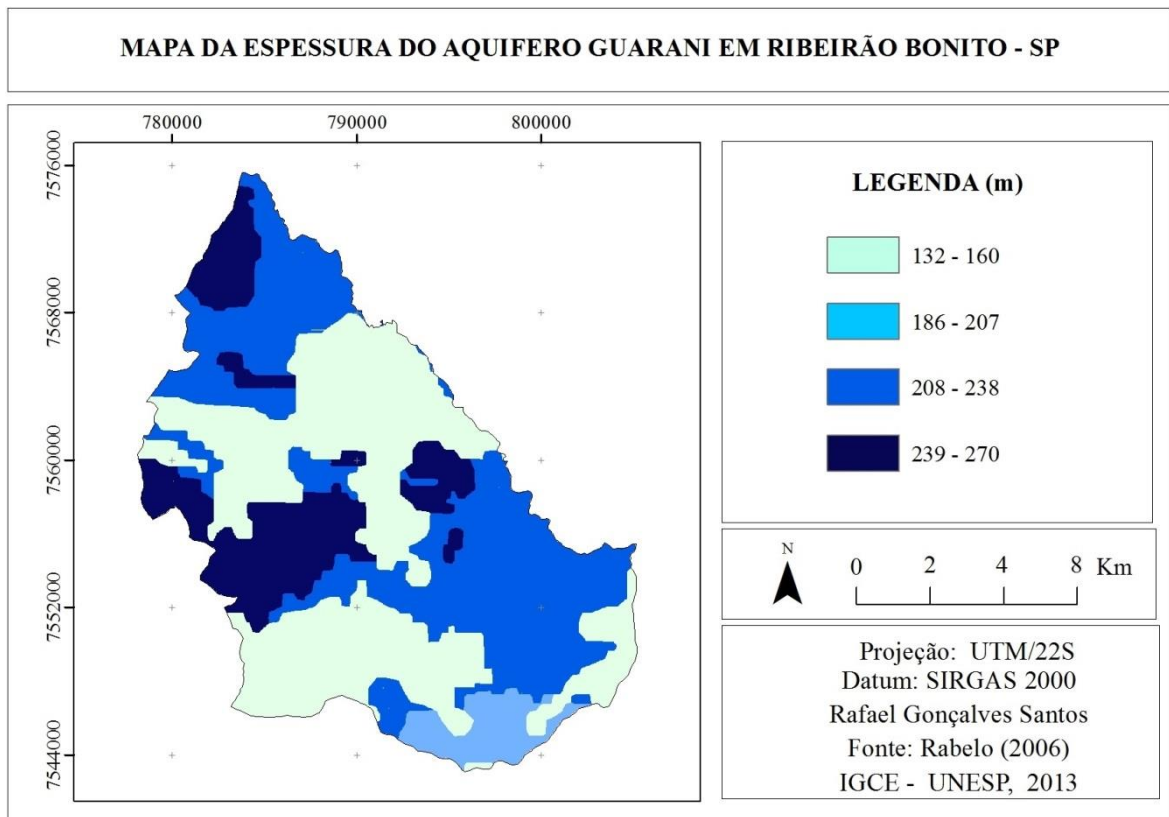


Figura 10 – Espessura do SAG no município de Ribeirão Bonito.

3.6 – CLIMATOLOGIA

Para apresentação das características climáticas da área de estudo ressalta-se a ênfase dada à dinâmica das chuvas, elemento considerado de grande importância em estudos dessa natureza. O clima da região da bacia do sistema Jacaré-Tietê, em que Ribeirão Bonito está inserida, apresenta temperaturas médias anuais variam de 21 a 23 °C; as médias máximas em janeiro situam-se entre 29 a 32°C; e a média das mínimas em julho de 11 a 13 °C (IPT, 1987).

Na UGRHI do Tietê-Jacaré, como na maior parte do Estado, o período mais chuvoso ocorre de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. O período mais seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto. A precipitação média anual de Ribeirão Bonito, segundo o IPT (2000), é ilustrada na Figura 11.

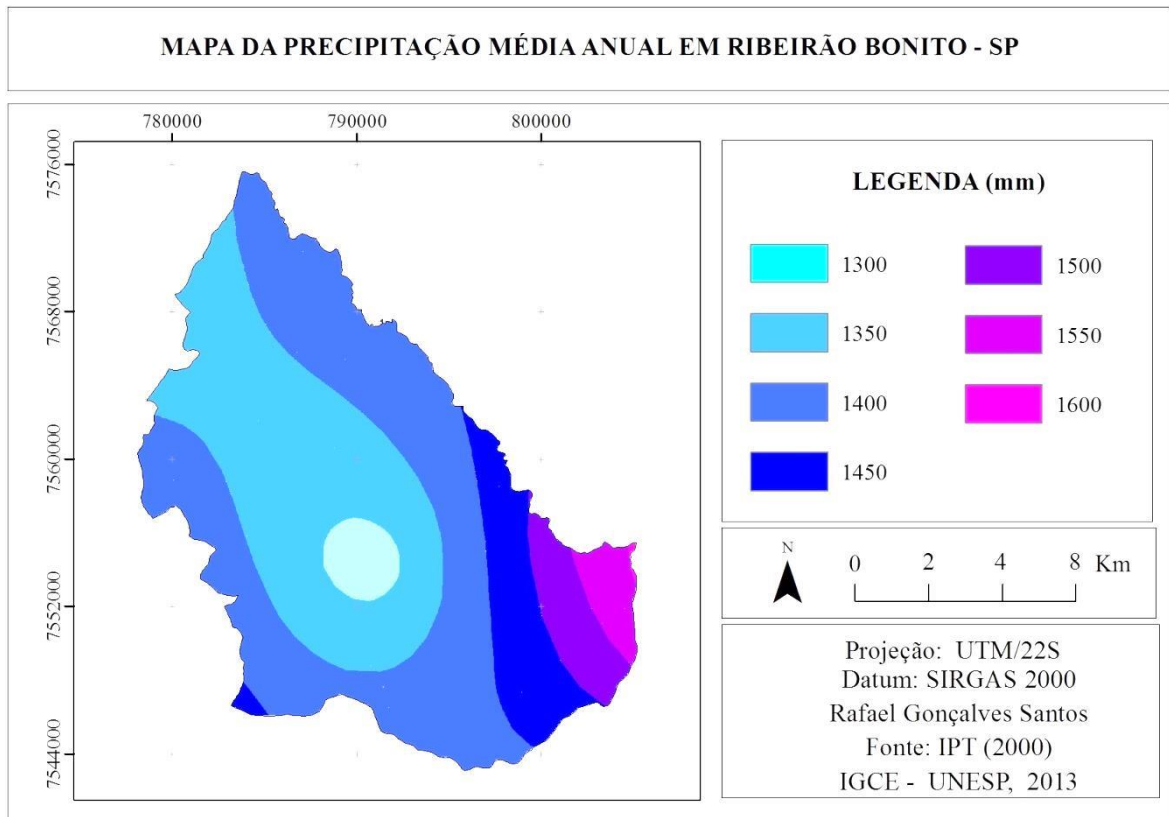


Figura 11 - Precipitação média anual do município de Ribeirão Bonito.

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1 – GEOPROCESSAMENTO

Os mapas temáticos propostos nos objetivos constituem uma importante etapa deste estudo. Com base na aquisição de diferentes tipos de dados é possível gerar mapas temáticos correspondentes às variáveis que compõem a metodologia DRASTIC. Os mapas podem ser elaborados em diversos SIG e a Figura 12 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo relacionado à integração de dados em SIG.

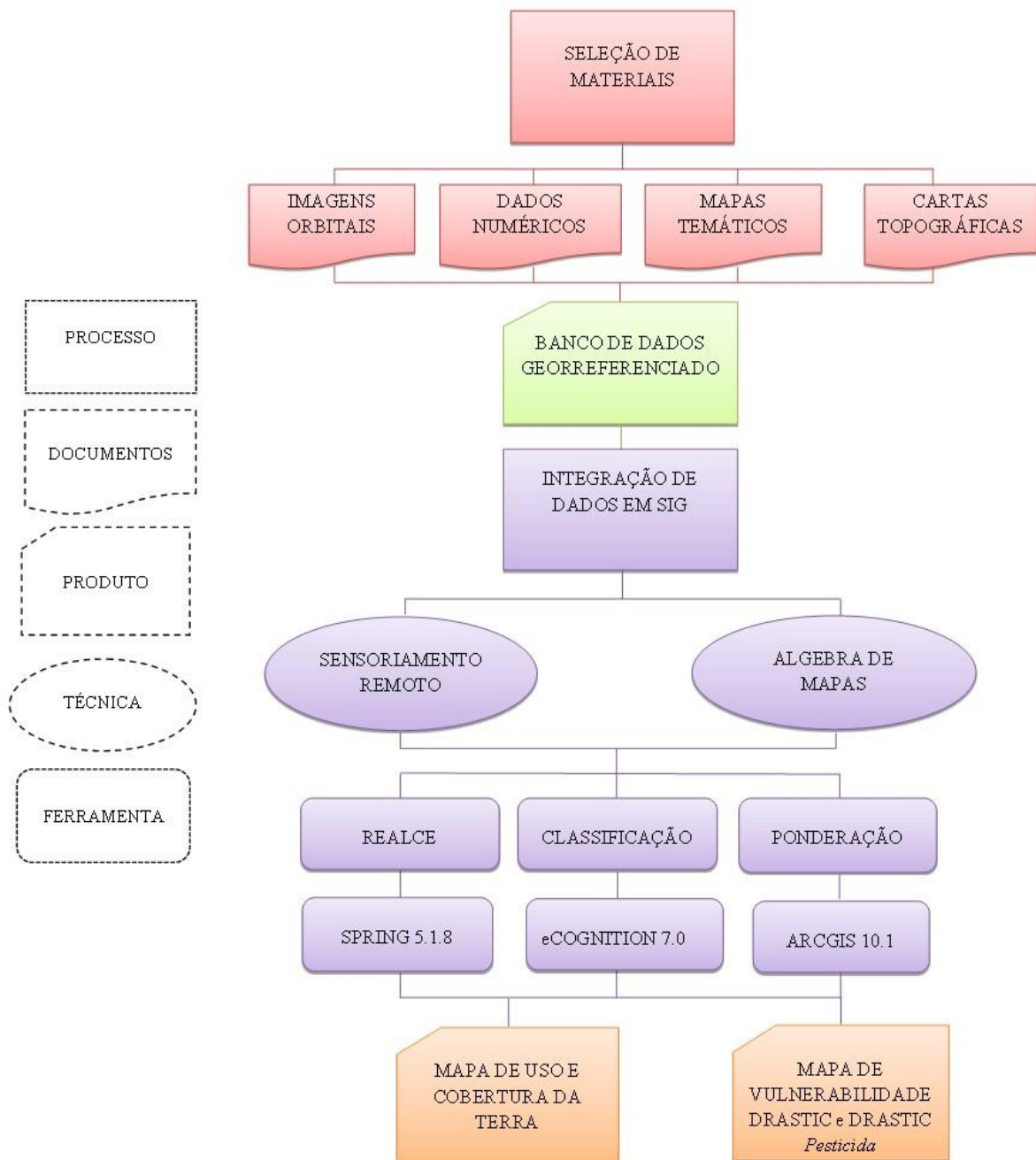


Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

4.1.1 - Definição dos Equipamentos e Aplicativos

Os equipamentos, aplicativos e suas utilidades para o trabalho foram as seguintes:

- Laboratório de Geoprocessamento - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP campus Rio Claro, como base de trabalho para o processamento dos dados;
- PC (*Personal computer*) para o processamento dos dados;
- Software ArcGis 10.1, para todo o processo de criação de banco de dados e álgebra de mapas referentes à análise da vulnerabilidade baseado na metodologia DRASTIC. As etapas de mapeamento temático do uso e cobertura da terra e reconhecimento de padrões correspondentes ao Pós-Processamento da imagem TM/LANDSAT 5, foram realizados no ArcGis 10, por se tratar de um SIG com excelentes ferramentas de análise de dados matriciais e vetoriais, bem como elaboração do layout e manipulação do banco de dados;
- Software SPRING 5.2 (Windows), desenvolvido e disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (CÂMARA et al, 1996), trata-se de um software gratuito, utilizado nas etapas de pré-processamento e processamento da imagem selecionada por meio da combinação das bandas, realce, filtragem e georreferenciamento;
- Software eCognition 7.0, foi utilizado para a finalização da etapa de processamento (segmentação e classificação). Trata-se de um software capacitado a fazer a combinação de dados de diversos formatos, sensores e plataformas; associação de informações em qualquer resolução espacial e espectral; integração com dados temáticos raster ou vetor. As etapas de segmentação e classificação foram realizadas no eCognition 7.0, por ser considerado um software com tecnologia de ponta para análise da rede de objetos e suas relações topológicas representadas na imagem;
- Editores diversos de textos, planilhas e figuras para edição do documento.

4.1.2 – SIG Aplicado ao Mapeamento do Índice DRASTIC

Os mapas temáticos correspondentes aos parâmetros DRASTIC a serem analisados, constituem uma importante etapa na análise da vulnerabilidade. A Figura 13 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo relacionado à integração de dados em SIG, para elaboração do mapeamento do índice DRASTIC e *DRASTIC Pesticida*.

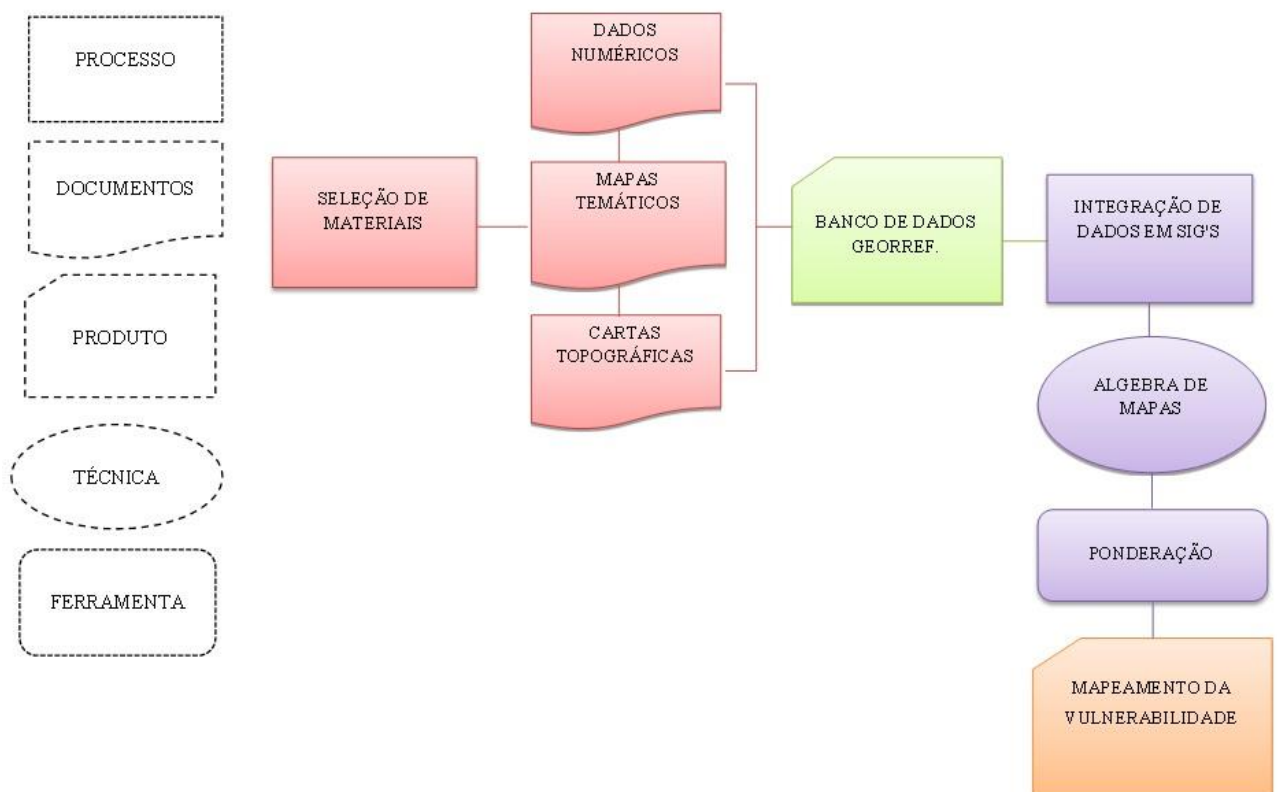


Figura 13 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos para o DRASTIC

4.1.2.1 – Fase I: Aquisição de Dados

Nesta fase será descrito o processo de seleção dos diferentes tipos de dados, de diferentes fontes, assim como aplicativos e equipamentos diversos para etapas específicas de trabalho. Após a pesquisa bibliográfica sobre a área de estudo, foram identificadas as fontes de dados tendo como origem principalmente trabalhos do meio acadêmico e de instituições governamentais.

4.1.2.1.1 - Seleção de Materiais

Os materiais empregados, relacionados aos diferentes formatos encontrados e tratamentos realizados foram: dados temáticos e material cartográfico. Os formatos dos materiais, dentro das escalas encontradas, bem como as informações utilizadas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos materiais utilizados

MATERIAL	FORMATO	ESCALA	INFORMAÇÕES UTILIZADAS
Cartas Topográficas	Digital	1:50.000	- Características geográficas (datum, coordenadas, projeção e etc.); - Informações referentes à topografia, localidades, estradas.
Mapas temáticos	Digital	1: 300.000	- Correspondentes às Variáveis componentes do DRASTIC

4.1.2.1.1.1 – Mapas Temáticos

Os dados temáticos referentes à geologia, vegetação, geomorfologia, solos e clima foram obtidos em diferentes trabalhos, selecionados para caracterização da área quanto ao meio físico, fornecendo informações diretas dos parâmetros que compõem a metodologia DRASTIC. Os parâmetros e suas respectivas fontes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fontes dos dados para elaboração do DRASTIC

Parâmetros	Fonte
D Profundidade da Zona Insaturada	Queluz e Sturaro (2011)
R Taxa de recarga	Rabelo (2006)
A Material do Aquífero	IPT (2000)
S Tipos de Solos	IPT (2000)
T Topografia	Imagem SRTM
I Impacto na Zona Insaturada	IPT (2000)
C Condutividade Hidráulica	Queluz e Sturaro (2011)

4.1.2.1.1.2 – Cartas Topográficas

Para este estudo foi utilizada a seguinte carta topográfica:

Folha: Ribeirão Bonito (SP)

SF-22-Z-B-III-2

Projeção: UTM/Mercator

Escala: 1: 50.000

Fonte: IBGE - 1971

Além das informações sobre a topografia e demais tipologias da área de estudos, a carta topográfica também foi utilizada para situar a área de estudo dentro do espaço geográfico. Este material se torna importante, pois todo o trabalho está baseado na montagem de um banco de dados georreferenciado.

4.1.2.1.1.3 – Dados Orbitais

O mapeamento do parâmetro Topografia na metodologia DRASTIC, corresponde ao percentual de inclinação do terreno (declividade), o qual será delineado com base no mapeamento prévio da altitude, para construção do Modelo Digital de Terreno. Este processo será realizado com base nos dados topográficos das imagens Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)¹.

A partir da aquisição da imagem SRTM foram extraídas as curvas de nível numa equidistância de 20 metros para elaboração dos mapas hipsométrico e de declividade da área de estudos no software ArcGis 10.1.

4.1.2.2 – Fase II: Banco de Dados

Nesta fase serão descritos os passos utilizados para a criação do banco de dados georreferenciado, envolvendo a entrada dos dados em ambiente SIG. O primeiro passo foi colocar todo o banco de dados em um mesmo sistema de coordenadas (plana) e projeção (UTM – Universal Transversa de Mercator e Datum SIRGAS 2000).

Foi utilizada a Carta Topográfica do IBGE, para o georreferenciamento e a partir de então o limite do Município de Ribeirão Bonito serviu de parâmetro para que se recortassem dos dados temáticos.

¹ A missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) foi realizada no ônibus espacial Space Shuttle Endeavour em fevereiro de 2000, obtendo dados de altimetria estereoscópica de 80% da superfície terrestre.

Os mapas temáticos preparados nesta etapa ficaram disponíveis em ambiente SIG, permitindo a manipulação e análise dos dados, por meio de sobreposições, cruzamentos, reclassificações e demais operações de álgebra de mapas, utilizando-se o SIG ArcGis 10.1.

4.1.2.2.1 – Entrada de Dados

Todas as fases foram realizadas com base na edição vetorial do ArcGis 10.1. A entrada de dados temáticos seguiu o fluxograma apresentado pela Figura 14.

