

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

WILSON FRANCISCO DA SILVA

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À
CONTAMINAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ**

Maceió, AL
2013

WILSON FRANCISCO DA SILVA

**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À
CONTAMINAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cleuda Custódio Freire

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Rochana Campos de Andrade Lima Santos.

Maceió, AL
2013

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

S586a

Silva, Wilson Francisco da.

Análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação na região metropolitana de Maceió / Wilson Francisco da Silva. – 2013.

158f. : il.

Orientador: Cleuda Custódio Freire.

Co-orientadora: Rochana Campos de Andrade Lima Santos

Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2013.

Bibliografia: f. 144-158.

1. Águas subterrâneas –Vulnerabilidade. 2. Aquífero – Contaminação.
3. Vulnerabilidade – Risco. I. Título.

CDU: 624:556.33



Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento/PPGRHS



**ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À
CONTAMINAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE MACEIÓ**

WILSON FRANCISCO DA SILVA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 06 de março do ano de 2013.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Cleida Custódio Freire
(Orientadora/PPGRHS/UFAL)

Prof.^a Dr.^a Rochana Campos de Andrade Lima Santos
(Coorientadora - IGDEMA/UFAL)

Prof.^a Dr.^a Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira
(PPGRHS/UFAL)

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim
(PPGRHS/UFAL)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
(UFPE)

Dedico todo este trabalho a meus pais, Antonio Francisco da Silva e Izali Maria da Conceição Silva, além de minha esposa Mauricéa Gomes Ferreira, por todo incentivo, paciência e dedicação nos momentos mais difíceis dessa caminhada. Além destes, a minha avó Benedita Maria da Conceição pelo amor dedicado, e aos meus irmãos Wellington Francisco da Silva e Uilton Francisco da Silva pelas discussões e estímulos a mim proferidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me amparou em todos os dias de minha vida.

À Profª Drª Cleuda Custódio Freire pela oportunidade, orientação, sugestões, críticas, dedicação, paciência e estímulos a mim dedicados.

À Profª Drª Rochana Campos de Andrade Lima Santos pela oportunidade, ideias e discussões.

Ao Profº Esp. Sinval A. M. Guimarães Jr. e Esdras de Lima Andrade pelo Material cedido, além da dedicação, paciência e ensinamentos a mim proferidos.

Aos amigos Fernanda Godoy, José Aparecido, Gustavo Peplau, Marcius Omena, e Norma Cândida pelas conversas, discussões e ajudas nos momentos mais difíceis do mestrado.

Aos amigos Benício Monte, Bruno Timóteo, Carlos Alberto, Cledeilson Pereira e Denis Duda pela ajuda na confecção dos mapas gerados e discussão sobre métodos de interpolação.

Aos alunos de Graduação, Alberonaldo Alves, Luiz Henrique, Geyza Correia e Rafaela Vieira que sempre estimularam com conversas benéficas e proveitosas.

A todos os integrantes do Projeto ASUB (Águas Subterrâneas) que ajudaram na conclusão desta dissertação.

A todos os professores e técnicos que fazem parte do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da UFAL, por fazerem parte dessa trajetória.

Aos colegas Wilton José Silva da Rocha (SEMARH/AL) e Jamerson Cavalcante de Lima (SEINFRA) pelos materiais cedidos para conclusão desta dissertação.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) que auxiliou financeiramente a pesquisa e a realização de um sonho.

RESUMO

A determinação da susceptibilidade dos aquíferos costeiros à contaminação fornece subsídios quanto ao uso e ocupação do solo. O estudo utilizou-se de conceitos derivados dos métodos DRASTIC (ALLER; BENNET; LEHR; PETTY; e HACKETT, 1987), GOD (FOSTER, 1987) e IS (FRANCÉS; PARALTA; FERNANDES; e RIBEIRO, 2001), para determinar a vulnerabilidade aquífera em parte da Região Metropolitana de Maceió (RMM). Esses dois primeiros métodos tratam da vulnerabilidade intrínseca ao aquífero, enquanto que o método IS verifica o grau de influência humana na área analisada. Este último método é proveniente do método DRASTIC, acrescido do parâmetro Uso e Ocupação do Solo. Quanto à determinação da vulnerabilidade aquífera, o método DRASTIC identificou duas classes de vulnerabilidade, a Baixa que ocupou cerca de 96% da área de estudo, enquanto que os 4% restante pertencem à classe de vulnerabilidade Moderada. O Método GOD se destaca por utilizar poucos parâmetros e de fácil obtenção. Sendo bem representativo para a escala de análise proposta, obteve quatro classes de vulnerabilidade, com vulnerabilidade Baixa em cerca de 91% de sua área, 7% de vulnerabilidade Moderada, 1,5% de vulnerabilidade Desprezível e 0,4% de vulnerabilidade Alta. O método IS apresentou duas classes de vulnerabilidade, porém uma Intermediária, ocupando cerca de 57,5% da área de estudo e os 42,5% restante de vulnerabilidade Alta. Esta classe ocupou principalmente as áreas urbanas. A validação dos mapas de vulnerabilidade foi realizada pela verificação da qualidade das águas subterrâneas, através do parâmetro nitrato, o qual acusou índices de potabilidade aceitável para o consumo humano, que é de até 10 mg/L de N, em 52,12 % das amostras catalogadas, ou seja, 86 das 165 análises. As áreas com restrição de uso das águas subterrâneas identificadas, após o cruzamento dos mapas de vulnerabilidade e carga poluidora, estão localizadas, predominantemente, na parte baixa da cidade nos bairros de Jatiúca até o Pontal da Barra, além dos bairros que margeiam toda a orla lagunar, até chegar ao bairro de Rio Novo. Os bairros do Jacintinho, Farol, Feitosa e Pinheiro, na parte alta da cidade também merecem atenção já que apresentaram elevadas concentrações de nitrato e vulnerabilidade variando de média a alta. Foi verificada uma forte correlação entre os valores de nitratos catalogados e as áreas mais vulneráveis à contaminação, determinada pelo índice IS, que atribui maior peso às áreas com alto risco de contaminação. Ambos os valores elevados estão localizados em áreas urbanas, validando assim não só o mapa de vulnerabilidade IS, mas o DRASTIC e o GOD que também obtiveram resultados semelhantes, sendo que com menor grau de vulnerabilidade.

Palavras Chave: Águas subterrâneas. Vulnerabilidade. Aquífero. Contaminação. Risco.

ABSTRACT

The determination of susceptibility to contamination of coastal aquifers provides subsidies for the use and occupation of land. The study made use of concepts derived from DRASTIC methods (ALLER; BENNET; LEHR; PETTY, and HACKETT, 1987), GOD (Foster, 1987) and IS (FRANCÉS; PARALTA; FERNANDES; and RIBEIRO, 2001), to determine the aquifer vulnerability of the metropolitan area of Maceió (RMM). These first two methods to address the inherent vulnerability aquifer, while the IS method checks the degree of human influence on the analyzed area. This latter method is derived from the DRASTIC method, plus the parameter Use and Occupation. On the determination of aquifer vulnerability, DRASTIC method identified two classes of vulnerability, which occupied the Low around 96% of the study area, while the remaining 4% belong to the class of vulnerability faced. The method GOD stands out for using a few parameters and easy to obtain. Being representative for the scale of analysis proposal, obtained four classes of vulnerability, Low vulnerability with in about 91% of its area, 7% Moderate vulnerability, 1.5% Despicable vulnerability and 0.4% of High vulnerability. The IS method has two classes of vulnerability, but one Intermediate, occupying about 57.5% of the study area and the remaining 42.5% of High vulnerability. This class occupied mainly urban areas. The validation of vulnerability maps was carried by verifying the quality of groundwater, nitrate via parameter, which accused drinking indices acceptable for human consumption, which is up to 10 mg/L N in 52.12% of cataloged samples or 86 of 165 analyzes. Areas with groundwater use restriction identified, after the crossing of the polluting load and vulnerability maps, are located predominantly in the neighborhoods of Jatiuca until Pontal da Barra, in addition to all the neighborhoods that border the lagoon shore, until reaching the Rio Novo neighborhood. The neighborhoods of Jacintinho, Farol, Feitosa and Pinheiro in Uptown also deserve attention, since it showed high concentrations of nitrate and vulnerability ranging from medium to high. It was verified a strong correlation between the values of nitrates cataloged and areas most vulnerable to contamination, determined by the index IS, which assigns greater weight to areas with high risk of contamination. Both high values are located in urban areas, thus validating not only the vulnerability map IS, but the DRASTIC and GOD who also obtained similar results, but with a lesser degree of vulnerability.