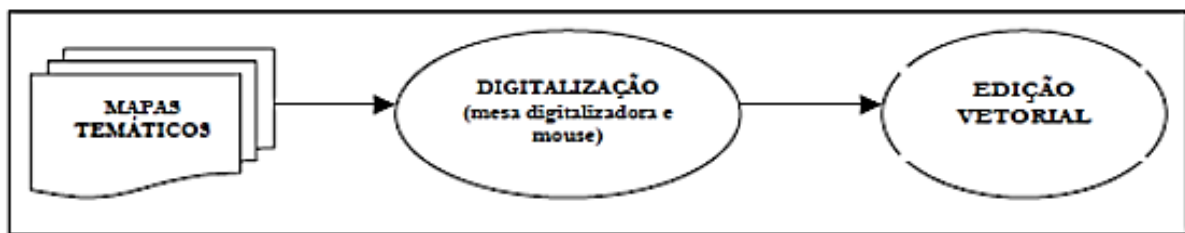


Figura 14 – Fluxograma de entrada de dados temáticos.

Fonte - Gomes (2005).

Foi realizada a digitalização dos dados para transformá-los em arquivos vetoriais. Procedeu-se à edição vetorial que procura corrigir erros oriundos do processo de digitalização, realizando operações para ajustar nós, juntar, quebrar, e eliminar linhas, entre outras. A fase de edição foi finalizada com a verificação dos polígonos, edição e atribuição de classes temáticas aos polígonos definidos.

4.1.2.3 - Fase III: Manipulação e Análise dos Dados

Serão descritas, neste item, as etapas envolvidas no tratamento dos mapas temáticos e dados orbitais para elaboração do mapeamento da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito. As técnicas de álgebra de mapas ligadas à integração dos dados e a elaboração de uma informação única a qual foi realizada por meio da técnica de Análise Multicritério, correspondente a uma importante etapa deste estudo.

4.1.2.3.1 – Álgebra de Mapas

O conceito de álgebra de mapas ou álgebra de campos, seria uma extensão da álgebra tradicional, onde as variáveis manipuladas são campos geográficos (Berry, 1993). A aplicação

da técnica de Análise Multicritério, necessita que todos os tipos de dados sejam padronizados em temáticos e suas formas de representação sejam padronizadas em Geo-Campos. Para este estudo foi necessário envolver diferentes tipos de representação de dados, sendo descritos a seguir, os procedimentos metodológicos utilizados para a manipulação dos dados representados por Geo-Campos e Geo-Objetos.

4.1.2.3.1.1 – Geo-Campos Temáticos

A partir de um geo-campo temático é realizada uma operação pontual de ponderação, transformando um geo-campo temático em um geo-campo numérico, atribuindo a cada classe do geo-campo analisado, um valor definido durante a análise do índice DRASTIC, como ilustra a Figura 15.

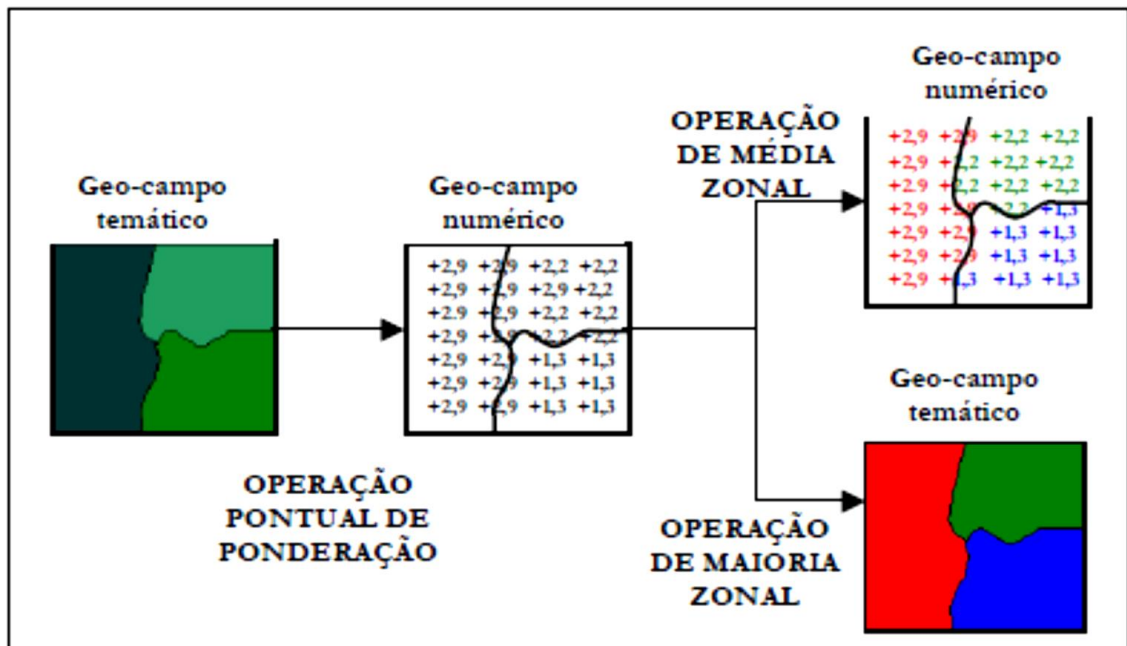


Figura 15 – Fluxograma das representações Geo-Campos.

Fonte - Gomes (2005).

4.1.2.3.2 – Integração e Manipulação de dados em SIG

A integração de dados em SIG, de uma forma geral, visa dar ao usuário uma visão unificada dos dados, mesmo que estes estejam em diferentes bases, permitindo consultas e análises desses dados. A integração de dados é o processo de combinar os dados residentes em diferentes fontes provendo aos usuários uma visão unificada desses dados (LENZERINI, 2002).

Após mapear os parâmetros a serem analisadas, uma importante etapa se faz com a interpolação dos mapas, a qual pode ser realizado por meio de diferentes técnicas e processos, elaborados em diversos SIG.

Esta etapa refere-se à inferência de pesos e cargas a serem ponderados. Os índices correspondentes a cada parâmetro da metodologia DRASTIC foram adaptados à realidade da área de estudo, os valores são descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros DRASTIC da Área de Estudos		
PARÂMETROS	VARIÁVEIS	CARGA
Profundidade da Zona Insaturada (m)	0 – 23	7
	23 – 35	2
	> 35	1
Recarga (mm/ano)	Formação Botucatu (> 254)	9
	Formação Pirambóia 465 (> 254)	9
	Sedimentos Aluvionares (> 254)	9
	Formação Serra Geral 215 (178 – 254)	8
	Formação Adamantina 75 (51 – 102)	3
Material do Aquífero	Formação Botucatu (Arenito maciço)	9
	Formação Pirambóia (Arenito maciço)	9
Tipo de Solo	Areias Quartzosas Distróficas	9
	Latossolo Roxo Distrófico	3
	Latossolo Vermelho Amarelo Álico	6
	Latossolo Vermelho Escuro Álico	6
	Podzólico Vermelho Amarelo Álico	5
	Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos	7
Topografia ou Inclinação do relevo (%)	0 – 1	10
	1 – 6	9
	6 – 12	5
	12 – 18	3
	> 18	1
Impacto da Zona Insaturada	Sedimentos Aluvionares	8
	Formação Botucatu	8
	Formação Pirambóia	8
	Formação Serra Geral	1
	Formação Adamantina	1
Condutividade Hidráulica (m/dia)	0,58 – 1,53	10
	1,53 – 3,4	9

4.1.2.3.3 – Somatório dos Pesos Inferidos aos Parâmetros e Variáveis do DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*.

Mediante a multiplicação entre os pesos dos parâmetros (constantes) DRASTIC e as cargas individuais das variáveis que compõem os parâmetros, foi elaborada a equação da área de estudos de acordo com a Equação 2. Obteve-se o Índice Final DRASTIC sendo responsável também, pela composição da escala de vulnerabilidade proposta.

$$\text{Índice DRASTIC} = 5 \times \frac{10}{3} + 4 \times \frac{38}{5} + 3 \times \frac{12}{2} + 2 \times \frac{36}{6} + 1 \times \frac{28}{5} + 5 \times \frac{26}{5} + 3 \times \frac{19}{2} \quad (2)$$

A mesma equação foi elaborada para o somatório dos pesos e cargas do DRASTIC *Pesticida* (Equação 3).

$$\text{DRASTIC } Pesticida = 5 \times \frac{10}{3} + 4 \times \frac{38}{5} + 3 \times \frac{12}{2} + 5 \times \frac{36}{6} + 3 \times \frac{28}{5} + 4 \times \frac{26}{5} + 2 \times \frac{19}{2} \quad (3)$$

A próxima etapa corresponde à álgebra de mapas, para análise, integração de dados e geração do mapeamento da vulnerabilidade, baseados nos pesos e cargas atribuídos aos parâmetros e variáveis do Índice DRASTIC.

4.1.2.3.4 - Análise Multicritério - Weighted Overlay (ArcGis 10.1)

A última etapa executada nesta pesquisa realizou-se por meio da sobreposição dos mapas referente aos parâmetros da metodologia DRASTIC, os quais foram ponderados com seus respectivos pesos e cargas, baseada na técnica de análise multicriterial ponderada, utilizada em casos que se têm diferentes cargas e pesos para os parâmetros e variáveis, que contribuem para a ocorrência de um determinado processo.

A ponderação é uma operação pontual da álgebra de mapas, sendo que uma das técnicas mais utilizadas é a análise multicriterial ponderada. Segundo Ferreira et al (2008), é uma técnica de modelagem de dado espacial que, permite agregar diferentes fontes de informação e estimar a probabilidade de um fenômeno ocorrer, sendo chamada por Eastman (1999) de modelagem por peso de evidência e por Bonham-Carter (1994) de superposição de mapas com múltiplas classes.

A metodologia DRASTIC tem como principal objetivo produzir uma informação única, sendo, portanto utilizada a ferramenta *Weighted Overlay* em Análise Espacial (Spatial Analyst Tools) do ArcGis 10.1 para finalização e elaboração do mapa de vulnerabilidade da área de estudos.

A ferramenta *Weighted Overlay* é utilizada em casos de cruzamento de mapas, a partir de pesos estabelecidos pelo usuário, viabilizando assim a Análise Multicritério (Weighted Overlay). Para geração do mapa de índice de vulnerabilidade DRASTIC, foram calculados os valores referentes à porcentagem que cada parâmetro representa na ponderação com base na ferramenta *Weighted Overlay*, representados na Tabela 3.

Tabela 3 – DRASTIC e percentuais de ponderação no ArcGis 10.1

Parâmetros	Valor Atribuído	Real (%)	Weighted Overlay (%)
D	5	21,73	22
R	4	17,40	17
A	3	13,05	13
S	2	8,70	9
T	1	4,34	4
I	5	21,73	22
C	3	13,05	13
7	23	100	100

Seguindo a metodologia descrita anteriormente, foram calculados os valores referentes à porcentagem que cada parâmetro representa na ponderação, para o índice DRASTIC *Pesticida*, por meio do uso da ferramenta *Weighted Overlay*, como apresenta a Tabela 4.

Tabela 4 – DRASTIC *Pesticida* percentuais de ponderação no ArcGis 10.1

Parâmetros	Valor Atribuído	Real (%)	Weighted Overlay (%)
D	5	19,23	19
R	4	15,38	15
A	3	11,53	12
S	5	19,23	19
T	3	11,53	12
I	4	15,38	15
C	2	7,72	8
7	26	100	100

4.2 – SENSORIAMENTO REMOTO

Para a execução da pesquisa, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto para identificação das classes de uso e cobertura da terra e ferramentas de análise espacial para o cálculo de áreas, construindo-se, assim, uma cartografia de síntese dos principais tipos de usos e coberturas situados sobre as áreas de afloramento do SAG na área urbana do município de Ribeirão Bonito.

A análise preliminar de imagens de satélite permitiu verificar que o município de Ribeirão Bonito tem como principal atividade de uso da terra, o cultivo de culturas como a cana-de-açúcar e cítricos além de áreas destinadas ao reflorestamento. Definidos com um dos objetivos desde estudo, a elaboração de um mapa de Uso e Cobertura da Terra, permitiram uma análise mais detalhada e pontual, colaborando com o mapeamento da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito.

A primeira etapa do mapeamento do uso e cobertura da terra consistiu na aquisição de uma imagem Landsat-5 TM, 220/75 de 25/06/2011 da área de estudos, em seguida foi criado o banco de dados, projeto e modelo de dados no SPRING 5.2 e iniciou-se o processamento digital da imagem (PDI), baseado nas da operações de classificação digital.

O PDI inclui todas as técnicas voltadas para a análise por computadores, o os dados multidimensionais adquiridos por diversos tipos de sensores. Segundo Crósta (1992), o PDI trata especificamente das técnicas utilizadas para identificar, extrair, condensar e realçar a informação de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem essas imagens.

As três grandes etapas que envolvem o PDI (pré-processamento, processamento e pós-processamento), são constituídas de diferentes processos e técnicas, a saber: aquisição da imagem, correções, realce, segmentação, classificação, extração de atributos, reconhecimento de padrões e elaboração de mapas. O fluxograma ilustrado na Figura 16, apresenta os procedimentos metodológicos e as principais etapas adotadas, sendo cada uma delas detalhada posteriormente.

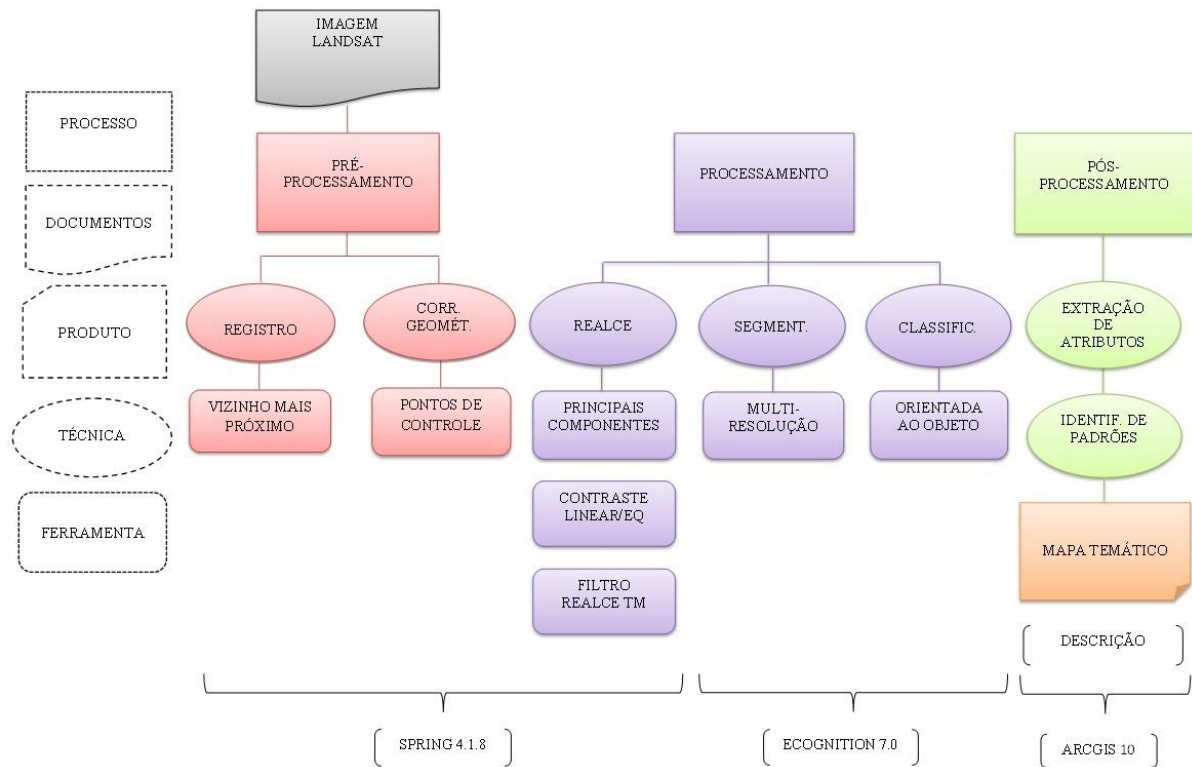


Figura 16 – Fluxograma de PDI e softwares utilizados.

4.2.1 – Fase I: Pré-Processamento e Aquisição de Dados Orbitais

Nesta fase será descrito o processo de seleção dos dados orbitais, o uso de aplicativos e equipamentos diversos para etapas específicas de trabalho.

4.2.1.1 - Seleção de Materiais

A primeira etapa deste estudo foi realizada mediante a seleção e aquisição de cenas do TM/LANDSAT-5, referentes à área de estudo, partindo-se da imagem selecionada criou-se o banco de dados georreferenciado, o qual será posteriormente integrado e manipulado em SIG. A descrição do tipo de material e as informações utilizadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos materiais utilizados

TIPO DE MATERIAL	FORMATO	INFORMAÇÕES UTILIZADAS
Imagem	Digital	- Descrição e identificação das classes de uso e cobertura da terra

4.2.1.2 – Dados Orbitais

Os dados orbitais foram adquiridos com base na imagem TM/Landsat, órbita/ponto 220/75, quadrante C. As características da imagem são exibidas na Tabela 6.

Tabela 6 - Características dos dados orbitais utilizados no trabalho

Imagem	Data	Formato	Resolução	Cobertura de nuvens	Bandas
Landsat	25/06/2011	Digital	30 m	0%	1,2,3,4,5,7

A imagem foi selecionada em formato digital, baseada em uma análise em diferentes datas, visando uso de uma imagem com menor porcentagem de nuvens. Foram realizados processamentos para melhorar a qualidade visual, os quais serão descritos no posteriormente.

4.2.1.3 – Pré-Processamento

A etapa de pré-processamento é necessária para correção de possíveis distorções. Crósta (1992) ressalta que logo após o processo de aquisição das cenas pelos sensores, essas imagens estão sujeitas a uma série de distorções espaciais, não possuindo precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos nela representados.

Meneses e Almeida (2012) afirmam que, as técnicas de pré-processamento são, essencialmente, funções operacionais para remover ou corrigir os erros e as distorções introduzidas nas imagens pelos sistemas sensores, devido aos erros instrumentais (ruídos espúrios), às interferências da atmosfera (erros radiométricos) e à geometria de imageamento (distorções geométricas).

4.2.1.3.1 – Correção Geométrica e Registro da Imagem

Segundo Novo (1993), a correção geométrica constitui-se na reorganização dos pixels de uma imagem em relação a um sistema de projeção cartográfica. Esta reorganização pode ser obtida por várias técnicas de reamostragem dos pixels da cena. A transformação geométrica pode ser executada através de três modelos distintos: o modelo de correções independentes, o modelo fotogramétrico e o modelo polinomial.

O modelo polinomial é também conhecido como registro de imagens, compreende uma transformação geométrica que relaciona coordenada de imagem (linha, coluna) com coordenadas de um sistema de referência (D'Alge, 1999).

Segundo Crósta (1992) é necessário realizar o registro das imagens para relacionar as coordenadas da imagem (linha e coluna) com coordenadas geográficas (latitude e longitude) de um mapa base. Essa transformação elimina distorções existentes na imagem, geradas durante o processo de aquisição da imagem por parte do sensor orbital, além de possibilitar a realização da comparação entre alvos presentes em mais de uma imagem.

A imagem selecionada foi registrada utilizando-se a base cartográfica a Carta Topográfica IBGE (1:50.000) do município de Ribeirão Bonito. No software SPRING, foi realizado o registro da imagem através de pontos de controle, definição da coordenada de referência e grau do polinômio. Posteriormente, a imagem foi corrigida geometricamente de acordo com seus respectivos meridianos centrais, na projeção UTM.

As etapas para realização da correção geométrica foram aplicadas a partir destes pontos, utilizando o algoritmo do vizinho mais próximo, que segundo Crósta (1992), é o método mais adequado para a aplicação da classificação, pois preserva o valor do nível de cinza dos *pixels* e não modifica a radiometria dos dados, visto que, a convolução cubica é a técnica que impõe a alteração mais acentuada.

4.2.2 – Fase II – Processamento

Após a etapa de pré-processamento da imagem, criou-se um banco de dados georreferenciado, o qual será essencial no suporte às etapas posteriores envolvendo o realce e a classificação da imagem. Na etapa de processamento empregaram-se operações de realce e integração de dados digitais, visando melhorar a qualidade visual das imagens e ressaltar as informações de maior interesse, facilitando o processo de fotointerpretação, segmentação e classificação (SILVA, 2003).

4.2.2.1– Realce

Moik (1980) considera o realce de imagem como o primeiro passo do processamento, que corresponde ao conhecimento da distribuição estatística dos dados da imagem, obtendo-se o valor do nível de cinza. O realce é utilizado somente para distinguir características ou contornos de interesse na imagem, adaptando-as ao nosso sistema visual.

Nesse contexto, segundo Gomes (2005) a finalidade da aplicação de técnicas de realce é melhorar a visualização dos elementos que compõem a cena. O histograma é uma ferramenta básica para realizar realce e análise de imagens, pois revela a distribuição dos níveis de cinza e os apresenta na forma de um gráfico que fornece o número de *pixel* da imagem para cada nível de cinza. A manipulação do histograma permite obter informações instantâneas para a análise.

Após a aplicação das técnicas descritas na etapa de pré-processamento, foram realizados testes para determinar qual a melhor composição colorida das bandas, o melhor realce e filtragem da imagem que atendessem os objetivos propostos.

4.2.2.1.1 - Análise dos Principais Componentes (APC)

A análise dos principais componentes ou PCA (do inglês Principal Component Analysis) é um método que tem como principal objetivo, a redução dos dados analisados, a eliminação de sobreposição e a escolha das formas mais representativas de dados a partir de combinações lineares das variáveis originais (bandas).

Para melhor realçar as feições foi aplicada a técnica de principais componentes com as bandas originais. A geração de principais componentes no SPRING consiste em selecionar as seis bandas originais, em ordem crescente de numeração, analisar e interpretar as matrizes de correlação e de covariância que as bandas selecionadas irão gerar.

O fato das bandas de uma imagem serem correlacionadas faz com que a capacidade de extração de informação, a partir destas bandas, seja reduzida. Affonso (2002) afirma que, a informação que uma banda contém é similar a das outras bandas, portanto, as informações são redundantes, e não contribuem em muito na análise da imagem.

A ideia da APC é a partir das bandas originais da imagem multiespectral, gerar novas bandas descorrelacionadas, isto é, sem redundância de informação. A geração de principais componentes no SPRING consiste em selecionar as seis bandas originais em ordem crescente de numeração, analisar e interpretar as matrizes de correlação e de covariância que as bandas selecionadas irão gerar.

4.2.2.1.2 – Contraste (Linear e Equalização)

A técnica de realce por contraste, tem por objetivo realçar a qualidade visual e por conseguinte a discriminação dos alvos de interesse. Foram realizadas operações de ampliação

de contraste para cada principal componente, de modo a expandir a amplitude original dos níveis de cinza para todo o intervalo (0,255).

Existem diversos tipos de contrastes que podem ser aplicados em uma imagem no SPRING: mínimo e máximo, linear, raiz quadrada, quadrada, logaritmo, negativo, equalização, entre outros. Nessa etapa, foram testados diversos tipos de contrastes, sendo os contrastes linear e de equalização, os que mais realçaram as feições que correspondiam aos objetivos do estudo.

4.2.2.2– Filtragem

Após contrastar a imagem, uma importante etapa refere-se à filtragem, pois de acordo com Mather (1999), os filtros são utilizados quando se pretende realçar alguma característica ao lado da desfiguração de outras. Em estudos de grandes áreas de cultivo de cana-de-açúcar e áreas urbanas, as imagens de sensoriamento remoto apresentam feições de baixa frequência de variação de tons de cinza.

Entre os diferentes tipos de filtros lineares testados no SPRING (passa baixa, passa alta, direcional de borda, não direcional, realce TM e máscaras 3x3, 5x5 e 7x7), a filtragem que apresentou o melhor resultado, de acordo com os objetivos propostos, foi o de filtro linear de realce de imagem TM, o qual realça as feições mantendo a informação de contexto.

4.2.2.3 – Segmentação (Multi Resolução)

A segmentação de imagens consiste num processo de agrupamento de pixels que possuem características semelhantes (*MENESES e ALMEIDA, 2012*). De acordo com Gao (2009), trata-se da decomposição de uma imagem em regiões discretas, contíguas e que não se interceptam, constituindo, semanticamente, segmentos significativos.

A segmentação é um procedimento que visa reconhecer regiões de uma imagem como objetos, existindo diversos métodos de segmentação baseados em diferentes princípios (limiarização de histograma, detecção de bordas, textura, morfologia matemática, etc.), cada qual mais adequado a uma aplicação específica (*MARQUES FILHO et al, 1999*).

Após a aplicação de técnicas de realce, a imagem encontra-se pronta para ser segmentada e posteriormente classificada. Tais etapas foram realizadas no eCognition. A segmentação é uma etapa fundamental no processo de análise de imagens, a qual uma imagem é dividida em regiões que devem ser associadas às áreas de interesse da aplicação.

O procedimento de segmentação realizado pelo eCognition é chamado de *Multiresolution Segmentation*, desenvolvido para suprir as limitações das técnicas tradicionais, já que, essa segmentação orienta-se pela forma e valores digitais dos objetos, através de parâmetros utilizados para segmentação como: escala, forma, cor, compacidade e suavidade.

Foi definido para o fator escala três faixas de segmentação das imagens para teste de eficiência, fixando valores de quarenta (40 – Nível I), oitenta (80 – Nível II), e cento e vinte (120 – Nível III). Para os demais parâmetros de segmentação utilizados pelo eCognition, foram fixados os valores de 0,8 para a cor, 0,2 para a forma da qual derivou-se 0,5 de suavidade e 0,5 de compacidade, para todos os níveis. O Nível III foi o que melhor agrupou os elementos de interesse das imagens e sequenciados conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Arranjos dos Níveis de Segmentação

Nível	Fator Escala	Fator de Forma	Fator Cor	Compacidade	Suavidade
I	40	0,2	0,8	0,5	0,5
II	80	0,2	0,8	0,5	0,5
III	120	0,2	0,8	0,5	0,5

4.2.2.4 – Classificação baseada no objeto

Meneses e Almeida (2012) definem a classificação de imagens multiespectrais como o processo de associar os pixels da imagem a um número finito de classes individuais que representam os objetos do mundo real, com base nos seus valores digitais.

Jensen (1996) em seus estudos relacionados ao sensoriamento remoto, refere-se à classificação de imagem, como um processo utilizado para criação de mapas temáticos a partir de dados advindos de sensores remotos, produzindo uma interpretação da informação trazida na imagem, sendo os temas escolhidos de acordo com a necessidade e a área de estudo selecionada.

Meneses e Almeida (op. cit.) ressaltam que a maioria dos classificadores executa a classificação por pixel, que se utiliza somente da informação espectral de cada pixel para encontrar regiões homogêneas, a partir de medidas de distâncias ou de probabilidades de um pixel pertencer a uma classe específica. Já a classificação por regiões, seria um processo de decisão, o qual leva em consideração um agrupamento de pixels que é usado como unidade de classificação.

A classificação dos alvos foi realizada no eCognition, baseada na abordagem de classificação de dados baseada no objeto, considerando não apenas a informação espectral, mas também a informação espacial e contextual dos objetos, determinadas através de padrões locais na imagem por um grupo de pixels vizinhos.

Segundo Tuzine, Rosot e Centeno (2011), o classificador denominado “vizinho mais próximo” classifica a imagem num dado espaço da feição e com amostras dadas a classes de pertinência. O princípio é simples: o software necessita de amostras representativas para cada classe.

Como o eCognition é baseado numa abordagem orientada ao objeto para a análise das imagens, assim os objetos da imagens passam a ser considerados amostras. Depois da declaração das amostras representativas de cada classe, o algoritmo procura as amostras próximas dos objetos no espaço da feição para cada imagem. A distância no espaço da feição entre as amostras do objeto e objetos da imagem a serem classificados são normalizados (padronizados) pelo desvio padrão de todos os valores da feição.

4.2.3 – Fase III - Pós-Processamento

O pós-processamento visa aprimorar o resultado da segmentação e classificação, extrair atributos, reconhecer padrões e interpretar as informações obtidas. Muitas vezes o resultado da segmentação não é adequado, sendo necessária uma etapa de pós-classificação para união e eliminação de objetos comuns, evitando correlacionar áreas erroneamente, antes da realização de medidas nos objetos e confecção do mapa de uso e cobertura da terra.

Após a classificação, sobre os resultados de cada teste foi realizado o processo de pós-classificação com a finalidade de remoção de pequenos agrupamentos de pixels ou de pixels isolados, antes da realização de medidas nos objetos e confecção do mapa de uso e cobertura da terra.

4.2.3.1 – Pós-Classificação e Validação dos Resultados

As imagens foram avaliadas por análise multivariada discreta conhecida como estatística Kappa (COHEN, 1960), e interpretação visual e comparativa. Segundo Antunes e Lingnau (1997), o coeficiente Kappa é um dos mais indicados para mensurar concordância

entre classificações de imagens orbitais, sendo adotado nesse estudo para validação e acurácia dos resultados.

4.2.3.2 – Extração de Atributos e Reconhecimento de Padrões

A extração de atributos e reconhecimento de padrões são etapas do pós-processamento que consistem na análise dos objetos na imagem, os quais são identificados e caracterizados. A interpretação visual requer do usuário conhecimentos prévios, tais como a época adequada para a obtenção da imagem, tipo de produto e as bandas a serem escolhidas.

Finaliza-se com a definição das classes dos dados analisados, transformando a informação em conhecimento. Para elaboração das classes de uso e cobertura da terra, este estudo analisou diversas metodologias de classificação, sendo adotada para os objetivos dessa análise a classificação do IBGE (2006). Na pós-processamento foi utilizado o software ArcGis para geração do layout e legenda referente às classes de uso e cobertura da terra.

A fase de interpretação das imagens teve como resultado o mapa temático de uso e cobertura da terra, que foi elaborado a partir da imagem classificada e trabalho de campo, para validação da análise e delimitação das unidades de paisagem natural e os polígonos de ação antrópica.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - PARÂMETROS DRASTIC

A análise da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito, com base no método DRASTIC, proposto por Aller et al (1987), foi delineada com base no emprego de geotecnologias, sendo os seus resultados descritos a seguir com a síntese dos parâmetros envolvidos e seus respectivos resultados.

5.1.1 –Profundidade da Zona Não-Saturada (D)

Para a aplicação do método DRASTIC, o parâmetro profundidade da zona não-saturada foi obtido com base no mapeamento realizado na mesma área de estudo por Queluz e Sturaro (2011). Partindo de dados preexistentes, o mapa da espessura da zona não-saturada foi digitalizado e adaptado à escala trabalho.

Através de ensaios e interpretação de mapas topográficos (1:10.000), Queluz e Sturaro (2011), obtiveram dados referentes à espessura da zona não-saturada, o qual verificou-se que, as maiores espessuras (62m a 142m) estão no setor centro-oeste e a nordeste, sobre a Formação Serra Geral e Adamantina, em áreas de recarga indireta, e a sudeste, em janelas aflorantes na Formação Botucatu, como recarga direta, como ilustra a Figura 17.

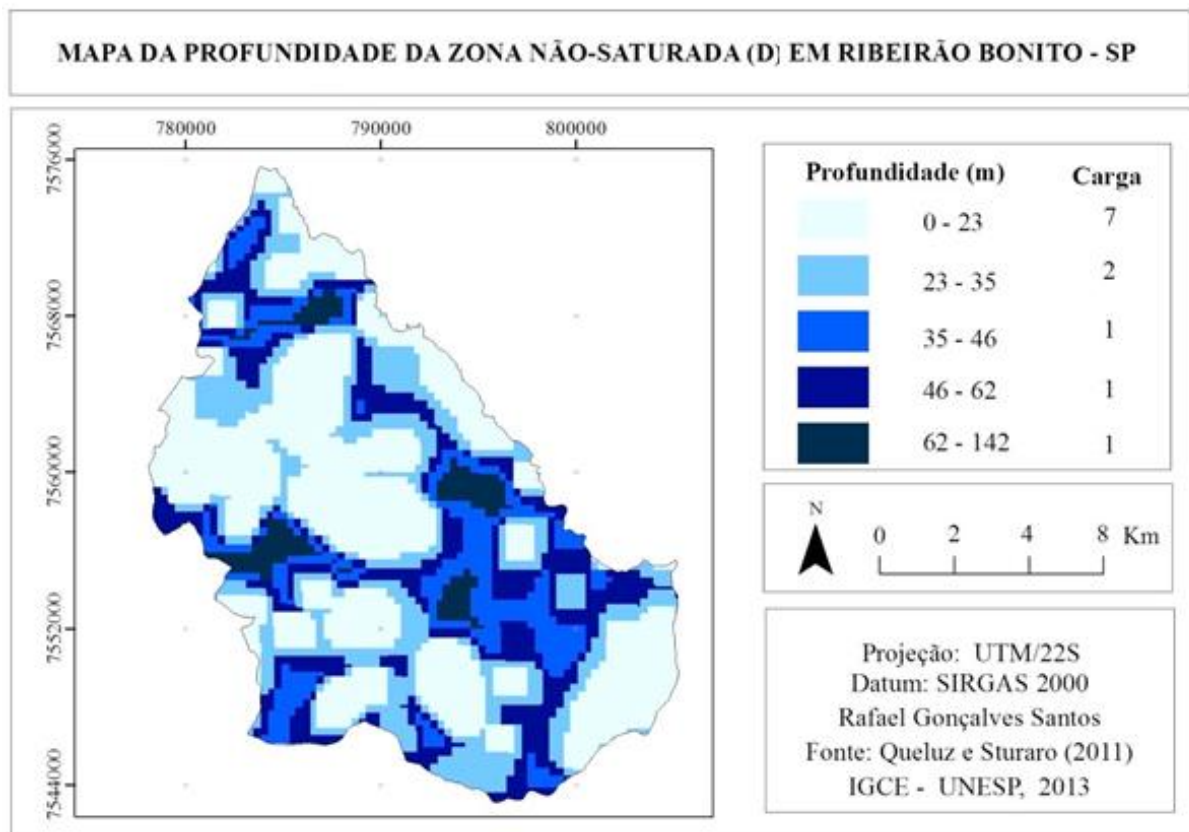


Figura 17 – Profundidade da zona não-saturada (D), no município de Ribeirão Bonito.

Em relação às menores espessuras (0m a 23m), destaca-se que as águas estão mais vulneráveis à contaminação, pois o nível freático encontra-se mais próximo à superfície, essa situação é evidenciada nas áreas de afloramento das Formações Botucatu e Pirambóia.

5.1.2 – Recarga do Aquífero (R)

Para obtenção do parâmetro Recarga do Aquífero (R), realizou-se no SIG ArcGis 10.1, a espacialização dos dados de recarga de Rabelo (2006), sobre a base cartográfica do mapa de geologia digitalizada do IPT (2000). Por fim, foram realizados ajustes dos mesmos e a compatibilização das informações com a escala a ser utilizada no estudo (Figura 18).

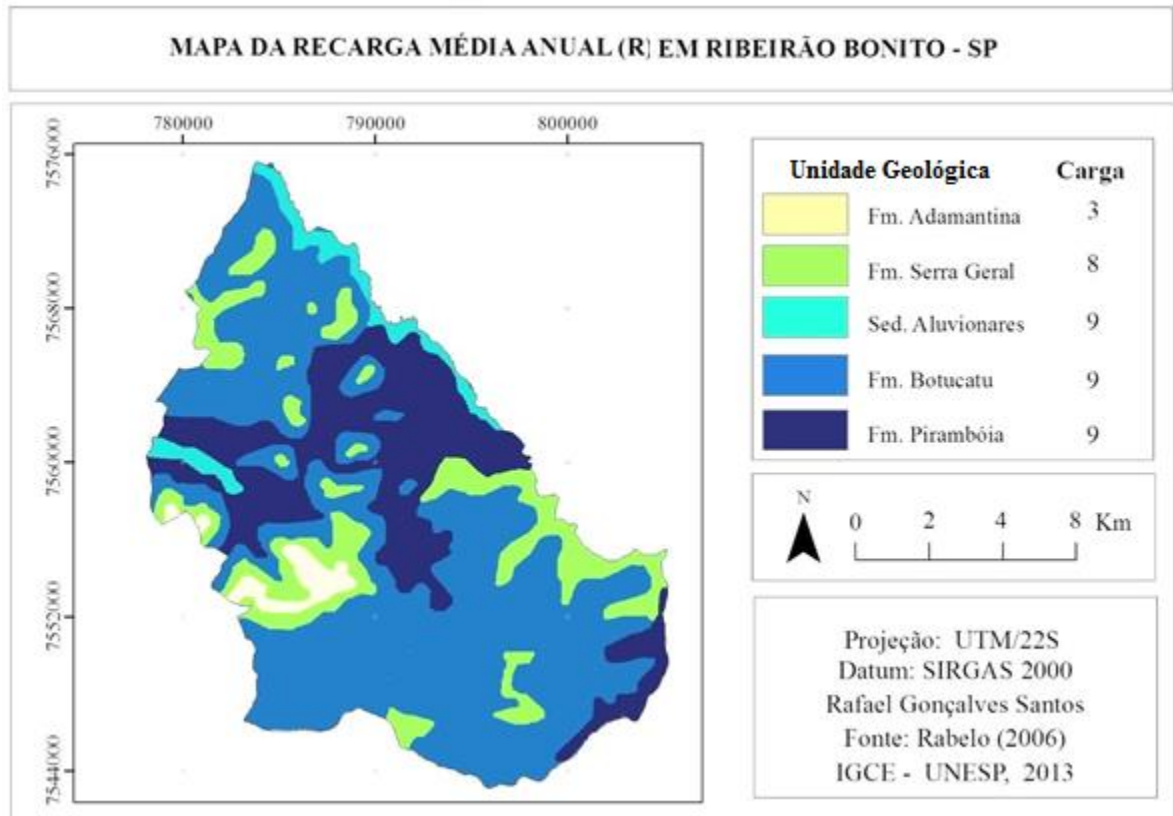


Figura 18 - Taxas de Recarga (R), no município de Ribeirão Bonito.

Os resultados obtidos por Rabelo (2006) expressam que, a taxa de recarga nas bacias do Sistema Jacaré - Tietê, processa-se essencialmente na região de afloramento do aquífero, por meio das formações Botucatu/Pirambóia. A recarga no município de Ribeirão Bonito atinge os maiores índices nas Formações Botucatu/Pirambóia, com valor médio de 465 mm, seguida dos Sedimentos Aluvionares com uma recarga média de 305 mm.

Entre as menores taxas de recarga, estão as regiões situadas sob as formações Adamantina com 75mm e Serra Geral 215mm, esta última oriunda de derrames basálticos possui fissuras e fraturas, representando um meio de drenança ao SAG subjacente.

5.1.3 – Material do Aquífero (A)

O mapa referente ao parâmetro Material do Aquífero (A) foi elaborado tomando-se como base o mapa geológico realizado pelo IPT (2000), como pode ser verificado na Figura 19. Os índices relativos de vulnerabilidade foram estabelecidos de acordo com os indicados por Aller et al (1987), quando da publicação da metodologia DRASTIC.

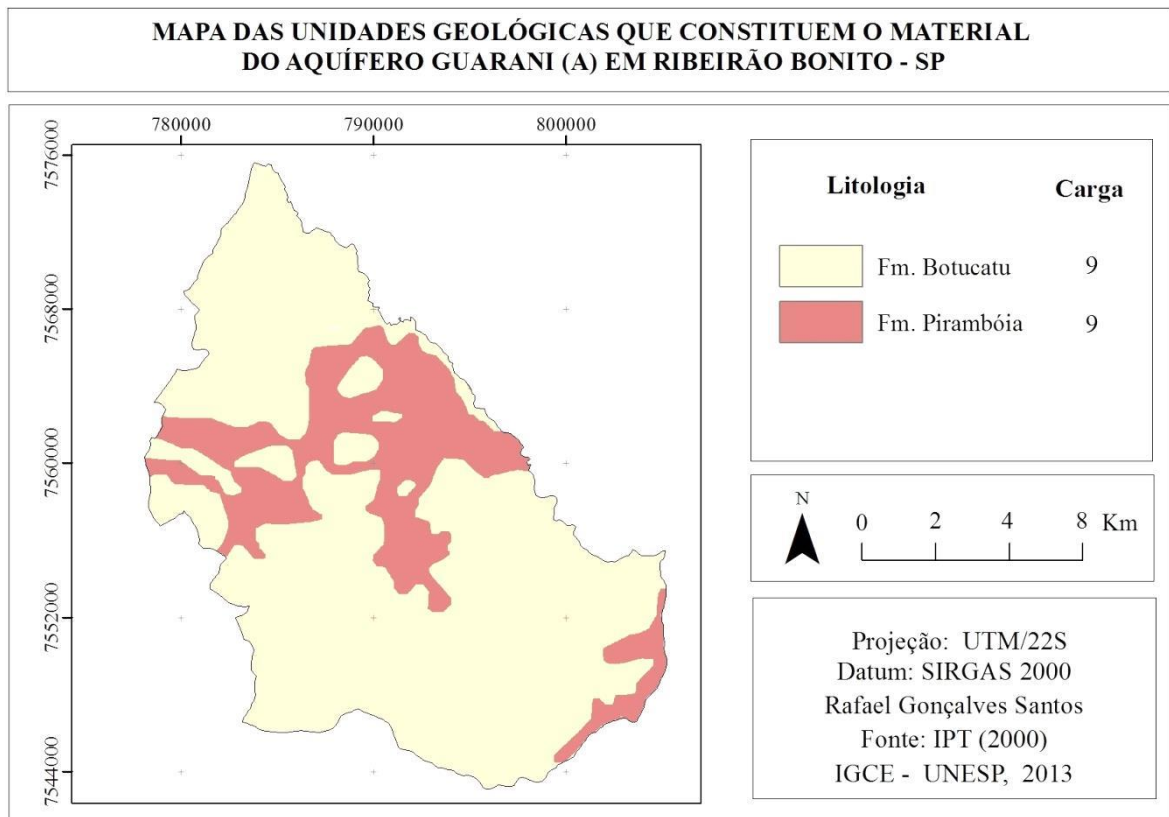


Figura 19 – Material do aquífero (A) no município de Ribeirão Bonito

O parâmetro material do aquífero considerou a constituição litológica a qual reflete diretamente na vulnerabilidade do aquífero, tornando-o mais vulnerável, quão mais arenosa for a zona saturada, devido à maior mobilidade que um possível contaminante pode apresentar quando nele inserido.