Keywords:Groundwater. Vulnerability.Aquifer.Contamination.Risk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos comuns de poluição das águas subterrâneas.	24
Figura 2 – Esquema de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos (DRASTIC).	38
Figura 3 – Descrição Esquemática do Método GOD.	40
Figura 4 – Descrição Esquemática do Método IS.	42
Figura 5 – Localização da área de estudo.	47
Figura 6 – Base SRTM	49
Figura 7 – Curvas de nível de 10m	49
Figura 8 – Modelo Digital de Elevação	49
Figura 9 – Balanço hídrico de Maceió segundo Thornthwait-Mather.	52
Figura 10 – Mapa geológico	57
Figura 11 – Mapa de subafloamento.	57
Figura 12 – Perfil geológico sintetizado da cidade de Maceió.	57
Figura 13 – Mapa das bacias hidrográficas inseridas na área de estudo.	59
Figura 14 – Coluna estratigráfica.	67
Figura 15 – Sobreposição de mapas de solos da EMBRAPA adaptado para área de estudo	69
Figura 16 – Fluxograma das etapas de trabalho desenvolvidas nesta pesquisa.	74
Figura 17 – Potencial aumento da infiltração em aquíferos urbanos semi-confinados.	78
Figura 18 – Metodologia GOD para determinação de classes de vulnerabilidade.	86
Figura 19 – Variação dos níveis estáticos	94
Figura 20 – Vulnerabilidade dos níveis estáticos.	94
Figura 21 – Recarga natural	96
Figura 22 – Recarga a partir do uso do solo.	96
Figura 23 – Mapa de recarga em mm/ano	98
Figura 24 – Mapa de vulnerabilidade de recarga.	98
Figura 25 – Interpolação IDW do índice do meio aquífero.	100
Figura 26 – Mapa de Vulnerabilidade da zona saturada.	100
Figura 27 – Índices do parâmetro solos	103
Figura 28 – Mapa de vulnerabilidade de solos.	103
Figura 29 – Mapa de declividade em %	104
Figura 30 – Vulnerabilidade da declividade.	104
Figura 31 – Índices da zona insaturada	105
Figura 32 – Vulnerabilidade da zona insaturada	105

Figura 33 – Faixas de condutividade em cm/s	107
Figura 34 – Mapa de vulnerabilidade (C).	107
Figura 35 – Mapa de vulnerabilidade final	108
Figura 36 – Classes da vulnerabilidade.	108
Figura 37 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro G.	110
Figura 38 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro O.	112
Figura 39 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro D.	114
Figura 40 – Mapa de vulnerabilidade GOD	115
Figura 41 – Classes de vulnerabilidade GOD.	115
Figura 42 – Mapa de vulnerabilidade de Nível Estático (NE) do método IS.	117
Figura 43 – Mapa de vulnerabilidade da recarga (IS).	118
Figura 44 – Mapa de vulnerabilidade do meio aquífero (IS).	119
Figura 45 – Mapa de vulnerabilidade da topografia (SI).	120
Figura 46 – Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo alterado.	123
Figura 47 – Mapa de vulnerabilidade do uso e ocupação do solo (IS)	123
Figura 48 – Mapa final da vulnerabilidade (IS)	125
Figura 49 – Classes da vulnerabilidade (IS).	125
Figura 50 – Mapa de Vulnerabilidade DRASTIC	128
Figura 51 – Mapa de Vulnerabilidade GOD	128
Figura 52 – Mapa de Vulnerabilidade IS.	128
Figura 53 – Zoneamento das vulnerabilidades segundo os métodos DRASTIC, GOD e IS	131
Figura 54 – Variabilidade de Nitrato	133
Figura 55 – Classes de Nitrato para potabilidade.	133
Figura 56 – Mapa de sobreposição de contaminação por nitrato e vulnerabilidade.	134
Figura 57 – Áreas de Alta Vulnerabilidade, menos propícias a utilização humana.	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Diversos usos do solo com suas fontes de contaminação.	27
Quadro 2 – Classificação Climática de Köppen para Maceió.	50
Quadro 3 – Características dos solos presentes na área de estudo.	102
Quadro 4– Resumo do mapa de vulnerabilidade GOD	116

LISTA DE TABELAS

Tabela1 – Classes de vulnerabilidade da metodologia DRASTIC.	38
Tabela2 – Municípios da área de estudo com suas respectivas áreas.	48
Tabela 3 – Parâmetros e pesos relativos do Índice DRASTIC	75
Tabela4 – Classes de profundidade do nível d'água com seus pesos e índices.	76
Tabela5 – Classes de recarga com seu fator de ponderação e respectivos índices.	79
Tabela6 – Descrição do material do aquífero com seus Pesos Relativos e índices	80
Tabela 7 – Descrição dos solos com seus respectivos índices e pesos.	80
Tabela 8 – Classes de declividade com seus pesos e índices.	82
Tabela 9 – Tipos de materiais com seus respectivos pesos e índices.	83
Tabela 10 – Classes de condutividade hidráulica com seus pesos e índices.	84
Tabela 11 – Classes de vulnerabilidade e suas respectivas definições.	87
Tabela 12 – Parâmetros do método IS com seus fatores de ponderação	89
Tabela 13 – Parâmetros e índices do método IS	90
Tabela 14 – Usos do solo, com base na carta CORINE Land Cover (1988)	91
Tabela 15 – Classes de Vulnerabilidade conforme o método IS	91
Tabela 16 – Recargas aquíferas a partir dos diversos usos do solo.	97
Tabela 17 – Classes dos solos com suas porcentagens de silte, argila e areia	101
TabelaA 18 – Síntese do grau de confinamento, seus índices e porcentagens	110
Tabela 19 – Materiais litológicos com seus respectivos índices atribuídos	111
Tabela 20 – Profundidades dos níveis estáticos dos poços com seus respectivos índices	113
Tabela 21 – Aplicação dos Índices e Pesos do método IS na região de trabalho	122
Tabela 22 – Áreas (km ²) dos usos e ocupações do solo da área de estudo	124
Tabela 23 – Classes de vulnerabilidade IS com suas áreas de abrangência	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL	Estado de Alagoas
ANA	Agência Nacional de Águas
ASUB	Projeto: Instrumentos de Gestão para as Águas Subterrâneas na Região Hidrográfica do rio Pratagy - Alagoas
BDHM	Banco de Dados Hidrometeorológicos
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
c	Índices de Contaminação
CASAL	Companhia de Saneamento de Alagoas
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos de Maceió
CNIG	Centro Nacional de Informação Geográfica
CTEC	Centro de Tecnologia
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Centro Nacional de Pesquisa de Solos
HIDROWEB	Sistemas de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighting (Ponderação do Inverso das Distâncias)
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Alagoas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IS	Índice de Susceptibilidade
MDT	Modelo Digital do Terreno
mL	Mililitro
mg/L	Miligrama por litro
M.S	Ministério da Saúde
NE	Nível Estático
NMP	Número mais provável.
NO₃⁻	Nitrato
OMS	Organização Mundial da Saúde
p	Pesos Relativos
PAC I	Programa de Aceleração do Crescimento 1
PIs	Planos de Informações

PPGRHS	Programa de Pós Graduação em recursos Hídricos e Saneamento
RADAM BRASIL	Projeto de Mapeamento do Território Brasileira através de Radar
RMM	Região Metropolitana de Maceió
SEINFRA	Secretaria de Estado da Infraestrutura de Alagoas
SEMARH	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UTM	Projeção Universal Transversal de Mercator
VMP	Valor Máximo Permitido
ZAAL	Zoneamento Agroecológico de Alagoas
ZEIS	Zonas Especiais de Interesse Social
ZIAPs	Zonas de Interesse Ambiental e Paisagístico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Geral.....	19
1.1.2	Específicos.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Vulnerabilidade Intrínseca e Risco à Poluição dos Aquíferos	20
2.3	Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos	32
2.3.1	Índice DRASTIC.....	36
2.3.2	Índice GOD.....	39
2.3.3	Índice IS.....	41
2.4	Geoestatística e Uso de SIG na Construção de Mapas	42
2.5	Projeto ASUB	45
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
3.1	Topografia	48
3.2	Clima	50
3.3	Geologia	53
3.4	Formações Litológicas	53
3.4.1	Formação Poção.....	53
3.4.2	Formação Ponta Verde.....	54
3.4.3	Formação Maceió.....	54
3.4.4	Formação Marituba.....	54
3.4.5	Formação Barreiras.....	55
3.4.6	Sedimentos de Praia e Aluvião.....	56
3.5	Geomorfologia	58
3.6	Hidrografia	59
3.7	Hidrogeologia	60
3.7.1	Sistema Aquífero Barreiras.....	62
3.7.2	Sistema Aquífero Marituba.....	63
3.7.3	Sistema Aquífero Barreiras / Marituba.....	64
3.7.4	Aquífero Poção.....	65
3.7.5	Aquífero Sedimentos de Praia e Aluvião.....	65
3.7.6	Aquífero Maceió.....	66
3.8	Solos	68
3.9	Vegetação	69
3.10	Restrições de Uso e Ocupação do Solo da área de estudo	70
4	METODOLOGIA	73
4.1	Procedimentos para o cálculo do Índice DRASTIC	75
4.1.1	Parâmetro D.....	76
4.1.2	Parâmetro R.....	76
4.1.3	Parâmetro A.....	79
4.1.4	Parâmetro S.....	80
4.1.5	Parâmetro T.....	82