A Formação Botucatu e Pirambóia enquadram-se no tipo de meio aquífero dos arenitos porosos, correspondendo aos arenitos acamados, os quais receberam carga 9 conforme metodologia DRASTIC. Tais áreas recebem recarga direta oriunda de precipitações pluviométricas. Apresentam boa permeabilidade e porosidade, por isso, permitem armazenamento e captação de água em grandes quantidades.

5.1.4 – Tipo de Solo (S)

O parâmetro S foi obtido com base no relatório do IPT (2000), para o modelo DRASTIC o parâmetro solo recebe peso 2. Partindo-se de mapas preexistentes, realizou-se a compilação dos mesmos para sua inserção no SIG ArcGis 10.1, em seguida, foram realizados ajustes dos mesmos visando à compatibilização das informações com a escala a ser utilizada no estudo (Figura 20).

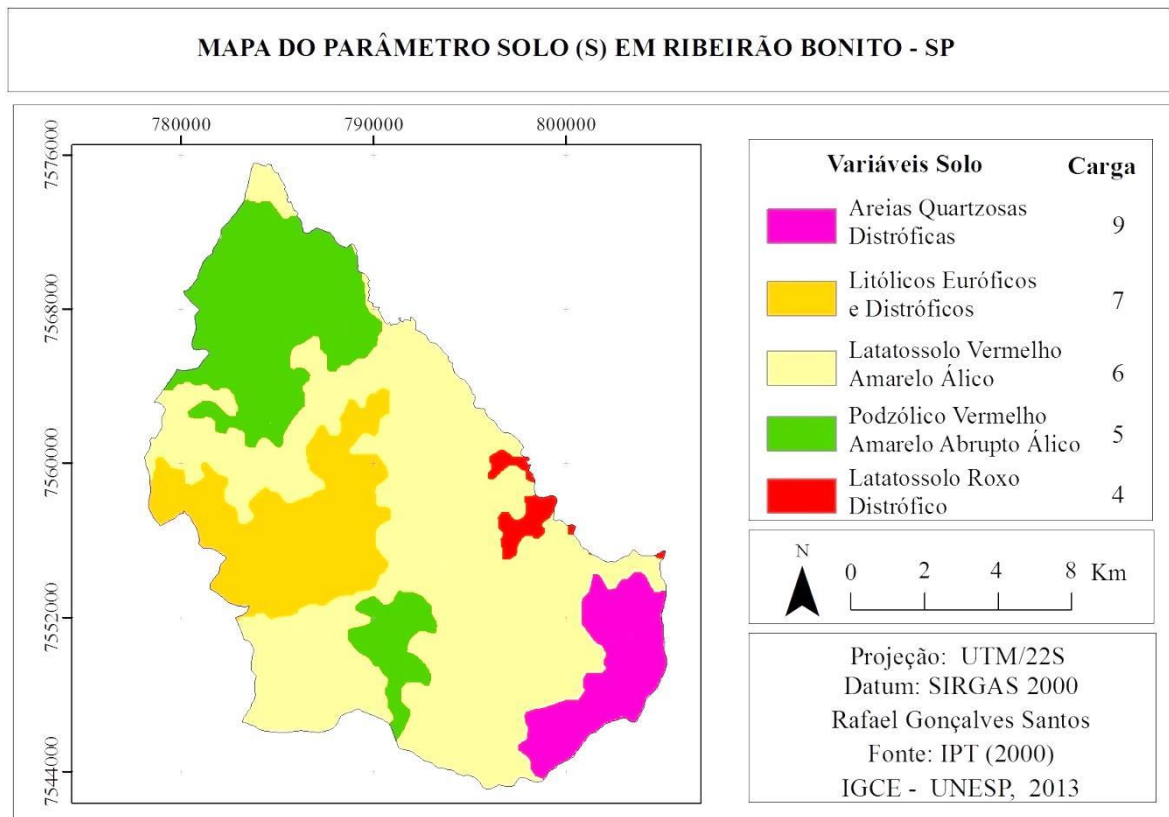


Figura 20 - Classes de tipos de solo (S) no município de Ribeirão Bonito.

O enquadramento e a pontuação deste fator basearam-se no mapeamento do IPT (2000), o qual destaca a granulometria do solo, a topografia e o substrato rochoso como fatores que definem a sua maior ou menor permeabilidade do solo.

Nesse contexto, ressaltam-se os solos provenientes das Formações Botucatu/Pirambóia, sendo as Areias Quartzosas Distróficas apresentando íntima subordinação com arenitos da Formação Botucatu, as que receberam as maiores cargas (9).

Os Latossolos Vermelho-Amarelo receberam carga 6, apesar de apresentarem maior profundidade, e no caso dos Latossolos Vermelhos apresentarem significantes teores de argila e silte, ambos localizam-se, em sua maioria, sob terrenos planos, facilitando a infiltração, o que segundo a metodologia DRASTIC elevam as cargas atribuídas.

Com relação aos Latossolos Roxos Distróficos provenientes da Formação Serra Geral, apresentam textura argilosa a muito argilosa, resultantes da decomposição de rochas basálticas, além de estarem situados sob terrenos mais íngremes, sendo assim essa variável recebeu carga 4.

Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos receberam segundo a metodologia DRASTIC, carga 7, por estes localizarem-se, em sua maioria, sob relevos de alta declividade, onde a ação do escoamento superficial sobrepõe-se à infiltração, levando à formação de solos rasos de pequena espessura, segundo o IPT (2000), normalmente entre 20 a 40 cm de profundidade. Soma-se a estas características o solo apresentar textura média e argilosa, com fases pedregosas e não pedregosas.

Os solos classificados como Podzólico Vermelho Amarelo Álico receberam carga 5, por se tratar de solos que compreendem minerais não hidromórficos, com horizonte B textural. São solos que variam de bem a moderadamente drenados e relativamente profundos com textura média/argilosa (IPT, op. cit.).

5.1.5 – Topografia (T)

Segundo a metodologia DRASTIC, o parâmetro topografia recebe o menor peso (1) dentre os parâmetros analisados, elevando o peso (3) na metodologia DRASTIC *Pesticida*, porém este parâmetro é fundamental na determinação da vulnerabilidade, uma vez que, a topografia influencia na recarga dos aquíferos. Isso se justifica pelo fato que, nas declividades menores o processo de infiltração ocorre com maior intensidade, já nas declividades maiores ocorre maior escoamento superficial e, conseqüentemente, menor será a infiltração.

Para geração do mapa que apresenta o parâmetro Topografia (T), realizou-se a aquisição dos pontos cotados na imagem SRTM, posteriormente foi realizada a transformação do geo-campo numérico em geo-campo temático para que este fator fosse ponderado. Para determinação da declividade utilizou-se a ferramenta *Slope*, do ArcGis 10.1, o resultado do mapeamento da declividade pode ser verificado na Figura 21.

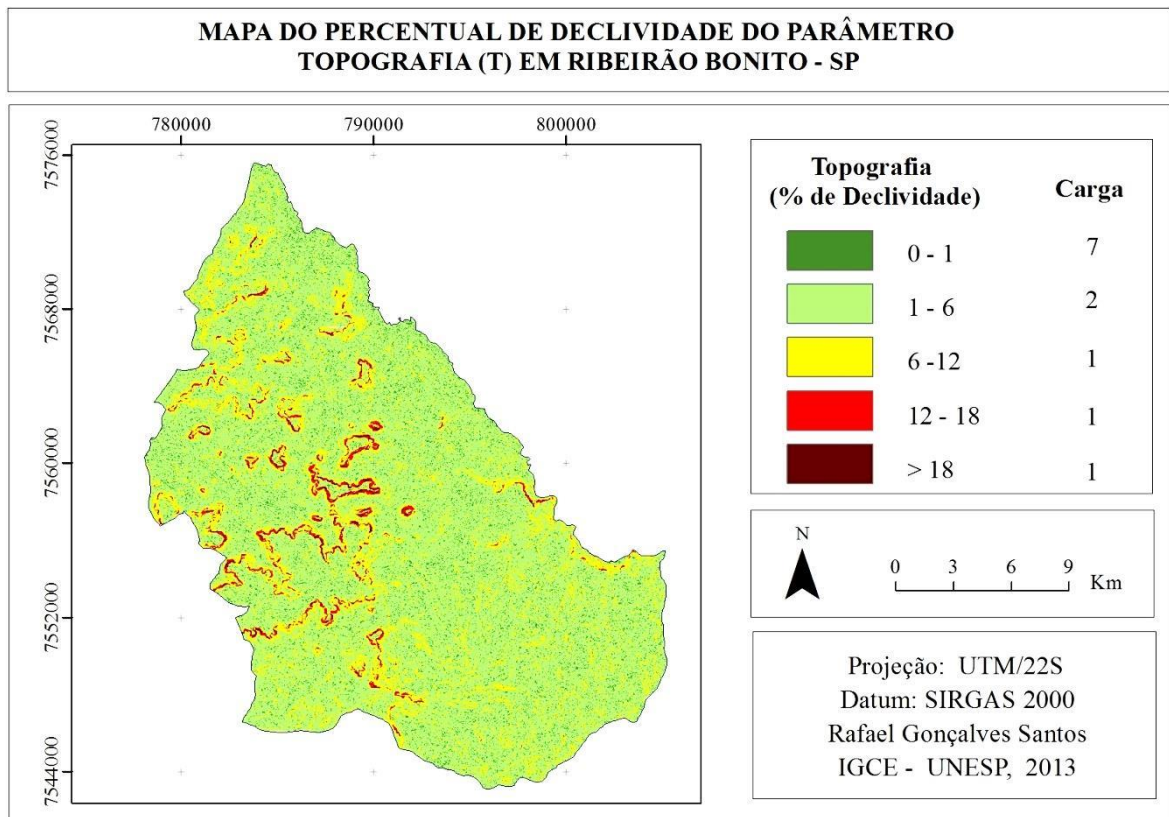


Figura 21 – Topografia (T) do município de Ribeirão Bonito.

Obtiveram-se intervalos de declividade de 0 a maior que 18%, conforme indicado pelo método DRASTIC, para o intervalo entre 0 - 1%, caracterizados como superfícies extremamente plana ou com declividades insipientes, foram atribuídas as cargas máximas (10) segundo a metodologia DRASTIC, uma vez que, tais localidades apresentam alta taxa de recarga e baixo potencial para o escoamento. Pouco diferenciado apresenta-se a classe de declividade compreendida entre os intervalos de 1 - 6%, os quais foram ponderados com a segunda maior carga (9), ambas as classes de declividade encontram-se situadas, em sua maioria, sob as Formações Botucatu/Pirambóia.

As declividades compreendidas entre os intervalos de 6 a maiores que 18%, situam-se em sua maioria, sob as Formações Serra Geral e Adamantina, apresentando alta declividade ao longo das escarpas e das cuestas basálticas. Essas localidades diminuem o potencial de um contaminante atingir o aquífero, por se tratarem de áreas que permitem maior escoamento e menor infiltração.

A classe que compreende o intervalo de 6 - 12% recebeu carga 5, por incluir localidades que ainda apresentam tendência à infiltração. As classes compreendidas entre os

intervalos de 12 - 18% e maiores que 18% foram ponderadas com as menores cargas (3 e 1 respectivamente), caracterizando-se como áreas pouco vulneráveis.

5.1.6 – Material da Zona Não-Saturada (I)

Da mesma forma que no parâmetro material do aquífero, o mapa para o parâmetro I foi desenvolvido com base no relatório do IPT (2000). As classes adotadas são semelhantes as do parâmetro A, apresentando maior diversidade litológica das formações mais superficiais.

Os índices relativos de vulnerabilidade tomados como referência foram estabelecidos, com base no original da metodologia (ALLER et al, 1987). O resultado do mapeamento do parâmetro I, referente à litologia da zona não-saturada, pode ser verificado na Figura 22.

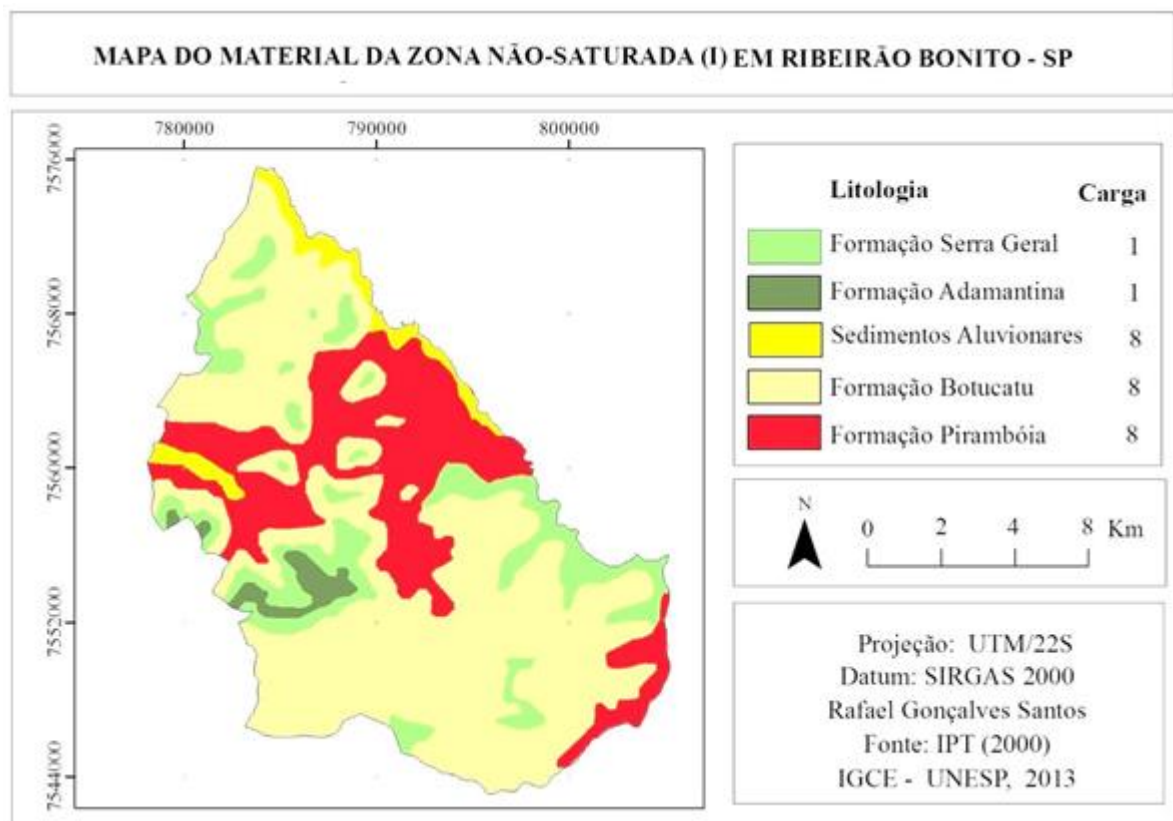


Figura 22 – Impacto da Zona não-saturada (I) no município de Ribeirão Bonito.

O método DRASTIC, proposto por Aller et al (1987), destaca que caso de estudos sobre aquíferos em áreas livres, deve-se avaliar os constituintes da zona vadosa que mais influenciam na vulnerabilidade. Mesmo quando o nível freático for aflorante, ou muito próximo da superfície, sendo definida a constituição da zona vadosa e atribuído o índice adequado.

Para as regiões em que o SAG encontra-se confinado pela Formação Serra Geral e recoberto pela Formação Adamantina, foram atribuídas cargas mínimas (1), uma vez que, segundo a metodologia a presença de uma camada confinante minimiza a ação e tempo de contato do poluente e retarda o processo de infiltração e recarga do aquífero.

Para os Sedimentos Aluvionares, os quais apresentam íntima relação com a Formação Botucatu, foram atribuídas as maiores cargas (8), por se tratarem de sedimentos com baixo teor de argila e silte e alta taxa de recarga. Os arenitos das Formações Botucatu/Pirambóia foram enquadrados na classe de arenitos recebendo cargas idênticas, conforme o método DRASTIC podendo variar a carga entre 4 - 8. A Formação Pirambóia foi ponderada com carga 8, assim como a Formação Botucatu.

5.1.7 – Condutividade Hidráulica (C)

O parâmetro Condutividade Hidráulica foi obtido com base no mapeamento realizado na mesma área de estudo por Queluz e Sturaro (2011). A partir destes dados preexistentes, o mapa da condutividade hidráulica foi apenas digitalizado e adaptado à escala de trabalho, como ilustra a Figura 23.

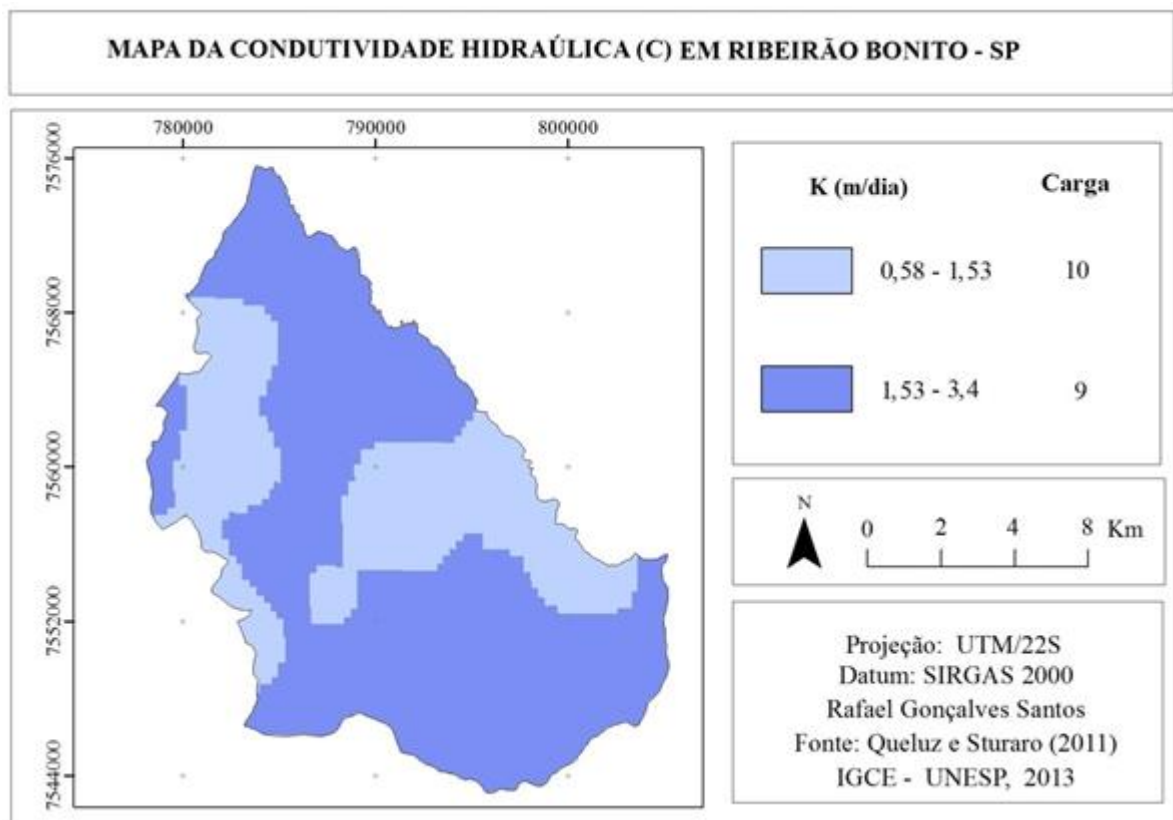


Figura 23 - Condutividade Hidráulica (C), no município de Ribeirão Bonito.

Queluz e Sturaro (2011) obtiveram a condutividade hidráulica da área de estudos, com base em ensaios e interpretação de mapas topográficos (1:10.000). Contatou-se presença dos maiores índices de condutividade (1,53 a 3,4 m/d) localizados no setor centro-norte, nos arenitos da Formação Botucatu e nos Sedimentos aluvionares (Cenozóicos). Verifica-se que nessas formações a condutividade hidráulica apresenta-se maior que nas demais formações litológicas, pois a percolação da água ocorre com maior facilidade, devido à maior permeabilidade facilitando a circulação da água no interior destas unidades hidroestratigráficas.

Os menores índices (0,58 – 1,53 m/d) são verificados nas regiões noroeste e leste, região dos basaltos da Formação Serra Geral e arenitos da Formação Adamantina, áreas caracterizadas como de recarga indireta. A Formação Serra Geral apresenta baixa condutividade hidráulica, devido à dificuldade de percolação, ocorrendo mais comumente a falhas e fissuras.

5.2 - ÍNDICE DRASTIC

Para o estabelecimento das classes de vulnerabilidade, seguiu-se o procedimento proposto no método DRASTIC (ALLER et al, 1987). Assim, de acordo com o modelo, foram fixados valores conforme as características dos parâmetros considerados. Estes foram multiplicados, como produto resultou os valores que indicam as classes de vulnerabilidade do aquífero, conforme valores fixados, assim estipulados.

Após se multiplicar os pesos dos parâmetros intermediários pelas cargas das variáveis, verificou-se que o índice final DRASTIC variou de 26 – 137,1 o que, segundo a escala de vulnerabilidade apresentada anteriormente, corresponde à valores de vulnerabilidade baixa, média e alta. Os valores referentes ao cálculo do somatório do índice DRASTIC são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores da ponderação do DRASTIC

Parâmetros	Σ	Classes	Média	Pesos	Resultado
D	10	3	3,3	5	16,6
R	38	5	7,6	4	30,4
A	12	2	6	3	18
S	36	6	6	2	12
T	28	5	5,6	1	5,6
I	26	5	5,2	5	26
C	19	2	9,5	3	28,5
					Total = 137,1

Os dados referentes aos dois índices foram então compilados para o SIG ArcGis 10.1, para que o software realiza-se a ponderação e espacialização das classes de vulnerabilidade mediante o uso da ferramenta *Weighted Overlay*.

De acordo com escala de vulnerabilidade DRASTIC na presente área de estudos, os valores limites de vulnerabilidade foram de 26 – 137,1, representando índices de vulnerabilidade baixa e alta, respectivamente. Entre este intervalo, valores de vulnerabilidade obtidos até 71 são considerados baixos; entre 71 e 126 a vulnerabilidade é considerada média; entre 126 e 180 a vulnerabilidade é considerada alta. Os resultados do mapeamento DRASTIC são representados na Figura 24, e os percentuais em Km² de cada classe na Tabela 9.

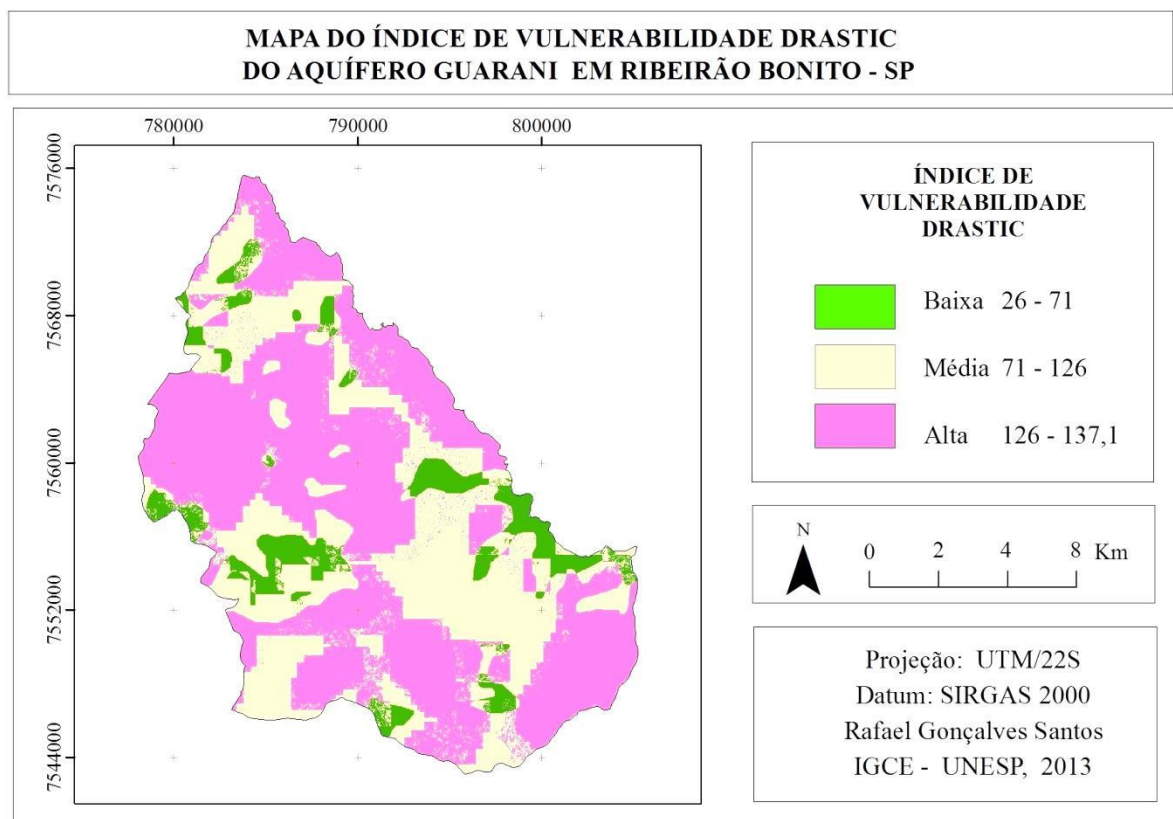


Figura 24 – Vulnerabilidade do SAG no Município de Ribeirão Bonito.

Tabela 9 – Índice DRASTIC

Classes	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Alta	262,4	55,5
Média	168,4	35,6
Baixa	41,3	9,0
Total	472,1 Km²	100 %

O mapeamento do índice de vulnerabilidade do SAG, baseado no emprego do método DRASTIC no município de Ribeirão Bonito, aponta que, em sua maioria, o município apresenta uma alta vulnerabilidade frente à poluição potencial, correspondendo a mais da metade do município. Verifica-se que, em seguida, aparece a classe de média vulnerabilidade, e as menores áreas foram referente à classe de baixa vulnerabilidade.

Os resultados apontam que, dentre as classes de vulnerabilidade, a classe que apresentou o maior índice referente às áreas com média vulnerabilidade, correspondem ao total de 262,4 Km² e 55,5% do município. Verifica-se que a classe correspondente às áreas com alta vulnerabilidade, frente à poluição potencial, situam-se em sua maioria, sob superfícies suaves com baixo percentual de declives (0 – 6%), apresentando espessura da zona insaturada entre 0 e 35m e solos do tipo latossolo vermelho amarelo álico, areias quartzosas distróficas e solos litólicos eutróficos e distróficos.

As regiões correspondentes aos altos índices de vulnerabilidade encontram-se situadas em áreas de afloramento do SAG, não apresentando camadas confinantes. Verifica-se que as principais litologias correspondem aos arenitos finos e médios das Formações do período Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu), as quais apresentam condutividade hidráulica variando entre média a alta (valores entre 1,53 – 3,4 m/d), e as maiores taxas recarga do município (465mm/ano).

As áreas referentes à média vulnerabilidade representam 168,4 Km², correspondendo a 35,6%, da área total do município. Os médios índices de vulnerabilidade situam-se, principalmente, em áreas onde o SAG encontra-se confinado pelos sucessivos derrames basálticos do período Cretáceo, provenientes da Formação Serra Geral e em menor proporção os arenitos das Formações Botucatu e Adamantina. Abaixo da zona insaturada verifica-se que as principais litologias correspondem às Formações do período Triássico (Formação Piramboia) e do Jurássico (Formação Botucatu) compreendidas por arenitos finos e médios. Tais características geológicas fazem com que a área apresente uma média/alta condutividade hidráulica (valores entre 1,53 – 3,4 m/d) e média taxa recarga (215 - 465 mm/ano).

Constata-se que as regiões correspondentes à média vulnerabilidade, situam-se em sua maioria, sob superfícies pouco inclinadas com declividade média variando entre 1 e 6% e a espessura da zona insaturada variando entre 35 e 62m. Verifica-se a presença de latossolos vermelho amarelo álico e podzólico vermelho amarelo álico, essas características influenciam e diminuem a vulnerabilidade devido à textura médio/argilosa, fazendo com que essas áreas apresentem-se pouco vulneráveis.

As áreas correspondentes a classe de baixa vulnerabilidade, representa um total de 41,3 Km², ou 9,0%. Tais áreas estão situadas, em sua maioria, sob as superfícies mais íngremes com declividade variando entre 12 e mais de 18% apresentam os maiores índices de espessura da zona insaturada variando entre 62 e 142 m e constata-se a presença de latossolos roxos distróficos e solos litólicos eutróficos e latossolos distróficos vermelho amarelo álico.

A pedologia das regiões situadas em áreas com baixa vulnerabilidade é influenciada diretamente pela litologia da região. Constata-se que as áreas encontram-se situadas onde o SAG é confinado por sucessivos derrames basálticos do Cretáceo, referente à Formação Serra Geral e também de arenitos finos e muito finos da Formação Adamantina. Verifica-se que as características litológicas e pedológicas atuam diretamente na taxa recarga da região, sendo a menor verificada dentre as classes de vulnerabilidade (51 - 254 mm/ano), assim como influenciam na condutividade hidráulica, apresentando aos menores índices, variando entre 0,58 a 1,53 m/d. Constata-se que essas características hidrogeológicas, corroboram para que essas regiões apresentem os mais baixos índices de vulnerabilidade.

5.3 - DRASTIC PESTICIDA

Assim como no método DRASTIC, os dados foram então copilados para o SIG ArcGis 10.1, para ponderação e espacialização das classes de vulnerabilidade mediante o uso da ferramenta *Weighted Overlay*. A aplicação do índice *Pesticida* foi necessária, uma vez que, a área de estudos localiza-se, em sua maioria, sob áreas agrícolas, sendo assim estas, as principais fontes de poluição potencial. Os pesos observados na Tabela 10 ficam com os seguintes valores:

Tabela 10 – Valores da ponderação do DRASTIC *Pesticida*

Parâmetros	Σ	Classes	Média	Pesos	Resultado
D	10	3	3,3	5	16,6
R	38	5	7,6	4	30,4
A	12	2	6	3	18
S	36	6	6	5	30
T	28	5	5,6	3	16,8
I	26	5	5,2	4	20,8
C	19	2	9,5	2	19
					Total = 151,6

De acordo a metodologia *DRASTIC Pesticida*, proposta por Aller et al (1987), a presente área de estudos apresentou índices de vulnerabilidade compreendidos entre o intervalo de 26 – 151,6, subdivididos nas seguintes classes: baixa (< 71), média (71 - 126) e alta vulnerabilidade (126 - 180). Os resultados do mapeamento da vulnerabilidade são amostrados na Figura 25, e os percentuais em Km² de cada classe são expressos na Tabela 11.

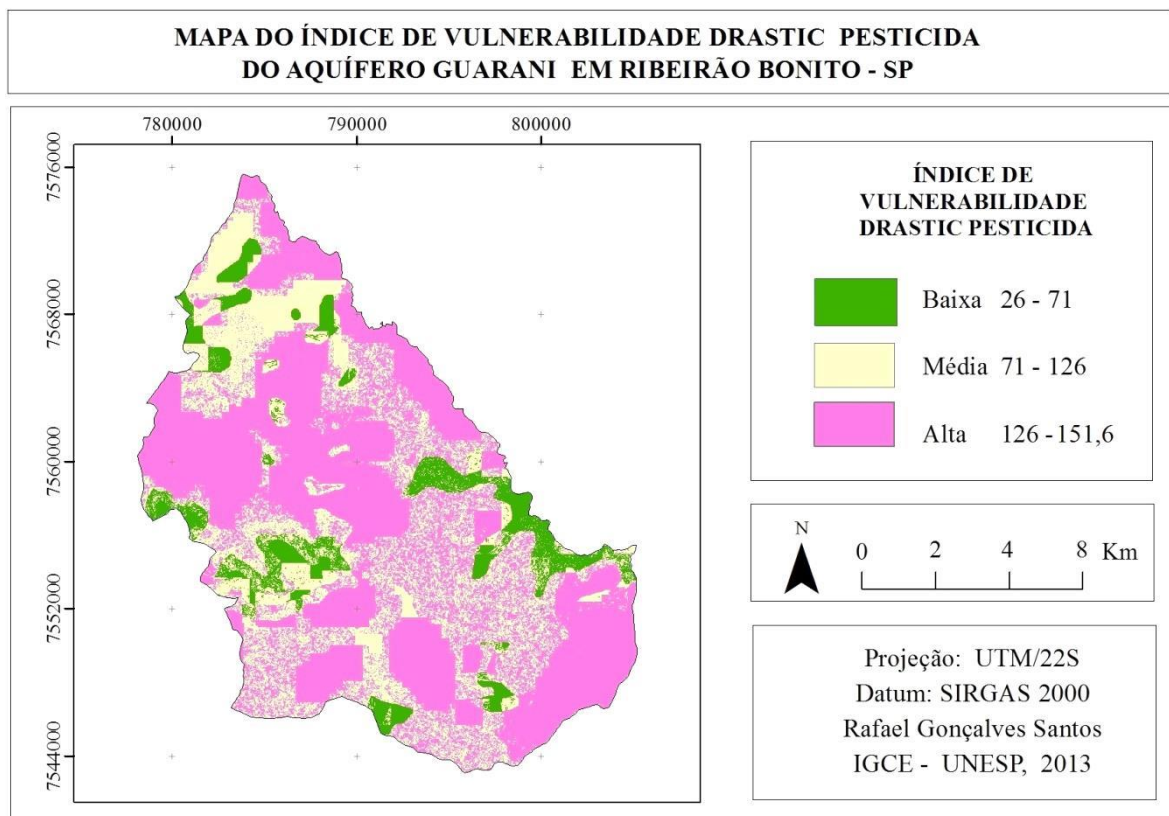


Figura 25 – *DRASTIC Pesticida* aplicado ao mapeamento da vulnerabilidade no Município de Ribeirão Bonito.

Tabela 11 – Índice *DRASTIC Pesticida*

Classes	Área (Km²)	Porcentagem (%)
Alta	284,5	60,3
Média	142,8	30,2
Baixa	44,8	9,5
Total	472,1 Km²	100 %

Os resultados do mapeamento da vulnerabilidade do SAG, no município de Ribeirão Bonito, conforme o método *DRASTIC Pesticida*, apontam que, dentre as classes de

vulnerabilidade mapeadas a classe que apresentou o maior índice refere-se a áreas com alta vulnerabilidade, correspondente ao total de 284,5 Km² ou 60,3 % do município.

A classe correspondente aos altos índices de vulnerabilidade (126 - 180) compreende as áreas situadas totalmente em áreas de afloramento do SAG, localizadas principalmente sobre sedimentos aluvionares, diferenciando essa classe da classe média. Verifica-se também, a presença de alta vulnerabilidade sob as Formações do período Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu), compreendidas por arenitos finos e médios, as quais apresentam média/alta condutividade hidráulica (valores entre 1,53 – 3,4 m/d), e as maiores taxas de recarga (465mm/ano).

Situadas em sua maioria, sob superfícies suaves com baixo percentual de declives (0 – 1), os solos encontrados são caracterizados, principalmente, como areias quartzosas e Latossolos, onde a espessura da zona insaturada variou entre 0 e 23m, fazendo com que essas áreas apresentem-se como as mais vulneráveis.

A classe correspondente aos médios índices de vulnerabilidade (71 - 126) compreende as áreas situadas quase totalmente em áreas de afloramento do SAG. Esse médio índice, justifica-se por essas áreas estarem situadas, em sua maioria, em regiões de afloramento do SAG, sob terrenos planos com baixo percentual de declives (0 – 6%), apresentando espessura da zona insaturada entre 23 e 46m e solos do tipo latossolo vermelho amarelo álico e solos litólicos eutróficos e distróficos, provenientes dos arenitos finos e médios das Formações Formação Pirambóia e Formação Botucatu. Verifica-se que as formações citadas anteriormente apresentam uma média/alta condutividade hidráulica (entre 1,53 – 3,4 m/d), e as maiores taxas recarga (465mm/ano).

A classe de baixa vulnerabilidade (44,8 Km² e 9,5%), representa os menores índices encontrados, consta-se que as áreas correspondentes às estas classes, situam-se principalmente, em regiões que o SAG encontra-se confinado pelos sucessivos derrames basálticos do período Cretáceo provenientes da Formação Serra Geral e recoberto pelos arenitos da Formação Adamantina.

Nessas áreas o SAG apresenta uma média/baixa condutividade hidráulica (valores entre 0,58 -1,53 m/d) devido à litologia e aos solos do tipo latossolos roxos distróficos e solos litólicos eutróficos e latossolos distróficos vermelho amarelo álico, os quais apresentam textura média/argilosa. São verificados os maiores índices de espessura da zona insaturada variando entre 23 e 46m, além da presença das superfícies mais íngremes com declividade variando entre 12 e mais de 18%, características que influenciam diretamente na baixa taxa recarga anual (51 - 254 mm/ano), indicando que essas regiões são as menos vulneráveis do município de Ribeirão Bonito.

Quando comparados os mapas referentes às duas metodologias empregadas, verifica-se que o índice *Pesticida* permite o maior detalhamento das áreas vulneráveis, devido ao menor peso atribuído aos parâmetros, Impacto da Zona não-Saturada e Condutividade Hidráulica, os quais representam suas classes em grandes áreas.

O maior peso atribuído na ponderação os parâmetros Solo e Topografia, permitiu exercer assim maior influência, indicando serem fundamentais para análises em ambientes agrícolas, realçando áreas mais vulneráveis até não detectadas no método DRASTIC original, as quais eram classificadas apenas com média vulnerabilidade, como pode ser averiguado na Figura 26.

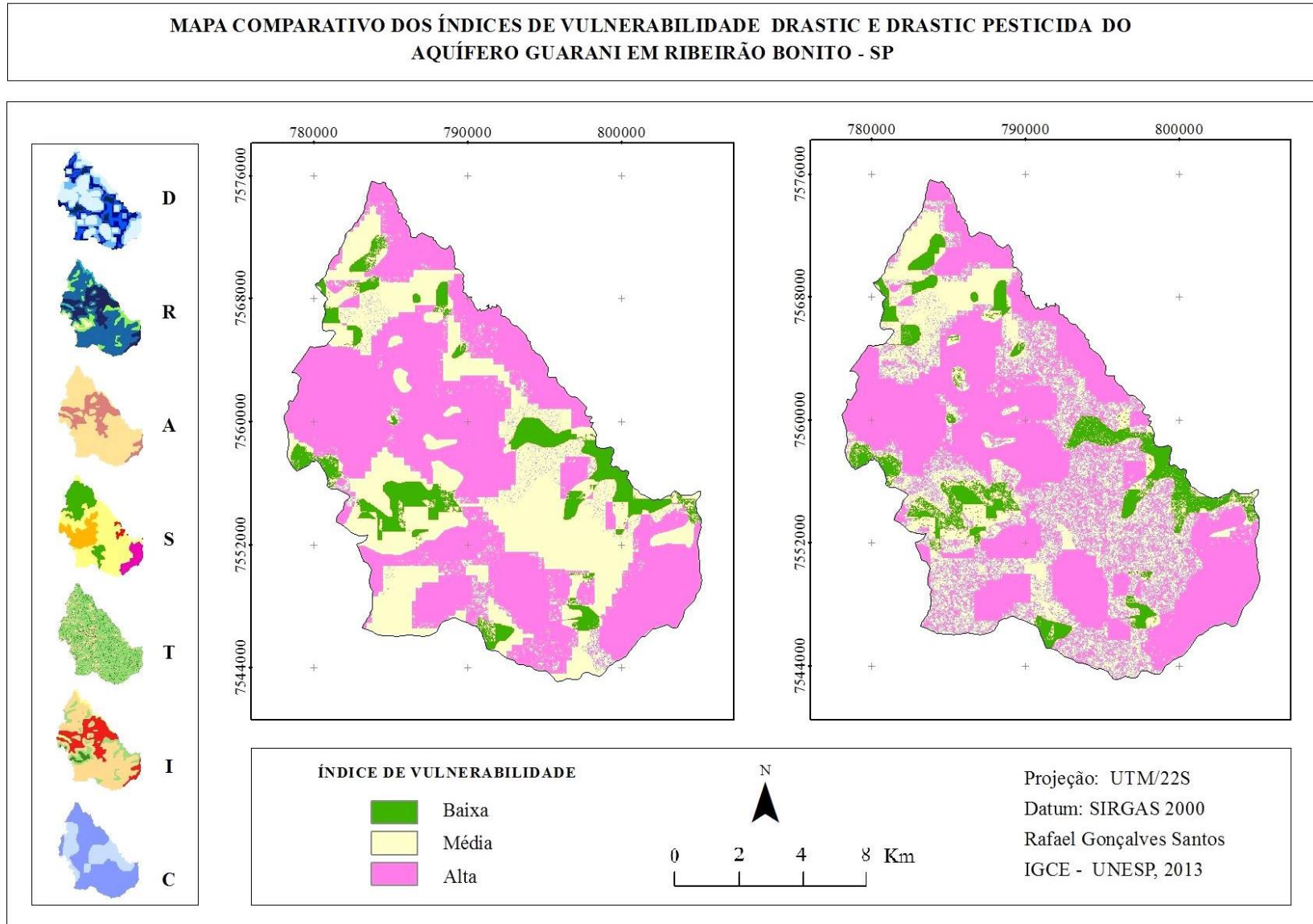


Figura 26 – Comparação entre o mapeamento dos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*.