4.1.6	Parâmetro I.....	83
4.1.7	Parâmetro C.....	84
4.2	Procedimentos para o cálculo do Índice GOD.....	85
4.2.1	Parâmetro G.....	88
4.2.2	Parâmetro O.....	88
4.2.3	Parâmetro D.....	88
4.3	Procedimentos para o cálculo do Índice IS.....	89
4.3.2	Uso e ocupação do solo (LU)	92
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
5.1	Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (DRASTIC).....	93
5.1.1	Mapa de vulnerabilidade do Nível Estático - NE (D)	93
5.1.2	Mapa de vulnerabilidade da Recarga (R)	95
5.1.3	Mapa de vulnerabilidade do Meio Aquífero (A)	99
5.1.4	Mapa de vulnerabilidade de Solos (S)	101
5.1.5	Mapa de vulnerabilidade da Topografia (T)	103
5.1.6	Mapa de vulnerabilidade do Meio Insaturado (I)	105
5.1.7	Mapa de vulnerabilidade da Condutividade (C)	106
5.1.8	Mapa de Vulnerabilidade DRASTIC.....	108
5.2	Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (GOD).....	109
5.2.1	Grau de Confinamento do Aquífero (G).....	109
5.2.2	Litologia da Zona Vadosa (O).....	111
5.2.3	Profundidade do Lençol Freático (D).....	113
5.2.3	Mapa de Vulnerabilidade GOD.....	114
5.3	Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (IS).....	116
5.3.1	Nível Estático (D).....	117
5.3.2	Recarga (R).....	118
5.3.3	Meio Aquífero (A).....	119
5.3.4	Topografia (T).....	120
5.3.5	Uso e ocupação do solo (LU).....	121
5.4	Resultado do índice de vulnerabilidade IS.....	124
5.5	Análises dos resultados dos métodos DRASTIC, GOD e IS.....	126
5.6	Mapeamento dos dados pretéritos de qualidade de água.....	132
5.7	Considerações Finais.....	136
6	CONCLUSÃO.....	139
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	142
8	BIBLIOGRAFIA.....	143

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, com o crescimento vertiginoso da população, houve uma ampliação do consumo de água subterrânea pelos mais diversos fins, tanto no meio urbano quanto no rural. Dessa forma, a utilização desmesurada desses recursos hídricos, tende a reduzir tanto sua quantidade como qualidade.

A falta ou insuficiência de planejamento urbano das cidades, que é fruto da antropização desordenada, pode promover modificações no equilíbrio do ecossistema local. Para Baptista et al. (2005), a urbanização provoca alterações significativas no meio ambiente, influenciando diretamente nos processos hidrológicos, por meio da ação direta dos cursos de água nas bacias hidrográficas.

Os processos de urbanização e industrialização das cidades, quando mal sucedidos, tem a capacidade de degradar a qualidade das águas. Vale salientar que, esses processos, tanto podem afetar as águas superficiais, que mantém um contato imediato com o poluente, quanto às águas subterrâneas, por possuírem uma intensa relação. No entanto, o solo e a camada insaturada do aquífero possuem características filtrantes, ou seja, de autodepuração de contaminantes, tornando-o naturalmente mais protegidos. Os diferentes usos e ocupações dos solos, associados à hidrogeologia local, que subsidia a vulnerabilidade, podem facilitar a contaminação das águas subterrâneas (COSTA, 1997).

A ausência ou deficiência no sistema de esgotamento sanitário de cidades densamente povoadas, que é um mecanismo de infraestrutura do processo de urbanização, influencia diretamente na degradação ambiental de rios e na qualidade das águas subterrâneas, uma vez que os resíduos humanos são lançados *in natura* nos corpos d'água ou infiltra no solo através de fossas sépticas/sumidouros e vazamentos de redes de esgoto. Para a Agência Nacional de Águas, o impacto do lançamento de esgotos sobre a qualidade das águas subterrâneas pode ser detectado através de elevadas concentrações de nitrato e do surgimento de bactérias patogênicas e vírus (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2005).

As diversas atividades antrópicas localizadas na Região Metropolitana de Maceió (RMM) atuam sobre o solo impermeabilizando-o e degradando-o, podendo causar sérios danos ambientais aos recursos hídricos subterrâneos. A degradação ambiental em uma urbanização descomprometida com os condicionantes físico-ambientais pode ser constatada, dentre outras coisas, pelo conseqüente comprometimento da qualidade da água, causando prejuízos sociais e danos materiais (MOLFI, 2009).

Dados recentes do Censo Demográfico assinalam uma elevada taxa de urbanização para a área de estudo, tendo Maceió 99,93% de sua população vivendo em áreas urbanizadas (IBGE, 2010). Tal município compreende 83 % do território da presente pesquisa. A combinação da expansão urbana com o saneamento parcial de Maceió, 27% de acordo com a Companhia de Saneamento de Alagoas (2012), pode aumentar o risco de contaminação das águas subterrâneas, como já determinada em pontos específicos (cemitérios) por Silva (2012).

O desequilíbrio ambiental promovido pela infraestrutura sanitária ínfima e pela ocupação desordenada do solo na RMM, juntamente com as características do meio, pode afetar a o aquífero de diversas maneiras, dentre elas o rebaixamento no nível freático, a salinização das águas costeiras e o rebaixamento do lençol freático.

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH (ALAGOAS, 2010) a utilização de águas subterrâneas, sobretudo para o abastecimento de Maceió, pelo sistema aquífero Barreiras / Marituba, que corresponde a cerca de 81% do abastecimento de água da população através de mais de 400 poços profundos, vem promovendo o avanço da cunha salina do mar e a ocorrência de nitrato, relacionada à deficiência dos sistemas de esgotamento sanitário, impondo restrições quanto à qualidade das águas de poços.

Em estudo lançado recentemente pela Agência Nacional de Águas (2011a) sobre as águas subterrâneas da Região Metropolitana de Maceió, verificou-se um déficit de cerca de 100 milhões de metros cúbicos a mais do que os aquíferos conseguem naturalmente repor, caracterizando o sistema aquífero Barreiras-Marituba num regime de superexploração que merece um cuidado especial para evitar maiores problemas no futuro. Segundo Carvalho e Diniz (1984) o rebaixamento do lençol freático pode-se dar pelo intenso bombeamento de água subterrânea, violando o equilíbrio extração/recarga, pela drástica redução da pluviosidade ou ainda pela diminuição da infiltração das águas das chuvas, que traz como consequência, um aumento nos picos de descarga dos rios, favorecendo as enchentes nas regiões ribeirinhas.

A junção dos fatos apresentados como, à deficiência dos sistemas de esgotamento sanitário e a superexploração pode acarretar numa redução da qualidade das águas subterrâneas. Portanto, faz-se necessário estudar as características fisiográficas, hidrogeológicas e antrópicas da área de estudo para determinar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, que é a “sensibilidade de um aquífero aos efeitos adversos de uma carga contaminante a ele imposta” (FOSTER et al., 2002).

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos tem sido utilizada como instrumento técnico indispensável em muitos sistemas de avaliação de risco ao uso de águas subterrâneas

para abastecimento público, sobretudo por agências ambientais, (NOBRE, 2006). Deste modo, se faz necessária a avaliação da vulnerabilidade do aquífero na região metropolitana de Maceió por se tratar de uma área de grande exploração, necessitando assim ser conservado para manter a qualidade e quantidade de suas águas.

Existem diversos métodos de determinação da vulnerabilidade aquífera, dentre os mais consagrados estão o DRASTIC e o GOD. Esses métodos devem levar em consideração, de forma direta ou indireta, não só às características intrínsecas hidrogeológicas do subsolo, como também o potencial da classe contaminante.

Os métodos de determinação da vulnerabilidade são procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e de suas especificidades, possibilitando a construção de mapas temáticos que auxiliam na proteção e manutenção da qualidade da água dos aquíferos, contribuindo também para o planejamento do uso e ocupação do solo.

Os trabalhos voltados à caracterização hidrogeológica e determinação do grau de vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, na Região Metropolitana de Maceió, são escassos e localizados, sendo realizados por Barroso (2001), AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2011a;b), realizado entre os anos de 2009 e 2011, Companhia de Saneamento de Alagoas (2008 a; b; c; e d) e Companhia de Saneamento de Alagoas (2009), todos através do método GOD, além de Nobre (2006) utilizando o método DRASTIC modificado, uma vez que a disponibilidade de dados quantitativos na literatura deve ser adequado às condições específicas de cada estudo de caso.

A aplicação de outros estudos de vulnerabilidade de aquíferos na área de estudo é de fundamental importância, uma vez que, foi pouco explorada cientificamente através de metodologias que verifiquem uma maior quantidade de parâmetros, além da realização de análises comparativas entre os mesmos. Dessa forma, foram aplicados os métodos DRASTIC, GOD e IS para determinar a vulnerabilidade a partir da introdução de contaminantes em subsuperfície, como por exemplo, o vazamento de tanques de combustíveis enterrados. O método IS tem por característica a determinação da vulnerabilidade e do risco a contaminação do aquífero, já que identifica as atividades antrópicas atribuindo índices e pesos.