5.4 - USO E COBERTURA DA TERRA

Os resultados e as discussões foram divididos em etapas, para melhor discorrer sobre os resultados, sendo elas: pré-processamento, processamento e pós-processamento, seguindo a mesma ordem que foi apresentada nos materiais e métodos.

5.4.1 - Pré-processamento

A imagem e o seu processamento por meio de técnicas de sensoriamento remoto, foram bastante úteis no processo de interpretação da paisagem, devido à informação contextual, que leva em consideração o entorno das classes analisadas.

As seis bandas com 30m de resolução foram georreferenciadas por meio de mapas topográficos, adotou-se a projeção UTM e alteração do Datum WGS 84 para Datum SIRGAS 2000. O registro da imagem obteve como resultado uma média de erro total menor que um pixel em relação à resolução espacial das imagens de 30m, como apresenta a Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros de Registro Imagem x Imagem

Números de Pontos De Controle	Erro Total (m)	Método de Reamostragem	Grau de Polinômio
20	0,486	Vizinho mais próximo	1

5.4.2 – Processamento

5.4.2.1 Realce de Imagens

A aplicação da técnica de Análise de Principais Componentes resultou nas matrizes de covariância e correlação. A Tabela 13 apresenta, que das 6 bandas selecionadas a covariância das imagens oscilou entre 790,46 e 1252,21, resultando em uma baixa covariância.

Tabela 13 - Matriz de Covariância.

BANDAS	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
1	1001,36	844,04	790,46	1150,39	1252,21	716,08
2	844,04	724,09	687,51	969,82	1084,37	627,82
3	790,46	687,51	718,68	826,41	1068,86	677,13
4	1150,39	969,82	826,41	1519,68	1426,01	729,94
5	1252,21	1084,37	1068,86	1426,01	1750,28	1040,04
7	716,08	627,82	677,13	729,94	1040,04	684,25

A respeito da matriz de correlação, os dados da Tabela 14, mostraram que as 6 bandas apresentaram alta correlação, uma vez que, os menores valores foram 0,865 e os maiores valores 1,000.

Tabela 14 - Matriz de Correlação.

BANDAS	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
1	1,000	0,991	0,932	0,933	0,946	0,865
2	0,991	1,000	0,953	0,925	0,963	0,892
3	0,932	0,953	1,000	0,791	0,953	0,966
4	0,933	0,925	0,791	1,000	0,874	0,716
5	0,946	0,963	0,953	0,874	1,000	0,950
7	0,865	0,892	0,966	0,716	0,950	1,000

Das seis bandas trabalhadas, foram escolhidas por apresentarem melhores resultados de covariância e correlação as PC1, PC2 e PC3, por apresentarem as informações que mais se repetem nas seis bandas trabalhadas.

A aplicação da técnica de Análise de Principais Componentes foi realizada a partir das bandas originais da imagem multiespectral (Figura 27a) para gerar novas bandas descorrelacionadas (Figura 27b), isto é, sem redundância de informação. Para isso, as primeiras imagens geradas (PC1, PC2 e PC3), foram escolhidas, pois a capacidade de extração de informação a partir destas bandas torna-se reduzida.

A partir da composição colorida foram aplicadas técnicas de contraste (linear e equalização) (Figura 27c) para realçar as imagens permitindo a melhor interpretação das respostas espectrais, facilitando a identificação dos usos e coberturas da terra.

Após serem contrastadas, as imagens passaram pelo processo de filtragem, no qual foi observado que a aplicação do filtro de Realce de Imagem TM, apresentou o resultado mais satisfatório nas principais componentes trabalhadas (PC1, PC2 e PC3) (Figura 27d), realçando as bordas e mantendo as informações de contexto. Observa-se a composição colorida realizada por meio das técnicas de realce apresentadas na Figura 27.

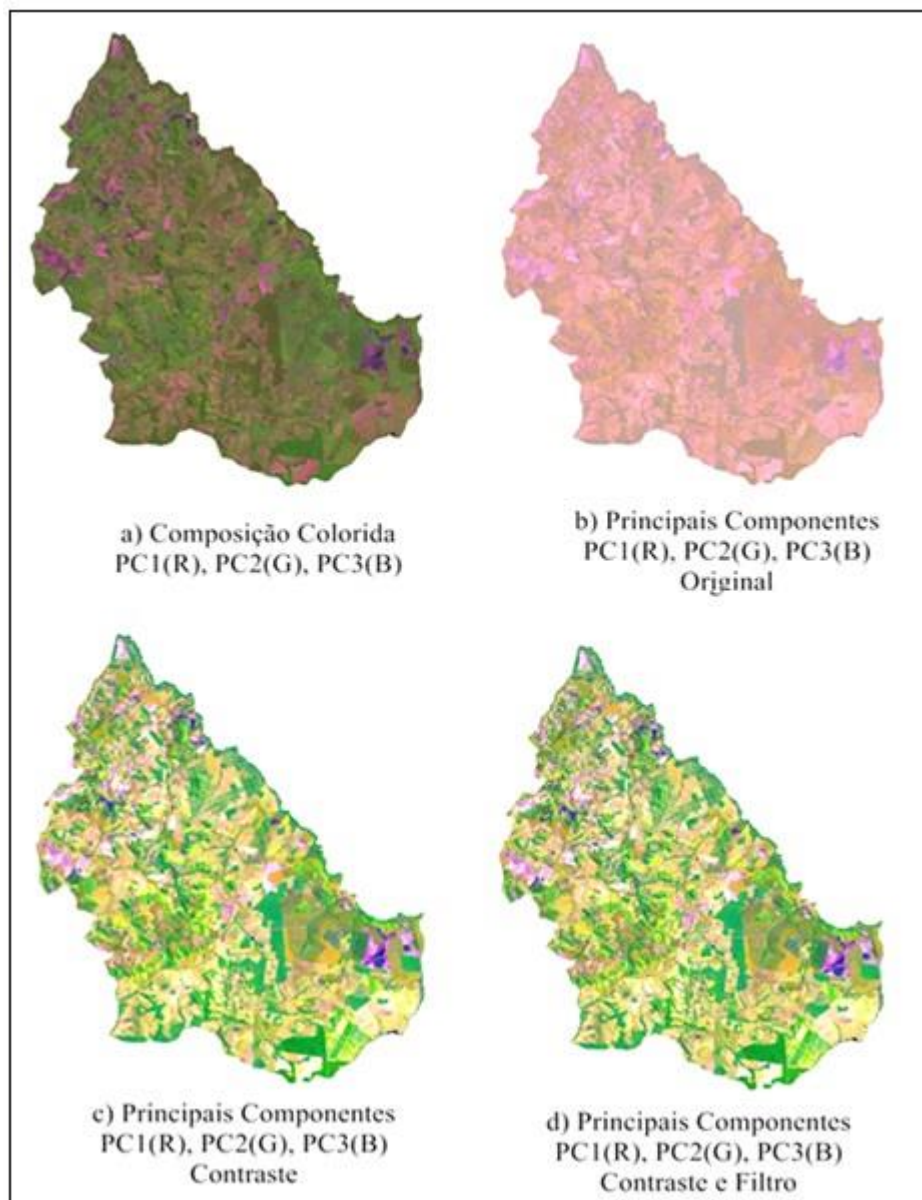


Figura 27 – Resultados do realce e filtragem da imagem.

5.4.2.2 – Segmentação e Classificação

O software eCognition apresenta excelentes ferramentas e técnicas para as etapas de segmentação (segmentação multi-resolução) e classificação (baseada no objeto), as quais foram realizadas com grande eficácia e agilidade. Pela análise visual da segmentação foi possível detectar a separação de diferentes regiões, contendo classes espectralmente próximas entre si. O resultado dos níveis de segmentação com fator escala fixado em 40, 80 e 120 são ilustrados na Figura 28.

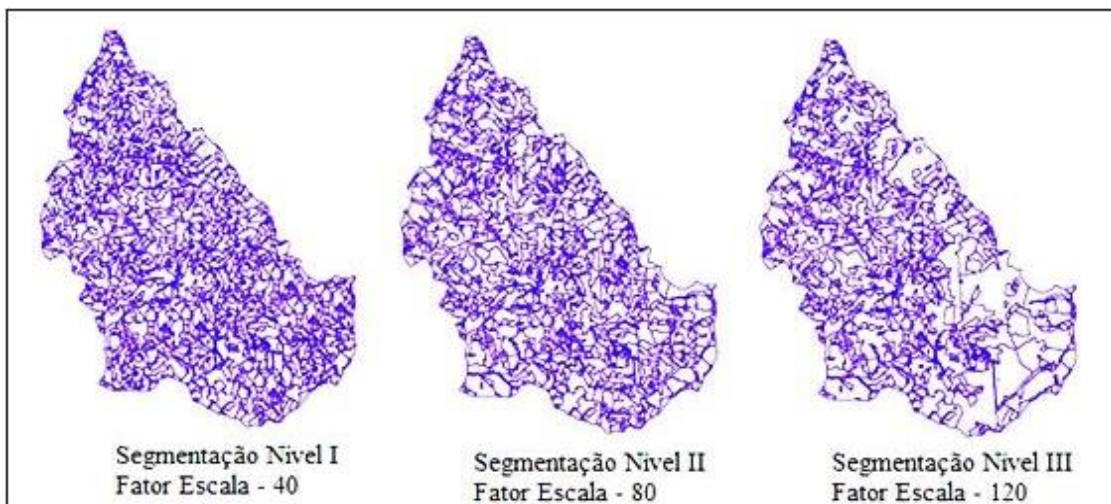


Figura 28 – Resultados da segmentação multi-resolução no eCognition.

Os diferentes parâmetros de escala utilizados na segmentação geraram objetos de tamanhos variados, que muitas vezes se confundiam e segmentavam exageradamente a imagem. Somente utilizando segmentos maiores foi possível captar a heterogeneidade espectral dos diferentes tipos de classes. Após várias tentativas e análise visual dos segmentos resultantes definiu-se a fixação do fator escala 120 como padrão de segmentação que melhor representou na escala do mapa.

Após ser segmentada, a imagem passou pelo processo de classificação baseada no objeto utilizando-se a algoritmo de classificador “vizinho mais próximo”, mostrando-se um eficiente classificador por não considerar apenas a informação espectral, mas também a informação espacial e contextual dos objetos, reduzindo os erros de classificação e aumentando a veracidade do mapeamento. Os resultados obtidos na segmentação e classificação são ilustrados a seguir na Figura 29.

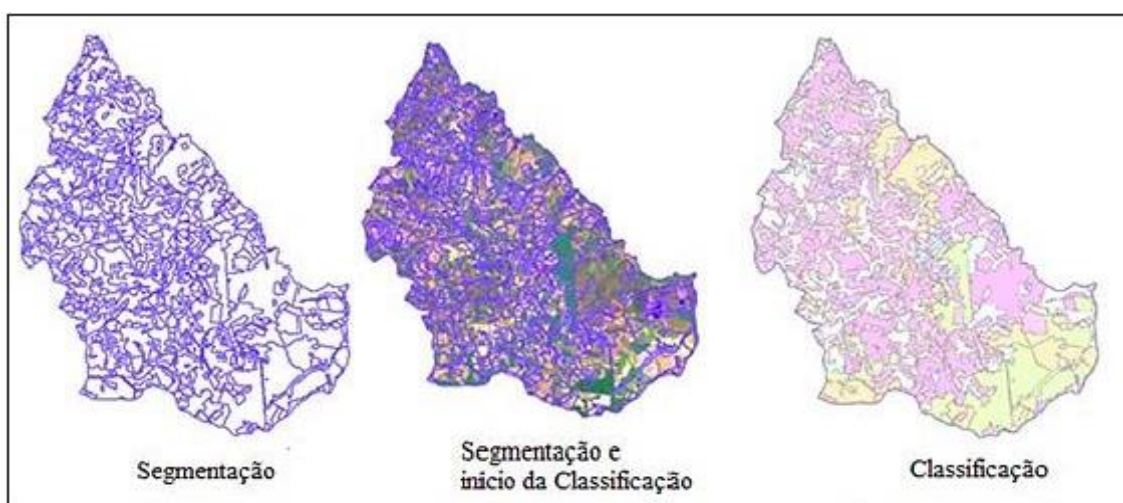


Figura 29 – Resultados da segmentação e classificação no eCognition.

5.4.3 - Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento, foram atribuídas classes temáticas aos objetos presentes na cena, segundo o uso e cobertura da terra, semelhante o que se faz no procedimento de interpretação. A validação dos testes de classificação supervisionada baseou-se na escala de concordância Kappa, obtendo um índice de 0,75, classificação considerada satisfatória, afirmando que a classificação apresenta-se fiel a realidade.

5.4.3.1 – Reconhecimento de Padrões e Extração de Atributos

A análise da imagem TM Landsat-5, apesar da sua baixa resolução (30m), permitiu identificar diversas classes de uso da terra na área de estudo. Após a aplicação dos realces e filtros, ressaltando a visualização das feições, facilitando a interpretação da imagem e o reconhecimento dos padrões. Por meio das análises das diferentes composições multiespectrais coloridas, PC1, PC2 e PC3, se estabeleceram as seguintes categorias do uso e cobertura da terra:

- Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias - Referem-se aos cultivos de cana-de-açúcar e cítricos típicos da região, os quais foram segmentados para melhor compreensão do uso e cobertura da terra;
- Áreas de Reflorestamento – Correspondem às áreas reflorestadas com *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*, destinados ao uso antrópico ou não;
- Áreas de Vegetação Natural – Englobam as matas ciliares e remanescentes florestais;
- Áreas de Vegetação Rasteira – Envolvem as áreas com grande presença de gramíneas;
- Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado – Abrangem as áreas com ausência da cobertura vegetal e áreas com a recente retirada do cultivo;
- Água - Envolve todos os corpos d'água e áreas represadas;
- Áreas Urbanizadas– Corresponde à cidade de Ribeirão Bonito e ao distrito de Guarapiranga.

5.4.3.2 – Mapa temático

Após o emprego de técnicas de sensoriamento remoto e integração de dados em SIG, obteve-se para o município de Ribeirão Bonito o mapeamento correspondente aos principais

usos e cobertura da terra, totalizando 472,1 km² de área mapeada. O resultado final do PDI, foi uma imagem temática gerada no ArcGis 10.1, como apresenta a Figura 30.

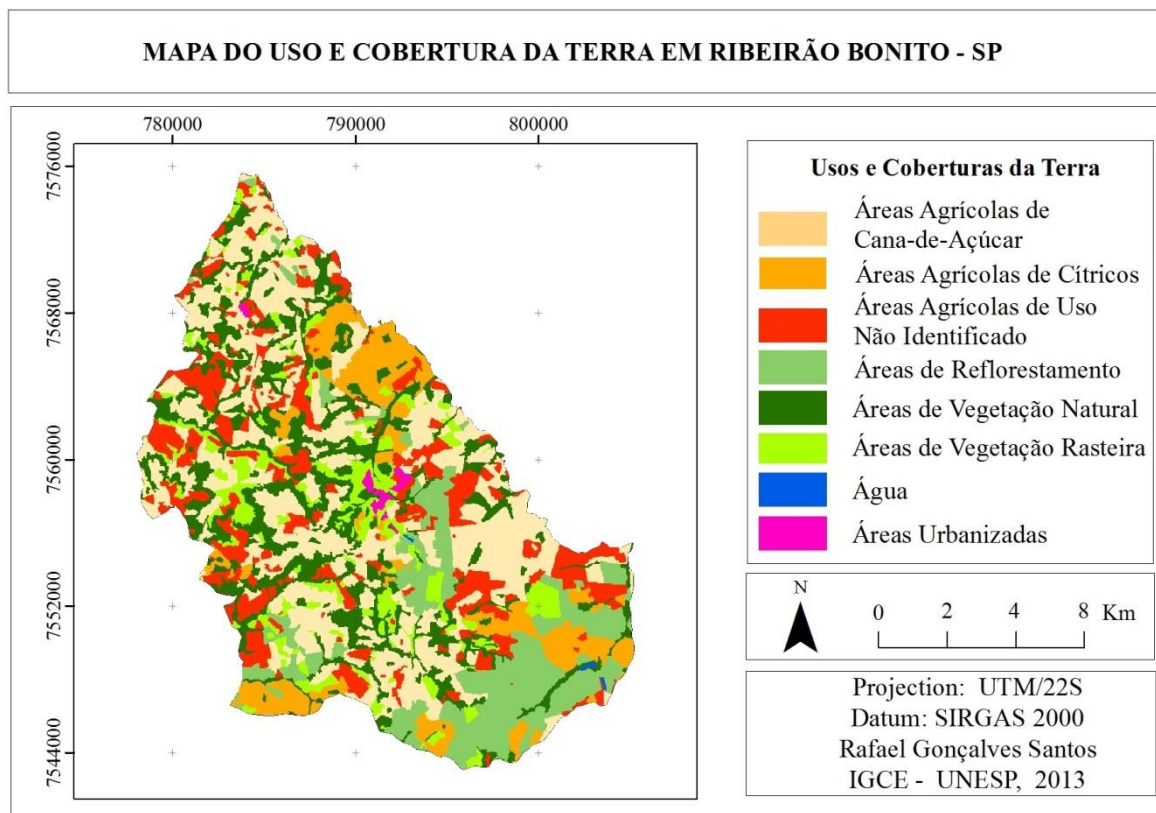


Figura 30 - Mapa de uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito – SP.

Os pixels classificados foram representados por cores conforme a classificação adotada pela IBGE (2006), cada cor associada a uma classe: Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias (Cana-de-Açúcar e Cítricos), Áreas de Reflorestamento, Áreas de Vegetação Natural, Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, Áreas de Vegetação Rasteira, Áreas Urbanizadas e Água, definidas de acordo com os objetivos iniciais. A Tabela 15 apresenta os dados referentes ao total da área e a porcentagem de cada classe de uso da terra.

Tabela 15 – Classes de uso e cobertura da terra.

Classes	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias	210,0	40,67
Áreas de Vegetação Natural	90,7	19,12
Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado	73,7	16,40
Áreas de Reflorestamento	65,3	13,62
Áreas de Vegetação Rasteira	45,6	9,59
Áreas Urbanizadas	2,5	0,52
Água	0,4	0,08
Total	472,1 Km²	100 %

Os resultados apontam que o principal tipo de uso e cobertura da terra encontrado no município de Ribeirão Bonito (Figura 31), refere-se às Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, correspondem a quase metade da área de estudo, um total de 210 km² e 40,67%. Destaca-se o cultivo da cana-de-açúcar, presente em 157,65 km² da área do município, representando 33,39% do uso e cobertura da terra e o cultivo de cítricos, também muito comum na região, presente em 52,35 km² da área do município, representando 11,08% dos usos e coberturas de Ribeirão Bonito.



Figura 31 - Classes de uso e cobertura da terra no município de Ribeirão Bonito – SP: a) Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, cultivos de cana-de-açúcar, b) Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, cultivos de cítricos, c) Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, d) Áreas Reflorestamento, e) Áreas de Vegetação Natural.

Verifica-se que as Áreas de Vegetação Natural apresentam-se em 90,7 km², correspondendo a um total de 19,12% da área total do município, enquanto que, as Áreas de Vegetação Rasteira, relacionadas à presença de gramíneas, representam 45,6 Km², o equivalente a 9,59% da área do município.

As Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, representam 73,7 km², totalizando 16,41% da área do município, porém esta classe engloba, em sua maior parte, trechos em que os cultivos que foram recentemente colhidos, restando apenas um solo exposto, sem cobertura vegetal, o qual está sendo preparado para um novo ciclo de plantio.

Somando-se os percentuais das localidades destinadas para Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias (40,58%) e as localidades de Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado em preparação para um novo cultivo ou pós-plantio (16,40%), obtém-se uma área total de 283,7 km², representando 57,09% da área total trabalhada, confirmando o predomínio de atividades agrícolas na região.

As Áreas de Reflorestamento estão presentes em 65,3 km² do município, correspondendo a 13,62% dos usos e coberturas da terra. A segunda menor classe corresponde às Áreas Urbanizadas, representando um total de 2,5 km² ou 0,52% da área total, na qual está inserido o centro urbano de Ribeirão Bonito – SP e o distrito de Guarapiranga.

De acordo com o mapa, a cidade de Ribeirão Bonito, encontra-se circundada por áreas de vegetação natural e culturas temporárias, porém, de acordo com as análises feitas a partir da imagem Landsat-5, nota-se que o tipo de vegetação predominante no entorno da cidade são áreas de vegetação rasteira, indicando a ausência de vegetação natural onde se tem uma maior influencia antrópica. A menor classe apresentada refere-se à presença de água (reservatórios), correspondendo a um total de 0,4 km² ou 0,08% do município.

5.5 – ÍNDICE DRASTIC *Pesticida* NOS USOS E COBERTURAS DA TERRA

O índice de vulnerabilidade DRASTIC *Pesticida* foi segmentado conforme as áreas do mapeamento dos usos e cobertura da terra em Ribeirão Bonito, com vistas a identificar a vulnerabilidade vigente em cada tipo de uso e cobertura. Os resultados obtidos são ilustrados na Figura 32, por meio de uma coletânea de mapas.

MAPA DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC PESTICIDA NOS USOS E COBERTURAS DA TERRA DO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO BONITO - SP

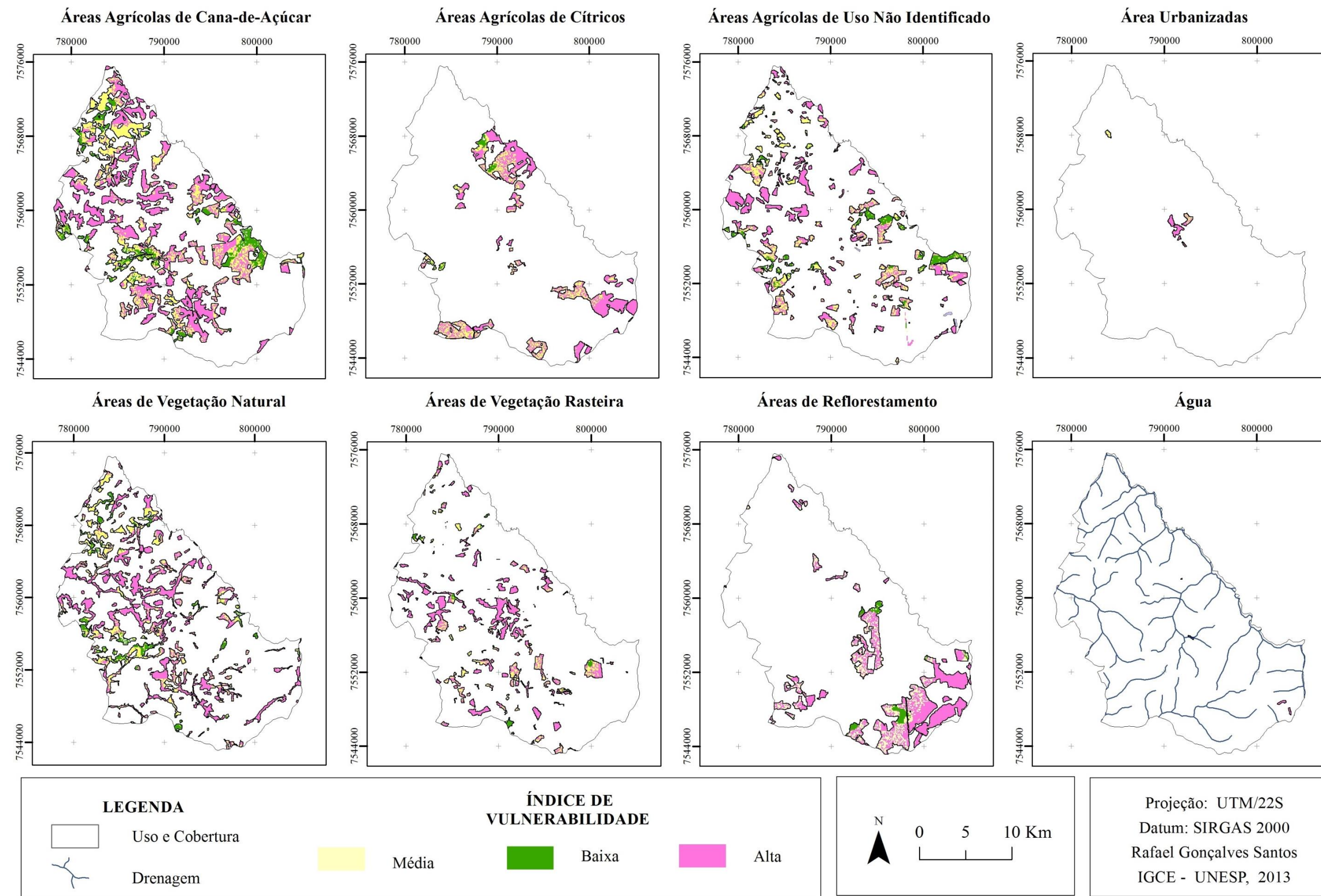


Figura 32 – Índice de Vulnerabilidade DASTIC Pesticida nos usos e coberturas da terra do município de Ribeirão Bonito – SP.

As Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias (cana-de-açúcar e cítricos), quando somadas correspondem a 40,68% da área do município. Às áreas de cultivo de cana-de-açúcar representam a principal atividade agrícola de Ribeirão Bonito, totalizando 75% das culturas temporárias e 157,65 km² da área municipal. Os outros 25% das Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, correspondem ao plantio de cítricos, perfazendo 52,35 km² do município.

Segundo Marion (2011), as áreas agrícolas são um exemplo típico de fonte de contaminação difusa, devido às práticas inadequadas de manejo do solo, que podem causar séria poluição nas águas subterrâneas, com taxas elevadas de nitratos no uso de cultivos. Os defensivos agrícolas, quando aplicados demasiadamente, são contaminantes nocivos na alteração da qualidade da água subterrânea. O nitrato é uma substância química derivada do nitrogênio que, em baixas concentrações, se encontra de forma natural na água e no solo (FOSTER; HIRATA, 1988).

Verificou-se que 55,76% dos cultivos de cana-de-açúcar no município de Ribeirão Bonito, situam-se em áreas de alta vulnerabilidade, sendo 32,79% localizadas em áreas de média vulnerabilidade e 11,45% dos cultivos de cana-de-açúcar encontram-se inseridos em localidades de baixa vulnerabilidade.

Com relação às Áreas Agrícolas de Cítricos, constatou-se aumento das áreas altamente vulneráveis (66,89%), e redução das áreas de média (29,27%), e baixa vulnerabilidade (3,84%), em comparação às Áreas Agrícolas de cana-de-açúcar. Os resultados apontam que, os usos e coberturas mais propensos à potencial poluição, apresentam-se também, com os maiores índices vulnerabilidade. Segundo Foster et al (2002), as atividades agrícolas referentes ao cultivo de cana-de-açúcar e cítricos, culminam na ocorrência de elevadas concentrações de nitrogênio-nitrato; amônio e pesticidas.

As Áreas de Vegetação Natural representam a segunda maior classe de uso cobertura da terra, perfazendo 19,12% dos usos e coberturas da terra e 90,7 km² do município de Ribeirão Bonito, abrangendo os remanescentes florestais e matas ciliares. Encontram-se densamente localizadas em áreas de alta (59,31%) e média (29,62%) vulnerabilidade, apresentando poucas áreas de baixa vulnerabilidade (11,07%). Os percentuais indicam resultados positivos na redução da potencial poluição e diminuição da vulnerabilidade do aquífero, resultando em áreas altamente vulneráveis cobertas por áreas de vegetação natural e áreas pouco vegetadas situadas em terrenos com baixa vulnerabilidade.

A presença de vegetação natural favorece o aumento na recarga do aquífero e atua na redução da potencial poluição, uma vez que, contribui no processo de infiltração da água,

regularizando o ciclo hidrológico necessário a manutenção das águas subterrâneas, possui a capacidade de retenção de poluentes, favorece a infiltração e garante a recarga dos mananciais e aquíferos (GUEDES; SEEHUSEN, 2011).

A classe de uso e cobertura da terra referente às Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, correspondem a 16,41% da área do município, destinam-se às áreas ausentes de cobertura vegetal, em fase de preparação para novo plantio ou solo exposto. Ainda da observação da Figura 32, constatou-se que 54,68% das Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, situam-se sobre terrenos com alto índice de vulnerabilidade, 32,15% correspondem às áreas de média vulnerabilidade e apenas 13,16% localizam-se em áreas pouco vulneráveis, resultando no aumento do potencial de poluição e elevando o índice de vulnerabilidade do SAG nessas áreas, por favorecer a incidência de processos erosivos, levando o aquífero à exposição direta aos contaminantes.

Com relação ao mapeamento das Áreas de Vegetação Rasteira, envolvendo as áreas com grande presença de gramíneas, correspondentes a 45,6km² do município, 9,59 % dos usos e coberturas da terra em Ribeirão Bonito, ainda que, menos intensiva que a vegetação natural, ressalta-se o potencial dessas áreas na infiltração e na retenção de poluentes superficiais.

Observa-se que 72,64% da vegetação rasteira, está localizada em áreas altamente vulneráveis, sendo 22,77% em áreas de média vulnerabilidade e apenas 4,59% em áreas de baixa vulnerabilidade. Os percentuais mencionados indicam resultados positivos na redução da potencial poluição, resultando nas áreas altamente vulneráveis, cobertas por vegetações rasteiras e áreas pouco vegetadas, situadas em terrenos com baixa vulnerabilidade.

As Áreas Urbanizadas, referentes à cidade de Ribeirão Bonito e ao distrito de Guarapiranga, totalizam 2,5 km² ou 0,52% dos usos e coberturas da terra, encontram-se, em sua maioria (76%), situadas em área de alta vulnerabilidade, seguida por áreas de média vulnerabilidade (22,80%) e apenas 1,20%, localizam-se em áreas pouco vulneráveis.

A mancha urbana de Ribeirão Bonito, localiza-se em áreas de alta vulnerabilidade, envolvendo a região central e as localidades vizinhas, apenas pequenas áreas periféricas, apresentam média vulnerabilidade. O distrito de Guarapiranga encontra-se totalmente inserido em área de média vulnerabilidade. O município de Ribeirão Bonito possui atualmente 12.135 habitantes segundo o IBGE (2013), sendo o setor de serviços e a agropecuária as principais atividades econômicas no município. Em pequenas áreas urbanizadas, a poluição dos aquíferos decorre principalmente da coleta e disponibilização inadequada de resíduos líquidos e sólidos.

Ressalta-se a disponibilização dos resíduos sólidos, como grandes produtores de potenciais poluentes no atual aterro sanitário do município, o qual, encontra-se com a capacidade de recebimento de lixo comprometida, buscando o alteamento junto a CETESB como saída para o lixo da cidade.

Outro possível fator a contribuir negativamente com a vulnerabilidade de aquíferos em áreas urbanas, refere-se ao solo urbano frequentemente removido durante as construções ou, em perfurações (como poços, valas ou lagos), podendo carregar cargas poluentes à zona saturada, tais como, os microorganismos patógenos, nitrato ou amônio, cloreto, sulfato, boro, arsênico, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogêneos, certos pesticidas. (FOSTER et al, 2002; ROSSI et al, 2007 e MARION, 2011).

As Áreas de Reflorestamento, compreendem 13,63% dos usos e coberturas no município de Ribeirão Bonito, totalizando 65,3 km². Refere-se ao plantio de espécies *Eucalyptus sp* e *Pinus sp*, típicos de áreas de reflorestamento na UGRHI-TJ. Encontram-se densamente localizadas em áreas de alta (65,46%) e média (28,79%) vulnerabilidade, apresentando poucas áreas de baixa (5,75%) vulnerabilidade.

Com relação ao nível do potencial de poluição, as áreas de reflorestamento assim como, as vegetações naturais e rasteiras, contribuem no processo de infiltração da água garantindo a recarga dos mananciais e aquíferos, porém, ao favorecer o aumento na recarga do aquífero, a presença de potenciais poluentes torna-se um fator considerado negativo, contribuindo no aumento da vulnerabilidade. Ressalta-se que ao contrário das classes de vegetações, a infiltração em áreas reflorestadas, pode ser poluída por fertilizantes e/ou pesticidas, com grandes concentrações de nitrato utilizado no plantio das espécies, agravando a vulnerabilidade local.

A menor classe de uso e cobertura da terra mapeada, referente aos pequenos reservatórios de água, representam 0,08% das áreas mapeadas, perfazendo o total de 0,4km². Observa-se que 61,58% dos reservatórios de água, localizam-se em áreas altamente vulneráveis, sendo 27,33% em áreas de média vulnerabilidade e 11,09% em áreas de baixa vulnerabilidade.

Este estudo também analisou a rede de drenagem do município de Ribeirão Bonito, com vistas à identificação espacial dos usos e coberturas da terra e o índice de vulnerabilidade do SAG na rede de drenagem, como pode ser verificado na Figura 33.

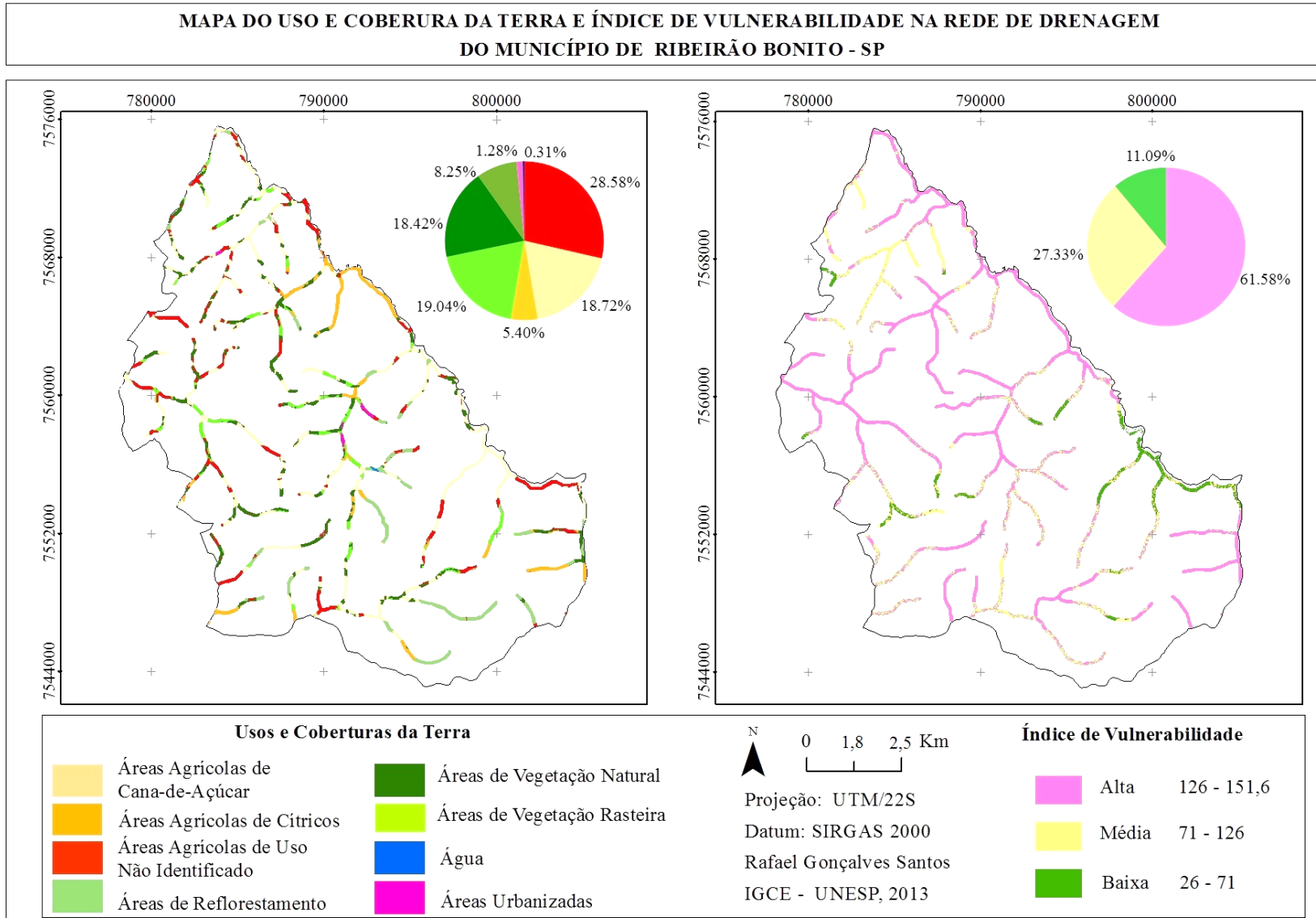


Figura 33 - Mapa de uso e cobertura da terra e índice DRASTIC na rede de drenagem do município de Ribeirão Bonito – SP.

Conforme a análise de Foster e Hirata (1993), a rede de drenagem é frequentemente usada para a disposição final das águas residuais e resíduos sólidos de diversas origens. No município de Ribeirão Bonito, a rede de drenagem, assim como todos os usos e coberturas da terra do município, apresentou-se densamente localizada em áreas de alta vulnerabilidade (61,58%), sendo 27,33% inserida em áreas de média vulnerabilidade e apenas 11,09% localiza-se em terrenos de baixa vulnerabilidade.

As margens dos cursos d'água de toda a rede de drenagem do município, foram mapeadas com base nas disposições da Resolução CONAMA n° 303/2002, com uma faixa de 30 metros, pois os cursos d'água possuem menos de 10 metros de largura. Constatou-se o predomínio de Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, caracterizadas como áreas ausentes de cobertura vegetal, em fase de preparação para novo plantio ou solo exposto, correspondendo a 28,58% do uso e cobertura ao longo das margens dos cursos d'água.

As Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, representam uma fonte de potenciais poluentes por expor o solo ao intemperismo, uma vez que, a ação da pluviosidade em áreas ausentes de cobertura vegetal, possui a capacidade de desagregar grandes quantidades de solo, carregando o material particulado até os cursos d'água, aumentando o assoreamento e possível contaminação das águas superficiais.

As Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, responsáveis por lançar elevadas taxas de nitrato, amônio e pesticidas no solo e na água, representam juntas 24,12% dos usos e coberturas da rede de drenagem, sendo 18,72% de cultivos de cana-de-açúcar e 5,40% de cultivos de cítricos. Somam-se aos usos e coberturas potencialmente poluentes por nitratos, as Áreas de Reflorestamento (8,25%), que também podem levar concentrações de nitrato encontrados nos fertilizantes e/ou pesticidas utilizados no plantio aos cursos d'água.

Verificou-se que apenas 18,42% da rede de drenagem do município, localiza-se com Áreas de Vegetação Natural (remanescentes florestais e matas ciliares) nas margens dos cursos d'água, e 19,04% da drenagem encontra-se em Áreas de Vegetação Rasteira, caracterizada pela presença maciça de gramíneas.

Os menores percentuais de usos e coberturas da terra na rede de drenagem, são representados pelas Áreas Urbanizadas (1,28%) e os reservatórios de água ligados à drenagem (0,31%). Os lançamentos de resíduos líquidos, somados às áreas ocupação urbana irregular e a deposição de resíduos sólidos nas margens dos cursos d'água, são as principais atividades potencialmente poluidoras dos cursos d'água, encontradas em áreas urbanizadas. Atualmente, o município de Ribeirão Bonito já possui a sua Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em fase de construção, reduzindo a contaminação do Córrego Ribeirão Bonito, o qual deveria encontrar-se totalmente protegido em APP.

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho estimou a vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito – SP, por meio da metodologia DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, concomitante à análise dos usos e coberturas da terra do município. Ambas as análises foram delineadas com base na utilização de geotecnologias e produtos de sensoriamento remoto, objetivando fornecer um instrumento de ordenamento territorial e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos ao município, colaborando para proteção do SAG em áreas aflorantes.

A fundamentação teórica foi de suma importância no desenvolvimento da pesquisa, apresentando tópicos importantes relacionados às áreas de recarga do SAG, geoprocessamento, sensoriamento remoto aplicado ao mapeamento o uso e cobertura da terra e, sobretudo definições sobre a vulnerabilidade de aquíferos frente à potencial poluição, principal escopo deste estudo.

Os resultados evidenciaram a eficiência das geotecnologias utilizadas nas etapas de Geoprocessamento e o Sensoriamento Remoto de imagens, aplicadas ao mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos e dos usos e coberturas da terra. Os SIG's adotados nesta pesquisa (ArcGis, eCognition e SPRING) permitiram o pleno desenvolvimento de todas as etapas de álgebra de mapas e de processamento digital de imagens.

O produto final gerado pela análise dos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, resultou no mapa de vulnerabilidade natural do SAG, na presente área de estudo. A análise e aplicação dos índices, delineada com base na utilização de geotecnologias apresentaram resultados semelhantes em termos de configuração dos limites entre as classes de vulnerabilidade. Constatou-se que o SAG no município de Ribeirão Bonito, apresentou índices de baixa, média e alta vulnerabilidade, com predomínio de áreas altamente vulneráveis, porém, não havendo casos vulnerabilidade extrema.

Com base no mapeamento da vulnerabilidade, verificou-se que a presença de áreas altamente vulneráveis concentradas principalmente em áreas de afloramento do SAG. Essas áreas caracterizam-se pela presença de litologias correspondente aos arenitos finos e médios das formações Pirambóia e Botucatu, as quais apresentam pequena espessura da zona não saturada, solos arenosos, áreas de baixo declive, alta condutividade hidráulica e as maiores taxas recarga do município.