A importância do aquífero Barreira/Marituba para o abastecimento humano da RMM justifica a análise da vulnerabilidade aquífera pelos métodos DRASTIC e GOD, e do risco de contaminação, através da integração das fontes potenciais de poluição pelo método IS. Tanto a vulnerabilidade quanto o risco podem ser mapeados, permitindo uma melhor avaliação

sobre as propostas de desenvolvimento urbano e rural, tomando como prioridade o controle da poluição e o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

Os parâmetros investigados para determinação da vulnerabilidade do aquífero na área de estudo pelos métodos DRASTIC, GOD e IS são respectivamente a Profundidade do Nível Estático, a Recarga, o Meio Aquífero ou Influência na Zona Saturada, o Solo, a Influência ou Grau de Consolidação da Zona não Saturada, o Tipo de Aquífero ou Grau de Confinamento Hidráulico, a Condutividade, a Topografia e o Uso e Ocupação do Solo.

Destes parâmetros, apenas a Profundidade do Nível Estático e o Substrato Litológico ou Grau de Consolidação da Zona não Saturada são parâmetros comuns aos três métodos de determinação da vulnerabilidade. Enquanto o primeiro possui uma relação direta com a precipitação e o nível de exploração das águas subterrâneas, o segundo depende exclusivamente dos extratos litológicos superiores ao lençol freático, podendo ampliar ou reduzir a ação dos contaminantes no aquífero.

Após a determinação dos parâmetros e o cruzamento dos mesmos, a elaboração de mapas temáticos de vulnerabilidade e risco de contaminação dos aquíferos são responsáveis por auxiliar na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, já que espacializam as áreas com maior suscetibilidade à contaminação, considerando o uso e ocupação da superfície do terreno onde se desenvolvem as dinâmicas da sociedade e as respectivas transformações dos recursos naturais. Além disso, esses mapas subsidiam os profissionais da área de planejamento ambiental e territorial nas atividades de gestão e proteção das águas subterrâneas, através do monitoramento dos riscos de contaminação e de qualidade das águas (RIBEIRO et al., 2011).

Os estudos hidrogeológicos, de forma geral, auxiliam na obtenção de conhecimento sobre os recursos hídricos subterrâneo, de modo a estabelecer um padrão na exploração e conservação racional das águas subterrâneas. Para Nobre e Nobre (2001) a gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve ser baseado nas condições hidrogeológicas específicas como fluxo e transporte de massa – poluente em meio poroso e/ou fraturado e nos possíveis impactos ambientais oriundos da extração de água para demandas múltiplas.

De posse desses argumentos, tem-se a necessidade de aplicar índices de vulnerabilidade natural de aquífero em escala local, com o intuito de averiguar sua eficiência no auxílio à proteção e o monitoramento da qualidade das águas dos aquíferos, tendo em vista que está cada vez mais ameaçada, devido ao planejamento ineficaz do uso e ocupação do solo. Daí surge à necessidade de catalogação e integração de dados provenientes no projeto de pesquisa “Instrumentos de Gestão para as Águas Subterrâneas na Região Hidrográfica do Rio Pratygy Alagoas” (ASUB-AL).

O projeto, (ASUB-AL), propiciou a pesquisa de determinação da vulnerabilidade na Região Metropolitana de Maceió, através da disponibilização de um banco de dados atualizado. Todos os dados catalogados durante a pesquisa estão compondo um banco de informações atualizado, visando à elaboração de estudos subsequentes.

Dessa forma, o estudo da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas na RMM determinará às áreas mais propícias a contaminação por atividades antrópicas e os locais que já apresentam contaminação. Tal informação servirá de base para a população residente nas áreas contaminadas e para os gestores públicos que poderão intervir com ações planejadas para recuperação da qualidade das águas subterrâneas e ocupações urbanas desordenadas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Partindo da necessidade de fornecer subsídios para uma melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió, a presente dissertação visa analisar a vulnerabilidade aquífera à poluição na Região Metropolitana de Maceió, através da determinação das áreas mais propícias à contaminação e dos locais já contaminados.

1.1.2 Específicos

- Aplicar e avaliar as metodologias DRASTIC, GOD e IS para identificar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação, comparando as respostas obtidas;
- Identificar áreas que necessitam de monitoramento intensivo da qualidade das águas subterrâneas, através de análises de características hidrogeológicas e fisiográficas da área de estudo, utilizando técnicas de geoprocessamento para elaborar mapas de vulnerabilidade dos aquíferos;
- Validar os mapas de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos através de análises pretéritas de qualidade das águas subterrâneas;
- Realizar o cruzamento dos mapas temáticos para análise da vulnerabilidade dos aquíferos, propondo áreas de restrição à utilização do solo e exploração das águas subterrâneas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Vulnerabilidade Intrínseca e Risco à Poluição dos Aquíferos

O termo “Vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação” foi introduzido pela primeira vez por Jean Margat em 1960, sendo descrito em Vrba e Zaporozec (1994), apud Zaporozec (2002). Tal conceito é baseado na suposição de que o sistema “solo e rocha” que envolve o aquífero pode fornecer um grau de proteção (“auto-purificação” ou “atenuação natural”) contra a contaminação das águas subterrâneas (ZAPOROZEC, 2002).

As conclusões e recomendações da conferência internacional sobre “Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants” (DUIJVENBOODEN; WAEGENINGH, 1987), definem vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas como sendo a sensibilidade da qualidade dessas águas a uma carga poluente, em função apenas das características intrínsecas do aquífero.

Com o intuito de avaliar o risco de poluição das águas subterrâneas, Foster e Hirata (1988), combinaram o perigo de uma carga contaminante urbana com a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, está, podendo ser definida como sua maior ou menor suscetibilidade em ser afetado por uma carga poluidora. Como produto final tinha-se a produção de mapas que identificavam áreas de risco de poluição significativo. A vulnerabilidade de um aquífero é, portanto, um conjunto de características que determina o quanto ele poderá ser afetado pela carga do contaminante (BRAGA, 2008).

De acordo com Chaves et al. (2007) a ampliação crescente da exploração descontrolada das águas, tem aumentado a preocupação a respeito da poluição das águas subterrâneas, principalmente devido à ocupação indisciplinada e uso do solo, que coloca em risco a qualidade natural das águas. O homem vem ocupando os espaços geográficos indiscriminadamente, sem o prévio conhecimento de suas vulnerabilidades e potencialidades (PEREIRA, 2006).

Por menor que seja a vulnerabilidade de um aquífero, essa sempre existirá e deverá ser determinada a fim de promover a gestão e utilização correta das águas subterrâneas pelo órgão gestor competente, já que a ocupação antrópica desordenada pode trazer efeitos poluentes de longa duração às águas subterrâneas. Segundo Nobre (2006) a vulnerabilidade não é uma propriedade absoluta, mas uma indicação relativa de onde a contaminação tem maior probabilidade de ocorrer.

À medida que o homem passa a ocupar e interagir nos espaços vazios, há a geração de resíduos que podem ou não ser gerenciados adequadamente, a depender do projeto de

gerenciamento e do envolvimento da equipe técnica responsável, poderá provocar possíveis impactos ao ambiente. Segundo Trein (2008) a identificação das áreas com maior risco de degradação dos aquíferos é condição essencial para o desenvolvimento de estratégias que visem à preservação dos recursos hídricos, priorizando a aplicação de recursos técnicos e financeiros nos locais de maior interesse socioeconômico e ambiental.

A avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos só é possível a partir de estudos hidrogeológicos para definição das suas características mais importantes como extensão, área de recarga, espessura profundidade do nível da água, qualidade das águas e dos parâmetros hidrodinâmicos como condutividade hidráulica (CONEJO et al., 2007).

De acordo com Hirata (2001) a vulnerabilidade à poluição do aquífero é a característica intrínseca que determina a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica imposta.

A interação entre vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em subsuperfície, consiste no conceito de perigo de contaminação (FOSTER & HIRATA, 1988). Através do conhecimento de ambas as características, podemos avaliar o nível de perigo de poluição a que um aquífero está sujeito.

Sobre a diferença de vulnerabilidade e risco de poluição Bós (2008) afirma que o risco de poluição depende não só da vulnerabilidade, mas também da existência de altas cargas poluentes que possam entrar no ambiente subterrâneo, enquanto que a vulnerabilidade está associada à dificuldade hidráulica à penetração de contaminantes, à capacidade de atenuação dos agentes contaminantes no solo e do tipo de poluente potencial.

As atividades antrópicas representam um potencial risco à contaminação dos aquíferos e à qualidade dessas águas. De modo geral, os impactos nos corpos d'água subterrâneos ocasionados pelo lançamento e/ou vazamento de efluentes contaminantes são favorecidos pela existência de solos porosos e permeáveis que aumenta a infiltração, podendo ser ampliada se o solo for plano e descoberto.

Com isso, a proteção dos aquíferos envolve características como perigo de contaminação, que tem a ver com a presença de carga contaminante aplicada no solo, e vulnerabilidade natural, que trata da facilidade com que o contaminante pode atingir o corpo d'água subterrâneo. É possível configurar ambientes com elevado perigo de contaminação, devido à presença de potenciais focos de contaminação e uma baixa vulnerabilidade ou vice-versa. As áreas que apresentam elevada vulnerabilidade natural e grande concentração de carga poluidora presente no ambiente pode ser definida ou identificada visando o controle e atenuação de possíveis impactos.

As características hidrogeológicas dos aquíferos determinam a vulnerabilidade do mesmo. Se este aquífero possuir resistência às modificações oriundas das ações antrópicas, como a exploração desmedida dos recursos naturais sem mensurar a capacidade de recuperação dos mesmos, então este apresentará baixa vulnerabilidade, mas alto risco, já que o contaminante estará sendo disposto inadequadamente em subsuperfície.

Em estudo sobre a vulnerabilidade e risco à poluição do sistema aquífero médio na bacia do Araripe no Ceará, Viana (2007) enfatizou que o risco de contaminação de um aquífero é a correlação da vulnerabilidade natural com as cargas poluidoras. Dessa forma, a partir do tipo e da carga introduzida no solo a qual os aquíferos são submetidos está o seu grau de contaminação e sua vulnerabilidade natural, portanto, a vulnerabilidade é determinada a partir das características intrínsecas do aquífero que definem com que facilidade a carga contaminante vai atingir o lençol freático.

A Companhia Pernambucana de Meio Ambiente (CPRH, 2003) realizando um diagnóstico socioambiental do litoral norte de Pernambuco apresenta as possibilidades de se encontrar aquíferos com baixa vulnerabilidade e alto risco de contaminação e vice-versa.

Para CPRH (2003) “Assim é possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver risco de poluição excepcional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo. É importante precisar a diferença entre vulnerabilidade e risco de poluição. O risco é causado não apenas pelas características intrínsecas do aquífero, mas também pela existência de atividades poluentes, fator dinâmico que, em princípio, pode ser controlado”.

De acordo com a CPRH (2003) é possível encontrar águas subterrâneas muito vulneráveis a uma carga de nitratos originada por práticas agrícolas incorretas e, no entanto, ser pouco vulnerável a cargas patogênicas, devido à mortalidade natural dos agentes patogênicos, daí a necessidade de avaliar a vulnerabilidade em relação a fatores específicos de poluição, como nutrientes, materiais de origem orgânica, metais pesados, entre outros.

“O interesse de avaliar o grau de vulnerabilidade das diversas formações aquíferas decorre fundamentalmente da necessidade de fornecer às autoridades competentes um instrumento que seja útil nas tomadas de decisões ao nível de planejamento e ordenamento do território” (PARALTA et al., 2005). Tal ferramenta tem a função de proteger os recursos hídricos ainda preservados ou passíveis de uso, e não recuperá-los.

A premissa básica da avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos é o mapa de vulnerabilidade, onde são levados em consideração os mecanismos de recarga do aquífero e a capacidade de atenuação do solo, que variam amplamente devido à diversidade das condições geológicas do terreno (FOSTER et al., 2002).

Ao analisar a vulnerabilidade como instrumento importante para a gestão dos recursos hídricos em ambientes cársticos, Santos et al. (2010), verificou que a vulnerabilidade serve ainda como parâmetro para ações gerenciais que visem à gestão racional dos mananciais subterrâneos, bem como para a gestão, por parte dos órgãos públicos, com relação à implementação de políticas de controle e preservação.

Nessa perspectiva, os mapas temáticos de vulnerabilidade dos aquíferos podem ser utilizados pelo poder público de forma a ajudar no planejamento regional. Ao estudar a vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos de Araraquara em São Paulo Meaulo (2004) verificou que os mapas temáticos de vulnerabilidade são instrumentos preventivos e orientativos que auxiliam no planejamento do uso e ocupação do solo, na medida em que neles são definidas áreas de maior e/ou menor susceptibilidade à poluição pela atividade antrópica.

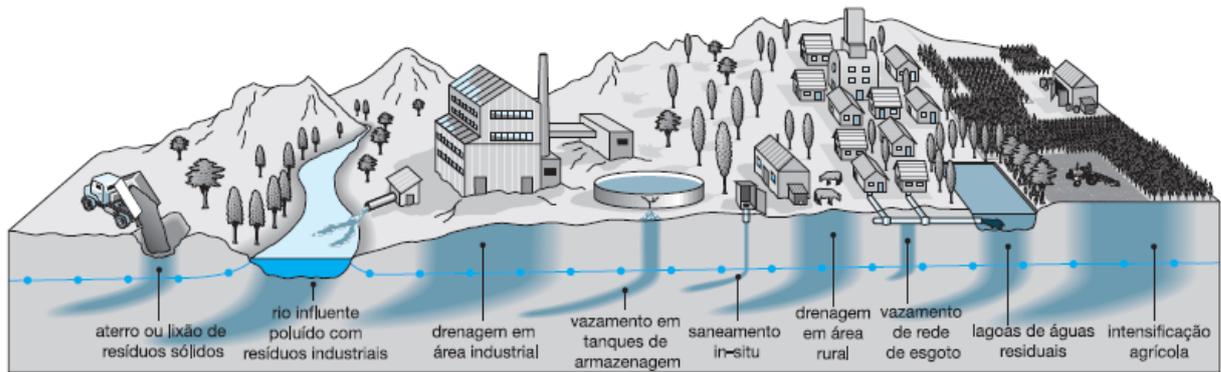
A representação da vulnerabilidade de aquíferos, em mapas de escala reduzida, não se dá de forma satisfatória, pois os parâmetros geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos exercem interferências no comportamento dos contaminantes. Para Paralta et al. (2005) torna-se necessário recorrer a índices que sintetizam a influência de um conjunto desses fatores que, direta ou indiretamente, contribuem para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos.

2.2 Identificação de Fontes Potenciais de Contaminação

As atividades antrópicas têm por características a inserção ou liberação de substâncias ou características físicas no meio ambiente capazes de modificar suas condições naturais. A identificação de áreas mais vulneráveis a contaminação, pode minimizar os possíveis impactos sobre a biota local e sobre o homem. O processo de urbanização das cidades e globalização da economia nos últimos anos tem propiciado a contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Com o crescimento populacional e a urbanização, atividades como, postos de combustíveis, conjuntos residenciais, poços tubulares abandonados, superexploração, ausência de saneamento básico nas cidades, áreas de despejo de lixo *in natura*, entre outros, contribuem para uma ampliação da poluição ambiental, promovendo potenciais focos de contaminação dos aquíferos. Para Foster et al. (2003) as atividades potencialmente geradoras de cargas contaminantes, estão relacionadas ao desenvolvimento urbano, à produção industrial, à produção agrícola e à extração mineral, conforme pode ser verificado na Figura 1.

Figura 1 – Processos comuns de poluição das águas subterrâneas.



Fonte: Foster et al. (2002).

Vale salientar que grande parte destas atividades está presente em cidades de pequeno, médio e grande porte, entretanto, seus malefícios independem das áreas ocupadas, mas dos tipos de contaminantes e das concentrações. Os autores Foster et al. (2003) afirmam que a intensidade da contaminação do aquífero normalmente não é resultado direto da dimensão da atividade potencialmente poluente na superfície do terreno; em muitos casos, atividades industriais menores (como oficinas mecânicas) podem causar um enorme impacto na qualidade da água subterrânea.

Sabe-se ainda que esses impactos dependem ainda das características litológicas, que facilitam a permeabilidade do componente, e da espessura ou distância a ser percorrida pelo contaminante até atingir o lençol freático. Para Santos (2010) o transporte de contaminantes através da zona não saturada (a porção do subsolo acima do nível da água), depende não somente da litologia das camadas geológicas de que essa é formada, mas das atividades dos usos do solo, e, principalmente dos fatores de recarga.

A cobertura do solo e o material da zona não saturada que recobrem os aquíferos servem como uma barreira primária à contaminação, sejam por bactérias, sedimentos ou outros contaminantes insolúveis. Além disso, plantas e microorganismos consomem algumas substâncias potencialmente poluentes dissolvidas em água, como os nitratos (PAVÃO, 2004).

Segundo Pavão (2004) os processos envolvidos na atenuação de contaminantes continuam, em um menor grau, em maiores profundidades especialmente quando a zona não saturada é constituída de sedimentos não consolidados. Segundo Trein (2008), sob certas condições hidrogeológicas, algumas unidades de tratamento de esgoto apresentam riscos de uma migração de bactérias e vírus patogênicos, mecanismo propenso a causar ou desenvolver doenças, para o interior dos aquíferos e fontes de água subterrânea, sendo responsáveis pela transmissão de agentes patogênicos e surtos de epidemia.

A água também serve como fator de diluição de organismos patogênicos e substâncias químicas nocivas nas camadas aquíferas. Sobre isto Pereira (2006) comenta que, a água é considerada um solvente universal, apresentando alta vulnerabilidade natural à contaminação, entretanto, possui alta capacidade de diluir grande quantidade de substâncias químicas encontradas na natureza.

As características físico-químicas e biológicas das águas subterrâneas podem sofrer variações a partir de ações naturais ou antrópicas no ambiente. Regiões constituídas geologicamente por arenitos e que recebem superficialmente atividades agrícolas intensas (uso excessivo de agrotóxicos) ou resíduos de áreas com déficit de saneamento básico, podem ampliar o risco de contaminação de suas águas.