Partindo dos resultados obtidos na presente pesquisa, conclui-se que, as áreas altamente vulneráveis do município de Ribeirão Bonito, devem ser continuamente

monitoradas, buscando melhorias no planejamento dos usos e coberturas da terra presentes, devido ao potencial de poluição que trazem à qualidade das águas subterrâneas. Ressalta-se que, quando comparados aos estudos de vulnerabilidade do SAG, elaborados por IPT (2012), através do método GOD, e Queluz e Sturaro (2011), mediante o índice AVI, realizados na UGRHI – TJ, em ambas análises, o município de Ribeirão Bonito, também localiza-se densamente sobre terrenos altamente vulneráveis.

Com base na geração do mapa temático de uso e cobertura da terra, foram identificadas sete tipologias distintas de classes temáticas: Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias (Cana-de-Açúcar e Cítricos), Áreas de Reflorestamento, Áreas de Vegetação Natural, Áreas Agrícolas de Uso Não Identificado, Áreas de Vegetação Rasteira, Áreas Urbanizadas e Água. As Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias predominam sobre os demais usos e coberturas da terra, confirmando a aptidão agrícola do município de Ribeirão Bonito – SP. O mapeamento do uso e cobertura da terra, foi essencial para determinação de qual índice de vulnerabilidade deveria ser empregado na análise da vulnerabilidade do município, uma vez que regiões com predominância agrícola, como o município de Ribeirão Bonito é utilizado o *DRASTIC Pesticida*.

Ao analisar o índice de vulnerabilidade *DRASTIC Pesticida*, vigente em cada tipo de uso e cobertura da terra do município de Ribeirão Bonito, os resultados obtidos na presente pesquisa, indicam a necessidade de melhor planejamento das Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, Áreas Agrícolas de Uso não Identificado e Áreas de Reflorestamento, em localidades de alta vulnerabilidade, uma vez que, esses tipos de usos e coberturas, também podem poluir o solo e a água com nitrato, amônio e pesticidas.

O município deve atentar-se à urgência na contenção do aumento das Áreas Agrícolas de Culturas Temporárias, devido ao grande potencial de poluição por nitrato, considerado o mais comum dos poluentes encontrados no solo, responsável por grande parte dos casos de contaminação humana, podendo ser escoado até as águas superficiais ou por meio da infiltração e atingir o SAG, em ambos os casos são provenientes da aplicação intensiva de fertilizantes e insumos agrícolas nitrogenados.

Este estudo também analisou o índice de vulnerabilidade *DRASTIC Pesticida* e o uso e cobertura da terra na rede de drenagem do município. É preciso pensar que, os estudos relacionados às águas subterrâneas, assim como das águas superficiais, não devem ser tratados como se estes fossem independentes entre si. Poucas são as análises que levam em consideração as áreas de recarga do SAG, em sua totalidade, abrangendo a zonas saturadas e

não saturadas e os usos e coberturas que ali se inserem, concomitante à análise das águas superficiais.

As atividades agrícolas e urbanas, comumente escoam seus potenciais poluentes até a rede de drenagem, tornando um manancial de superfície poluído, podendo causar a poluição de um aquífero subterrâneo. Conforme a análise de Mota (1997), as águas superficiais e subterrâneas, muitas vezes encontram-se interligadas. Em algumas situações, os mananciais de superfície proporcionam a recarga dos reservatórios subterrâneos, enquanto, em outras, as águas do subsolo descarregam em recursos hídricos superficiais.

A análise dos usos e cobertura da terra na rede de drenagem do município revelou que, as Áreas de Vegetação Natural de Vegetação Rasteira, quando somadas, não perfazem nem a terça parte dos usos e coberturas da terra presentes em todo o município. O mesmo quadro é verificado ao longo de toda a rede de drenagem do município, densamente localizada em áreas altamente vulneráveis, sendo que, as margens de cursos d'água deveriam estar preservadas como Áreas de Preservação Permanente (APP), conforme a disposições do artigo 3º da Resolução CONAMA n° 303/2002.

Finalizam-se as considerações finais, ressaltando a utilização do Geoprocessamento aplicado ao mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG, com vistas ao planejamento e ordenamento do território em Ribeirão Bonito. A análise e integração de dados em SIG, apresentou diversas vantagens, que incluem, desde benefício da integração de técnicas de processamento digital na elaboração de uma informação única, ao uso de sensores remotos e a classificação temática baseada no objeto, de modo a melhor conhecer as áreas propícias à implantação de atividades socioeconômicas.

O mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG, por meio dos métodos DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, possibilitou subsidiar a otimização e a implantação dos futuros usos e coberturas da terra no município, objetivando minimizar a potencial poluição, gerando impacto ambiental de menor proporção nas áreas com alta vulnerabilidade, resguardando áreas, que deveriam estar em zonas de proteção ambiental, como as APP e beneficiando a produção de culturas temporárias como principal atividade econômica do município em áreas seguras.

Os índices de vulnerabilidade servem como ferramenta na gestão do uso e cobertura da terra, ajudando na definição de áreas aptas para instalação de atividades com maior potencial de poluição, diminuindo os riscos de poluição do aquífero. Ressalta-se, conforme a análise de Oliveira (1994), a necessidade que as medidas de proteção das águas sejam

consolidadas em legislação própria municipal e que, a necessidade da preservação dos aquíferos e sua condição de bem estratégico, seja transmitida à população através de campanhas educativas.

Propõe-se com base na realização deste estudo, o município de Ribeirão Bonito atente-se aos usos e coberturas da terra instalados nas áreas mais vulneráveis e utilize esse estudo como instrumento de ordenamento territorial e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos com vistas à proteção do SAG e contribuindo para a preservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTI, E. A.; SILVA, J.L. S DA. **Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos no Perímetro Urbano de Tupan-ciretã/RS**. In: 1º SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL. 2005. Santa Maria. RS, Anais. 2005.

ALBUQUERQUE FILHO, J.L. SAAD, A.R., ALVARENGA, M.C. **Considerações acerca dos impactos ambientais decorrentes da implantação de reservatórios hidrelétricos com ênfase nos efeitos ocorrentes em aquíferos livres e suas consequências**. São Paulo, UNESP, Revista Geociências, v. 29, n. 3, p. 355-367, 2010.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. U.S. EPA, 1987. Report 600/2-85/018.

ANDERSON, J. R. et al. **Sistema de classificação do uso da terra e do revestimento do solo para utilização com dados de sensores remotos**. Tradução de Harold Strang. Rio de Janeiro: IBGE, SUPREN, 1979. (Série Paulo de Assis Ribeiro, n. 9).

ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C. **Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital**. In: III Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento. Curitiba, 1997.

ARAÚJO, L.M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P.E. **Aquífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó**. Curitiba, Geociências, UFPR, 10p, 1995.

ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1991.

BANCO MUNDIAL. **La ordenación de los recursos hídricos**. 1994.

BARBOSA, C.C.F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 1997.

BATALHA, B. L. **Glossário de engenharia ambiental**. Brasília: DNPM, 1986.

BERRY, J.K. **Cartographic modeling: the analytical capabilities of GIS**. In: Goodchild, M.; Parks, B.O.; Steyaert. L.T. **Environmental modeling with GIS**. Oxford: Oxford University Press: 1993. p.58-74.

BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R; ROSA, E.F.F. **Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 398p.

BONHAM-CARTER, G. F.: **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1996.

BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUCA, S. J.; NOGUEIRA, V. P. Q.; PORTO, M. F. A. **Hidrologia ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1991. V.3.

CÂMARA, G. **Representação computacional de dados geográficos**. In: CASANOVA, M. A. et al. Banco de dados geográficos. Curitiba: Mundogeo, 2005, p. 11-52.

CÂMARA, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. (Org.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>>. Acesso em: maio 2013.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Princípios Básicos em Geoprocessamento**. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura. Brasília: Embrapa, 1998.

CÂMARA, G.; SOUZA, R.C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. **SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modeling**. Computers and Graphics, v.20, 1996. p.395-403.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no Sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY**. Dissertação de Mestrado em Geografia e Geociências UFSM, CCNE, Departamento Geociências. 108p, 2006.

CAMPOS, H. C. N. S. **Mapa hidrogeológico do Aquífero Guarani, escala 1:2.500.000**. Editado pela ISOMAPA – Consultoria e Projetos Ltda. São Paulo, Brasil. 1996.

CASANOVA, M.A.; CÂMARA, G.; HEMERLY, A.S.; MAGALHÃES, G.C.; MEDEIROS, C.M.B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. 1996. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/geopro/livros/anatomia.pdf> >. Acesso em: maio 2013.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo – 1997**. São Paulo: CETESB, 1997. 106p.

COELHO NETTO, A. L. **Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Ed.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93-148.

COHEN, J. **A Coefficient of Agreement for Nominal Scales**. *Educational and Measurement*, v.XX, n.1, p.37-46, 1960.

CORIDOLA, R.; VIEIRA, M. E.; ALVES, M. G.; ALMEIDA, F. T. **Uso das Técnicas de Geoprocessamento na Elaboração de Mapa Preliminar de Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Campos de Goytacazes – RJ**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2933-2940.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas-SP: UNICAMP/Instituto de Geociências, 1992. p.169.

D'ALGE, J. C. L. **Introdução à ciência da geoinformação: cartografia para Geoprocessamento**. 1999. Livro on line: Cap. 6. p.6-32.

DORST, J. **Antes que a natureza morra: por uma ecologia política**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

EASTMAN, J. L. **Analysis of the effects of CO₂ and landscape change using a coupled plant meteorological model**. Fort Collins, 1999, 148p. Ph.D. Dissertation, Department of Atmospheric Science, Colorado State University.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop 10.1**. Redlands, California, USA, 2011.

ESTELLER, M.V.; QUENTIN, E.; DÍAZ-DELGADO, C. **Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de parâmetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de aquíferos**. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, v.2, n.1, p. 17-30, 2002.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. E. (1997). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID – UFPE.

FERREIRA, M. V.; RIEDEL, P. S.; LOPES, E. S. S.; MERINO, E. R. Comparação entre diferentes critérios para elaboração de mapas de suscetibilidade aos escorregamentos. Exemplo do município de Cubatão, serra do mar paulista. **Revista Brasileira de Cartografia**, No60/04, p. 385-400, 2008. (ISSN 1808-0936). Disponível em: < http://www.rbc.ufrj.br/_pdf_60_2008/60_04_8.pdf > Acesso em: 22 junho 2013.

FOSTER, S.S.D., HIRATA, R.C.A. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: World Health Organization, Pan American Health Organization, Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988. Technical Report.

FOSTER, S. HIRATA, R. C. A. **Determinação de Riscos de Contaminação das Águas Subterrâneas**, São Paulo. Bol. Inst. Geológico, São Paulo, n. 10. 1993.

FOSTER, S; HIRATA R.A.C; GÓMEZ D; D'ELIA, M. E PARIS, M. **Protección de la calidad del Agua subterránea**: guia para empresas de água, autoridades municipales y agencias ambientales. Madri: Mundi – Prensa Libros, 2003.

GAO, J. **Digital analysis of remotely sensed imagery**. New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2009. 439 p.

GOMES, R.A. **Avaliação da vulnerabilidade a perda de solo em regiões semi-áridas utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento - área piloto de Parnamirim (PE)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. 160 f.

GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F.; SPADOTTO, C.A.; PEREIRA, A.S. **Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil – base para uma proposta de gestão sustentável**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 20 p.

GOMES, M. A. F. (Ed.). **O uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: implicações para a água subterrânea e propostas de gestão com enfoque agroambiental**. Brasília: EMBRAPA, 2008. 417 p.

GUEDES, F. B.; SEEHUSEN, S. E. **Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília. MMA, 2011.

HARA, L.T. **Técnicas de apresentação de dados em geoprocessamento**. 110p. (INPE 6839-TDI/647) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

HASSUDA, S. **Ciências da Terra em Meio Ambiente: Água Subterrânea um recurso a proteger**. São Leopoldo: Água, 1999, p. 179-196.

HIRATA, R e SUHOGUSOFF, A.V. **A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de São Paulo**. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá, 2004.

HIRATA, R. C. A. E FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 43-50, 2001.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. Manuais técnicos em geociências, 2º ed. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/usodaterra/manualusodaterra.pdf>. Acesso em: 10 maio 2013.

IPT 2000. **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré.** Minuta; relatório 40.674. IPT/Comitê Bacia Tietê/Jacaré.

JENSEN, J. R. *Intruductory Digital Image Processing* (2nd Ed.). Prentice Hall, Upper Saddle River, 1996. 316 p.

LENZERINI, M.: "Data Integration: A Theoretical Perspective". *PODS 2002*: pp. 243-246.

LIMA, W.P. **Introdução ao manejo de bacias hidrográficas.** São Paulo: USP. 1996.

LOBO FERREIRA, J.P.C. **Vulnerabilidade à Poluição de Águas Subterrâneas: Fundamentos e Conceitos para uma Melhor Gestão e Proteção dos Aquíferos de Portugal.** IV Congresso da Água. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa. 1998.

LOBO FERREIRA, J.P.C. e CABRAL, M - **Proposal for an Operational Definition of Vulverability for the European Community"s Atlas of Groundwater Resources,** In; Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Woork Group Brussels; Fevereiro 1991.

LOVELAND, T. R.; ZHU, Z.; OHLEN, D. O.; BROWN, J. F.; REED, B. C.; YANG, L. M. **An Analysis of the IGBP Global Land Cover Characterization Process.** Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Falls Church, VA, v. 65, n. 9, p.1021-1032, 1999.

MARION, F. A. Águas subterrâneas, atividades potencialmente contaminantes e o aporte do geoprocessamento na definição de conflitos. **Geoambiente on-line.** Revista eletrônica do Curso de Geografia – UFG. Jataí, n. 17, p. 31-47, jul./dez. 2011. Disponível em: <http://revistas.jatai.ufg.br/index.php/geoambiente/article/view/1182>. Acesso em: 07 jun. 2013.

MARQUES FILHO, O; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens.** Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MATHER, P.M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images: Na Introduction.** 2ed. London: John Wiley e Sons, p.292, 1999.

MEAULO, F. J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP).** Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2004.

MELO JUNIOR, H. R. 2002. **Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: Caso da ALBRAS, Barcarena – PA.** Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. Dissertação de Mestrado, 154 p.

MELO JUNIOR, H. R. **Método drastic: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 11-14 nov. 2008, Natal. Anais... Natal: ABAS, 11-14 nov. 2008.

MENESES, L. F. (2007). **Avaliação da Vulnerabilidade dos Aquíferos Livres no Município de João Pessoa/ PB, Através do Modelo Drastic.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Paraíba – PB.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília: CNPq, 2012. 266 p.

MOIK, J. G. **Digital Processing of Remotely Sensed Images.** Washington: NASA, p.330, 1980.

MONTEIRO, A. B; COSTA, W. D; FILHO, M. L; BARBOSA, D. L.(2008). **“Hidrogeologia e gestão do aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco.”** in Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal, Nov. 2008.

MOOK, W. G. **Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones.** Madrid: IGME, 2002. 596 p. (Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de Espana. Séries y Manuales, n. 1).

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental.** Rio de Janeiro: ABES, 1997.

MULDERS, M. A. **Remote Sensing in Soil Science.** New York: Elsevier Sc. Publishers, p.379, 1987.

NOBRE, R.C.M. – **Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió.** Tese de Doutorado, Dep. Eng. Civil, COPPE/UFRJ, 296, 2006, disponível no endereço www.coc.ufrj.br , acessado em 25 de abril de 2013.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** São Paulo, 1992, Ed. Edgard Blucher, 308p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher, p.308, 1993.

OEA (Organização dos Estados Americanos). **Aquífero Guarani: programa estratégico de ação – edição bilíngue.** Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai; OEA, janeiro 2009,424 p.

ORGANIZATION OF AMERICAN STATES / GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY (OAS/GEF). **Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG.** Montevideo, 2001. 133p.

ODUM, E. P. **Ecologia.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

OLIVEIRA, M.M. LOBO FERREIRA, J.P.C. Cartografia da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas do Concelho de Montemor-o-Novo Utilizando o Método DRASTIC. In: CABRAL, J.J.S.P. (Org.). LOBO FERREIRA, J.P.C. (Org.). MONTENEGRO, S.M.G.L. (Org.). COSTA, W.D. (Org.). **Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento**. Recife. Editora Universitária - UFPE. v. 1. 447p. 2004.

ONU. **Declaração de Estocolmo de 1972**. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/estocolmo.doc>. Acesso em: 26 jul, 2013.

PEREIRA, G. C.; SILVA, B. C. N. **Geoprocessamento e Urbanismo**. In: GERARDI, L. H. de O.; MENDES, I. A. (Org.). Teoria, Técnicas, Espaços e Atividades: temas de Geografia contemporânea, Rio Claro: UNESP, 2001.

PINTO, S.F.A.; VALÉRIO FILHO, M. **Análise e interpretação de dados de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 1996. 31p.

QUATTROCHI, D. A.; PELLETIER, R. E. **Remote Sensing for Analysis of Landscape: An Introduction**. In: TURNER, M. G. (Ed.). Quantitative Methods in Landscape Ecology: The Analysis and Interpretation Landscape Heterogeneity. New York.

QUELUZ, J. G. T.; STURARO, J. R. **Espacialização da vulnerabilidade do aquífero Guarani no município de Ribeirão Bonito – SP**. Anais: II Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias, Unesp - Botucatu.2011. v. 01. p. 01-05.

RABELO, J.L.; 2006. **Estudo da Recarga do Aquífero Guarani no Sistema Jacaré-Tietê**. Tese de Doutorado São Carlos, ESSSC-USP-SHS.

REBOUÇAS, A.C. **Sistema aquífero Botucatu no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais... Recife: ABAS, 1994. p.500-509.

ROCHA, G. A. **Mega reservatório de água subterrânea do cone sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão**. Contribuição ao seminário internacional "Aquífero Gigante do Mercosul". Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1996.

ROSA, M. J.; NUNES, L. M.; CAMPINAS, M.; STIGTER, T. Y.; TEIXEIRA, M. R.; VIEIRA, J.; - **Recursos hídricos para rega de campos de golfe no concelho de Albufeira, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, 2001**.

ROSSI, P.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N. **Curvas de distribuição de efluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas**. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ/USP, Piracicaba. 2007.

SANTOS, M.M. **Avaliação Hidrogeológica para Determinação da Vulnerabilidade Natural do Aquífero Freático em Área Seleccionada na Cidade de Londrina (PR)**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro. 2005

SANTOS, P.R.P. (2010). **Estudo da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Marizal na Região de Influência do Pólo Industrial de Camaçari (Pic) – BA**. Mestrado profissional em gerenciamento e tecnologias ambientais no processo produtivo, Salvador.

SILVA, R. B. G. **Águas subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção**. São Paulo: DAEE, 2003. 27p.

SILVA. A. de B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: UNICAMP, 2003. 236 p.

SIMON, A. L. H. **A dinâmica de uso da terra e sua interferência na morfohidrografia da bacia do Arroio Santa Bárbara - Pelotas (RS)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2007. 185 f.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; QUADROS, M. L. E. S.; SCANDOLARA, J. E.; FILHO, E. P. S.; REIS, M. R. **Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia, Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, v. 29, p. 469-476, 1999.

TOMLIN, C.D. **Geographic information systems and cartographic modelling**. New York: Prentice Hall, 1990. 249p.

TRIMBLE GEOSPATIAL. **Definiens eCognition developer**. Version 7. Munich: Trimble GeoSpatial, 2009.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RIMA, IIE, 2003.

TUNDISI, J. G. **Limnologia e gerenciamento integrado de recursos hídricos: avanços conceituais e metodológicos**. Ciência e Ambiente, v. 1, n. 21, p. 9-20, 2000.

TUZINE, M. S.; ROSOT, N. C, E CENTENO J. A. S. **Identificação de tipologias florestais em Machipanda, Moçambique, a partir da segmentação de imagens IKONOS**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais: Curitiba, 2011.

XAVIER-DA-SILVA, J. . **Geoprocessamento para análise ambiental**. 1. ed. Rio de Janeiro: D5 Produção Gráfica, 2001. v. 1. 228 p.

XAVIER DA SILVA, J.; CARVALHO FILHO, L. M. **Sistemas de Informação Geográfica: uma proposta metodológica**. In: IV Conferência Latinoamericana sobre Sistemas de Informação Geográfica. *Anais...* 2º simpósio Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, 1993.

WATERLOO do Brasil – Zoneamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região do Polo Petroquímico de Camaçari /BA. Relatório interno para a Cetrel Empresa de Proteção Ambiental, 109 pp; 2003.

ZANINI, L. S. G. **Impactos nos recursos hídricos causados por práticas agropecuárias.** Boletim gaúcho de geografia, n. 26, p. 216-225, 2000.

LEGISLAÇÃO

- Lei nº 4.771, de 15 de Setembro de 1965. Código Florestal.
- Resolução nº 303, de 20 de Março de 2002. Resolução CONAMA.