Ao afirmar que a composição química das águas subterrâneas depende principalmente da composição inicial dos poros, do fluxo de água de subsuperfície que substitui a água dos poros, da composição e das propriedades físicas do solo e rocha e da interação química entre rocha, água e poros além de seus processos microbiológicos (dissolução de hospedeiro) Zaporozec (2002), alerta sobre a importância das camadas do solo como importante atenuador de mecanismos patogênicos.

O solo também é visto por Fabianovicze Silva Junior (2007) como um fator importante na degradação de contaminantes, entretanto, ressaltam que, a presença de contaminantes no solo, acima de determinados níveis, pode causar danos ou a perda de algumas ou várias de suas funções acarretando consequências negativas para a cadeia alimentar, para a saúde humana e para todos os tipos de ecossistemas.

Após a implantação destes potenciais focos de contaminação, uma necessidade que surge é a de identificação e mapeamento desses pontos, para um acompanhamento e monitoramento da qualidade das águas subterrâneas.

O cadastro das fontes potencialmente poluentes é realizado através de identificação, localização e caracterização sistemática de todas as fontes. Essas fontes podem ser definidas como Difusas (Áreas Residenciais Urbanas sem Rede de Esgoto e Cultivo Agrícola do Solo) e Pontuais (Atividades Industriais, Lagoas de Efluentes, Despejo de Resíduos Sólidos, Postos de Gasolina, Atividades de Mineração e Exploração de Petróleo e Gás, Contaminação de Cursos de Água Superficiais, Solo Contaminado, Vias de Transporte e Cemitérios) (FOSTER et al., 2003).

A identificação e o georreferenciamento de fontes potenciais de contaminação (atividades antrópicas) na RMM têm a finalidade de contribuir para a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos da região de estudo, além de auxiliar na construção do banco de

dados (ASUB, 2011), subsidiando estudos futuros e órgãos gestores locais (recursos hídricos e uso e ocupação do solo) com informações detalhadas e atuais, visando atender à legislação de planejamento e controle de instalação de futuros empreendimentos, conforme o Plano Diretor de Maceió (2005), que é o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana, disposto na lei municipal nº 5486/2005.

Na área de estudo podem ser identificadas algumas fontes potenciais de contaminação como áreas agrícolas, cemitérios, lixão e aterro sanitário, estes quando construídos corretamente e bem operados não deveriam causar problemas. De acordo com Ferreira Neto et al. (2000) os principais riscos de contaminação das águas subterrâneas na RMM são a construção e desativação de poços sem a adoção de medidas de proteção sanitária, os sistemas de esgotamento sanitário, as indústrias que geram efluentes líquidos, os postos de combustíveis e, principalmente, as lagoas que constituem o sistema de drenagem, escavadas para atenuar as cheias da região, mas que também são utilizadas como receptoras de efluentes industriais e de esgotos domiciliares. Sobre esse tema, na área de estudo, Santos et al. (2004, p, 261) dizem que:

“A falta de saneamento na área de estudo faz de todas estas atividades, potenciais focos de contaminação do lençol aquífero, visto que o esgotamento sanitário dos conjuntos residenciais, assim como a destinação de efluentes industriais, são feitos através de fossas e sumidouros, o que pode comprometer, pela infiltração, as reservas de águas subterrâneas. Também foi observada a existência de vários postos de combustíveis, assim como da lagoa de maturação e evaporação dos efluentes do Hospital Universitário” (SANTOS et al., p. 261).

Sobre as possíveis ações antrópicas contaminantes Nobre, M.e Nobre, R. (2000) apresentam algumas atividades presentes na área de estudo.

Vale salientar, ainda, que as atividades sucro-alcooleiras desenvolvidas na região, a existência de lixões e de tanques enterrados dos postos de gasolina bem como a falta de saneamento básico adequado na cidade constituem-se em elementos potenciais de contaminação do sistema Barreiras/Marituba. A possibilidade de compostos orgânicos derivados do petróleo (BTEX) ou compostos como bifenilas policloradas (i.e., ascarel) atingirem os aquíferos mais superficiais, por exemplo, é uma realidade e isto pode ocorrer em pouco tempo após a infiltração no solo (NOBRE, M; NOBRE, R, 2000).

A respeito das atividades potencialmente poluidoras de uma região, estas estão descritas no Quadro 1, juntamente com os principais contaminantes lançados no meio ambiente subterrâneo. Vale salientar que estes empreendimentos encontram-se presentes na área de estudo, sendo a atividade mineradora a única não mapeada nesse estudo.

Quadro1 - Diversos usos do solo com suas fontes de contaminação.

<i>Fontes Potenciais Poluidoras</i>	<i>Principais Fontes de Contaminação</i>	<i>Principais Contaminantes</i>
Residência Urbana	Fossas sépticas, jardinagem, efluentes domésticos a céu aberto, aterros domésticos e hospitalares e drenos de rodovias.	Vírus, coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> , bactérias, fármacos, fertilizantes, nitrato, DBO, cloreto.
Disposição de Resíduos	Aterros industriais, controlados domésticos e hospitalares, áreas de bota – fora (Vazadouros), áreas industriais abandonadas.	Metais pesados, solventes clorados, hidrocarbonetos aromáticos, sais inorgânicos e orgânicos, nitratos, fármacos.
Comercial	Lavagem de veículos, posto de gasolina, cerâmicas, ferro velho, comércio de produtos fitossanitários, linha férrea, estrada de rodagem.	BTEX, metais pesados fármacos, patógenos, cloreto, compostos orgânicos.
Indústria	Curtume, oficinas mecânicas, fundição / usinagem / esquadrias, extração mineral, indústrias químicas e petroquímicas, indústria petrolífera / efluentes industriais, bacias de detenção, oleodutos e gasodutos, materiais em suspensão.	Metais pesados, sais inorgânicos e orgânicos, hidrocarbonetos aromáticos, HAP, solventes organoclorados, compostos organonitrogenados
Atividades Agrícolas	Disposição inadequada de Resíduos sólidos, materiais em suspensão, vazamento de tubulações e tanques, uso indiscriminado de defensivos agrícolas, irrigação utilizando águas residuais, lagoas de efluentes com lançamento em superfície, plantações de abacaxi, algodão, arroz, cana-de-açúcar, coco, feijão, fumo, mandioca, milho e etc..	Contaminação por agrotóxicos praguicidas e inseticidas sintéticos (organofosforados e carbamatos), série nitrogenada, metais, ácido, fluoreto, pentóxido de vanádio, fosfogesso e borra de enxofre, além de potássio.
Atividade Cemiterial	Áreas de desova, cemitérios convencionais públicos e privados.	Necrochorume - rico em água, sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis, incluindo duas diaminas, que são muito tóxicas, a cadaverina e a putrescina, além de vírus e bactérias.
Mineração	Desmonte hidráulico, descarga de água de drenagem, lixiviação e assoreamento, perda da qualidade da água, mudanças no seu curso natural, aprofundando o leito central, criando braços mortos, alargando suas margens e baixando rapidamente o nível da lâmina d'água, além da perda da biota local.	Ferro, manganês, titânio, turbidez provocada pelos sedimentos finos em suspensão, além das substâncias lixiviadas dos equipamentos de extração mineral como óleos, graxa e metais pesados.
Regiões Costeiras	Oceanos e mares (processo de intrusão salina), além de áreas com dissolução de solos e rochas com essas características.	Cloretos

Fonte: Adaptado de Santos e Oliveira 2007; e Santos (2010).

Sobre os principais contaminantes encontrados nas diversas atividades antrópicas descritas no Quadro 1, discutiremos a seguir alguns de seus aspectos.

A superexploração, realizada através de poços perfurados nos aquíferos, tem promovido grandes impactos ambientais que vem sendo diagnosticados pela salinização e pela redução da disponibilidade de água, (SILVA; GOMES, 2007). Sobre essa forma contaminação Trein (2008) afirma que áreas costeiras, que possuem excelentes sistemas aquíferos relacionados aos depósitos arenosos de origem praial e retrabalhamento eólico, contém um sério risco de contaminação de suas águas devido à possibilidade de avanço da cunha salina, possivelmente retratado nos mapas de contorno potenciométrico e de condutividade elétrica, que poderá ser ocasionado pela sobre-exploração do aquífero.

Para Bós (2008) a grande retirada de água dos aquíferos litorâneos, que aumenta a velocidade do fluxo subterrâneo em direção às áreas onde está havendo a retirada de água, poderá levar à ruptura do frágil equilíbrio existente entre água doce e salgada, produzindo a intrusão salina. A depender da permeabilidade do solo, a difusão da poluição e o avanço da mancha poluidora poderão ser acelerados.

Nas regiões costeiras, através da chamada intrusão salina, oriunda da superexploração em aquíferos costeiros, são encontradas águas com níveis de cloreto altos. O cloreto é um sal solúvel e sua presença nas águas subterrâneas, segundo Rocha (2005), decorre da água marinha armazenada no interior dos sedimentos, da dissolução do sal comum e dos minerais afins que existem nos evaporitos, dos cloretos existentes na água de chuva, da mistura com águas marinhas em regiões costeiras do mundo e resíduos industriais. Segundo Pulido (1978) apud Rocha (2005), de forma geral, as concentrações de cloretos das águas subterrâneas são inferiores a 100,0 mg/L.

Como a região em estudo encontra-se às margens do Oceano Atlântico e trata-se de uma área de intensa urbanização com elevada exploração das águas subterrâneas, que facilita a penetração das águas salinas no aquífero, torna-se comum encontrar elevados índices de cloreto. Como pode ser comprovado nas análises de Cavalcante (2004), que verificou elevados teores de cloretos na área de estudo, atingindo valores de até 2.000 ppm em 5 dos 6 poços mais antigos da bateria de poços de Bebedouro, e acima de 1.200 ppm no poço BRE 04 na bateria do Baixo Reginaldo, superando o limite de 250 ppm permitido pela Portaria 2.914/11, do MS.

Em seu estudo Rocha (2005) achou valores médios de íon cloreto nas águas subterrâneas do aquífero Barreiras de 41,7 mg/L entre 1975-2002 e 80,1 mg/L entre 2003-2004, enquanto que o sistema Marituba apresentou concentrações variando entre 206,3 mg/L

(1975-2002) e 102,5 mg/L (2003-2004). A concentração de cloreto aumentou em função da profundidade, evidenciando uma possível influência da intrusão marinha.

Outra forma de poluição das águas subterrâneas são os cemitérios. Estes normalmente encontram-se afastados das áreas urbanas, em cidades de pequeno porte, entretanto, em cidades mais urbanizadas esse traçado não é respeitado. Os cemitérios são fontes potenciais de impactos ambientais, principalmente quanto ao risco de contaminação das águas subterrâneas e superficiais por bactérias e vírus que proliferam durante os processos de decomposição dos corpos, além das substâncias químicas liberadas (BRASIL, 2007). Sobre a implantação de cemitérios em áreas passíveis de contaminação Silva e Malagutti Filho (2008) afirmam que:

A implantação de cemitérios em áreas que apresentem condições geológicas - materiais geológicos que propiciem fenômenos conservativos dos cadáveres ou materiais que propiciem menor retenção do contaminante em sua camada superficial, e hidrogeológicas - baixa profundidade do nível do lençol freático, podem levar a uma alteração nas características físico-química e bacteriológica destas águas, contaminando-as (SILVA e MALAGUTTI FILHO, 2008).

Sobre os microorganismos patogênicos, do qual os vírus e bactérias fazem parte, são encontrados com relativa frequência nas águas subterrâneas. Embora inofensivas ao homem, às bactérias coliformes são usadas para determinar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, através do padrão de contagem (HIRATA, 2000). Sua abundância no ambiente se dá através de fezes de animais, sendo seu tempo de sobrevivência em aquíferos de uma semana, enquanto que outros vírus patogênicos passam mais de 200 dias (HIRATA, 2000).

Ao medir os índices de qualidade bacteriológica da água nos cemitérios da parte baixa da cidade de Maceió Silva et al. (2010) verificaram concentrações de Coliformes Totais acima do exigido pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, que é ausência em 100 mL, sendo consideradas não satisfatórias as condições higiênicas e sanitárias das águas estudadas.

Fazzio et al. (2010A) estudando a qualidade das águas subterrâneas em 17 pontos da área urbana de Maceió, inclusive 3 cemitérios, no período de janeiro a setembro de 2009, encontraram *Escherichia coli* e Coliformes totais em 42,35% e 57% das amostras analisadas respectivamente, estando em condições higiênicas e sanitárias insatisfatórias para consumo humano. Nos pontos com atividade cemiterial foram detectados também *Clostridium perfringens*, em concentrações que variaram entre 40 e 500 (NMP/100 mL). Essa é uma bactéria anaeróbica, formadora de toxinas no organismo como, desordem intestinal caracterizada por início súbito de cólica abdominal, acompanhada de diarreia e náuseas (SÃO PAULO, 2002).

As indústrias de tintas e os postos de combustíveis, também são considerados potenciais focos de contaminação, já que, lidam com hidrocarbonetos aromáticos do grupo BTEX, e estes quando estão em processo de vazamento contribuem para a contaminação do lençol freático, compostos orgânicos, solventes organoclorados, dentre outros.

Para Fetter (1993) apud Rebouças (2006) os compostos orgânicos do grupo BTEX (benzeno “mais tóxico”, tolueno, etilbenzeno e xileno) afetam a saúde pública em teores muito baixos, isto é, da ordem de partes por bilhão (ppb) até partes por trilhão (ppt), com efeitos tóxicos, mutagênicos ou carcinogênicos, além de afetar o sistema nervoso central, chegando a causar leucemia.

Os compostos BTEX atingem o lençol freático rapidamente, por possuir maior solubilidade em água. Dessa forma, a Portaria 2.914/11, do Ministério da Saúde, estabelece limites permissíveis para esses hidrocarbonetos em água potável: 5 µg/L no caso do benzeno, 170 µg/L para o tolueno, 200 µg/L para o etilbenzeno e 300 µg/L para o xileno. Para Tucci (2003) os vazamentos de postos de combustíveis contribuem com hidrocarbonetos em geral e com os chamados BTEX contribuem intensamente para a contaminação das águas subterrâneas nos centros urbanos brasileiros.

Sobre a disposição inadequada de resíduos oriundos das atividades agrícolas, e sua contaminação das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano, Veiga et al. (2006) afirmam que o valor máximo de concentração para qualquer tipo de agrotóxico, estabelecido pela União Européia, é o valor de 0,1µg/L, independente de sua toxicidade.

O potássio é um dos principais poluentes provenientes da agricultura, temos ainda a borra de enxofre, alguns ácido, metais, pentóxido de vanádio, fosfogesso, dentre outros. A concentração normal de potássio em águas subterrâneas doce, é inferior a 10,0 mg/L, sendo mais frequentes valores entre 1 e 5 mg/L (LEMOS e MEDEIROS, 2006).

Ao analisar dados de concentração de potássio em Londrina no Paraná, em dois períodos distintos (1975-2002 e 2003-2004), Santos (2005), verificou pequenas variações quanto à concentração, 6,7 mg/L e 5,0 mg/L, respectivamente, estando em conformidade quanto às águas doces.

Cavalcante (2002a) achou teores de até 154 mg/L de potássio nas águas de um poço, localizado na região de plantio da cana-de-açúcar, devido ao uso da vinhaça na fertirrigação, além de teores de nitratos, acima de 40 ppm, em áreas não saneadas de Maceió, que utilizam sistema de esgotamento sanitário através de fossas sépticas e poços absorventes.

A respeito da contaminação das águas subterrâneas por nitrato, Barbosa (2005) apud Lima (2011), afirma que este contaminante representa o estágio final da oxidação da matéria

orgânica e teores acima de 3 mg/L podem ser indicativos de contaminação por atividade humana como esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados e resíduos de animais, etc.

Na verdade, a toxidez do nitrato (NO_3^-) em seres humanos é baixa, entretanto quando ingerido é convertido a nitrito (NO_2^-), que entra na corrente sanguínea, oxida o ferro da hemoglobina, produzindo a metahemoglobina, responsável pela doença denominada metahemoglobinemia ou síndrome do bebê azul.

Nas águas subterrâneas, os nitratos ocorrem geralmente em teores abaixo de 6 mg/L, sendo que valores acima deste limite indicam poluição como resultado da penetração direta da água de superfície ou infiltração de água poluída no aquífero originado de atividades humanas (MONTEIRO et al., 2003). De acordo com a Portaria nº 1469/2000 do Ministério da Saúde, uma água não deve ter mais que 10 mg/L de nitrato (em N).

A presença dessas atividades antrópicas como despejo inadequado de lixo e/ou não tratamento de águas residuárias são alguns dos responsáveis pela contaminação das águas subterrâneas por nitrato. Dessa forma, Conejo et al. (2007), ao estudarem o impacto do lançamento de esgotos sobre a qualidade das águas subterrâneas, detectaram elevadas concentrações de nitrato e o surgimento de bactérias patogênicas e vírus. O contaminante de maior ocorrência nos aquíferos são os nitratos, por ter suas principais fontes nos sistemas de saneamento *in situ* (fossas sépticas/sumidouros) e nos fertilizantes agrícolas. A grande preocupação ambiental associada ao nitrato é sua grande mobilidade e persistência em condições aeróbias (HIRATA, 2000).

Segundo Lima (2011), foi observado no bairro do Farol um elevado percentual de amostras com nitrato acima de 3,0 mg/L de NO_3^- , sendo este, o produto final da estabilização aeróbia do nitrogênio orgânico, indicando contaminação antiga. Tomando como valor máximo permitido 10,0 mg/L de NO_3^- , estabelecidos pela Portaria 2.914/11, do MS, e reforçado pela Resolução CONAMA no 396/08, pode-se concluir que os valores obtidos nas análises físico-químicas são considerados toleráveis, classificando as águas subterrâneas desse sistema aquífero como potáveis e na classe 1, quanto ao parâmetro avaliado.

Silva et al. (2009) em análises das águas subterrâneas encontraram nos bairros de Jaraguá e Trapiche uma média de 21,06 mg/L estando acima do que preconiza a Portaria 2.914/11, do MS e a Resolução CONAMA nº 396 /2008 com o Valor Máximo Permitido (VMP) de 10 mg/L para o consumo humano, servindo apenas para a dessedentação de animais.

Para Silva et al. (2010) que analisaram o grau de contaminação das águas subterrâneas em áreas cemiteriais dos bairros do Trapiche da Barra e Jaraguá encontraram valores de cor, turbidez e nitrato acima do que preconiza a Portaria 2.914/11, do Ministério da Saúde. Apenas em raras exceções o parâmetro nitrato estava conforme os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 396 /2008, permitindo o uso da água para dessedentação de animais e recreação. Os resultados encontrados são indicativos de contaminação que pode ser por necrochorume ou a falta de saneamento básico nos locais estudados.

Fazzio et al. (2010b) encontraram em cerca de 60% das análises de nitrato realizada, valores acima do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 2.914/11, do MS, e obtiveram uma média de 17,89 mg/L de NO_3^- . A presença elevada de nitrato na RMM pode estar associada à influência de esgotos e fossas sépticas, além da possível contaminação por necrochorume nos pontos onde ocorre atividade cemiterial.

2.3 Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos

Existem diversos métodos de determinação da vulnerabilidade de aquíferos, dentre as técnicas mais difundidas, destacam-se mundialmente os métodos DRASTIC (ALLER et al., 1987) e o GOD (FOSTER 1987). Entretanto, tem-se ainda os métodos SINTACS, elaborado por CIVITA et al. (1994), o AVI (Aquifer Vulnerability Índice) proposto por Van Stempvoort et al. (1993), EPPNA (Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água) elaborado por Artuso et al. (2004), o Métodos IS (Índice de Susceptibilidade) concebido por Francés *et al.* (2001), dentre outros.

A seleção do método a ser aplicado para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, depende de vários fatores, sobre isto, Auge (2004) enumera algumas condições:

- ❖ Conhecimento e difusão da metodologia: há países em que alguns métodos são mais difundidos.
- ❖ Disponibilidade de Informação: cada método exige uma quantidade específica de parâmetros e dados para funcionar.
- ❖ Validação dos Resultados: pode ser verificado através da qualidade da água subterrânea, estando então associada a uma carga poluidora, podendo ser gerado um mapa de risco.

As características dos diversos métodos variam, principalmente, com a finalidade da análise a ser indagada e o número de parâmetros a ser trabalhado. Neste trabalho, serão abordados três métodos de vulnerabilidade distintos, buscando observar uma possível homogeneidade das respostas, o grau de dificuldade de obtenção dos parâmetros. Além disso,

averiguar o grau de distorção das respostas, a partir da quantidade e da diversidade dos parâmetros analisados.

Sobre as diferentes concepções de definição de vulnerabilidade de aquíferos, podem existir três categorias de análises diferentes: 1) métodos empíricos de indexação ou superposição; 2) métodos determinísticos que empregam modelos de simulação baseados em processos físicos e 3) métodos estatísticos (SANTOS, 2010).

Há diversos métodos analíticos sendo desenvolvidos para determinação da vulnerabilidade em aquíferos, a partir da avaliação e integração de diferentes atributos litológicos e hidrogeológicos, que relaciona a capacidade de atenuação da zona vadosa (SANTOS et al., 2010).

Esses métodos empíricos de superposição ou indexação baseiam-se nas condições do solo e condições geológicas e hidrogeológicas da área (ARTUSO et al., 2004). Portanto, classificam cada característica do aquífero conforme as faixas de valores previamente estabelecidas (índices), sendo distribuídos espacialmente. Após a classificação individual de cada parâmetro, esses são sobrepostos com o intuito de gerar um mapa de vulnerabilidade geral.

Para Gogu e Dassargues (2000) cada parâmetro dos métodos indexadores possui um intervalo relativo à sua propriedade subdividido em intervalos discretos e hierarquizados com valores específicos que refletem o seu grau de sensibilidade à poluição. Cunha (2009) afirma que a quantidade de parâmetros hidrogeológicos utilizados e a determinação do grau de sensibilidade de cada um é uma escolha subjetiva, mas influenciada pelo conceito de vulnerabilidade adotado.

Sobre os objetivos dos métodos indexadores, Cunha (2009, p. 91) afirma que, estes objetivam incorporar a distribuição espacial dos parâmetros hidrogeológicos que tendem a qualificar e/ou quantificar a vulnerabilidade natural dos aquíferos. Esses métodos caracterizam cada parâmetro, conferindo-lhe um índice, onde os valores mais baixos caracterizam menores vulnerabilidades. Em seguida são atribuídos pesos aos parâmetros e realizada nova reclassificação aos produtos obtidos podendo gerar assim mapas temáticos de vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação.

Quando há a interação dessas categorias juntamente com sistema de informação geográfica, os mapas de vulnerabilidade de aquíferos gerados são mais completos, dando maior auxílio à tomada de decisão sobre o gerenciamento e ocupação do espaço.

Os métodos DRASTIC, SINTACS e GOD avaliam a vulnerabilidade do aquífero, dividindo-o em células ou polígonos, calculando um índice de vulnerabilidade de um sistema

de classificação ponderada, Descovi Filho (2009, p. 13). De modo geral, esses métodos definem intervalos para cada parâmetro atribuindo pesos de acordo com a significância de cada parâmetro. Fazendo a soma ponderada dos intervalos e multiplicando os índices entre si, a integração dos dados produzirá uma matriz de vulnerabilidade baseado nas classes de vulnerabilidade natural do aquífero. Portanto, quanto maior forem os índices, maior será a sensibilidade do aquífero à contaminação.

Sobre a utilização de índices de vulnerabilidade (LEITÃO et al., 2003), afirmam que tem a vantagem de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação.

Os métodos de determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos geralmente têm como produto a geração de mapas que indicam as áreas de maior fragilidade a um poluente. Estes, por sua vez, têm que ser interpretados com cautela, já que não existe uma vulnerabilidade geral e os poluentes são difusos. Os parâmetros individualmente classificados são sobrepostos para compor o mapa geral de vulnerabilidade (TAVARES et al., 2009).

Para Nobre et al. (2004) os métodos de avaliação de vulnerabilidade, na verdade, buscam simular processos ambientais próximos da realidade.

Sobre os métodos de avaliação de vulnerabilidade Santos (2005) afirma que, alguns desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem, em princípio, de eliminar ou minimizar as subjetividades inerentes aos processos de avaliação.

Dentre as metodologias empregadas no estudo do gerenciamento dos recursos hídricos, a determinação de índices de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos é atualmente utilizada como subsídio às propostas de proteção das águas subterrâneas, associadas a iniciativas de planejamento e ordenamento do território e de gestão dos recursos hídricos (CHAVES et al., 2007).

A seguir são apresentados vários estudos realizados em diversas regiões do Brasil e do mundo utilizando esses métodos:

➤ O método GOD de vulnerabilidade foi aplicado por: Meaulo (2004) em Araraquara São Paulo; Pavão (2004) na bacia hidrográfica do rio Santa Maria – RS; Coridola et al. (2005) no município de Campos de Goytacazes no Rio de Janeiro; Pereira (2006) no reservatório de Batatã em São Luís do Maranhão; Tavares et al. (2009) na Bacia Sedimentar do Araripe no Ceará; Escada (2009) do Município de Cajamar (SP); Russo (2009), ao estimar a vulnerabilidade natural nas bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá em São Paulo. Para

todos estes estudos o método GOD se apresentou de maneira satisfatória, já que as respostas das análises encontram-se dentro do modelo proposto.

➤ Saidi et al. (2010) mapearam a vulnerabilidade e o risco de contaminação do aquífero Jelma Hajeb na Tunísia usando o método DRASTIC. Santos (2010) usando o mesmo método, verificou a vulnerabilidade no aquífero Marizal, na região de influência do Pólo Industrial de Camaçari. Além destes tiveram: Santos (2005) mapeando o município de Londrina no Paraná; Camponogara (2006) verificando a vulnerabilidade natural no sistema aquífero Guarani; Antonakos e Lambrakis (2007) estudaram a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação por nitrato em Korinthia na Grécia; Lima (2007) mapeando o estado de Minas Gerais; Nascimento et al. (2009) determinaram a vulnerabilidade do aquífero freático do alto cristalino de Salvador na Bahia; e Meneses et al. (2009) examinaram a vulnerabilidade dos aquíferos superiores no município de João Pessoa – PB. Todos obtendo índices de vulnerabilidade conforme metodologia proposta.

➤ Alguns autores compararam os métodos DRASTIC e GOD buscando validar suas respostas além de verificar o mais apto para a região de estudo. Mendoza e Barmen (2006) utilizaram estes índices na Bacia do Rio Artiguas em Nicarágua, América Central. O método DRASTIC foi modificado para incluir o grau de influência que as estruturas geológicas oferecem à vulnerabilidade, tornando-o mais eficiente. Martínez-Bastida, Arauzo e Valladolid (2010) avaliaram a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas em Madri na Espanha. Os mapas gerados apresentaram similaridades, entretanto, devido a menor quantidade de parâmetros (3) o índice GOD, apresentou respostas satisfatórias dentro do método proposto. Cardozo (2010) aplicando esses métodos avaliaram a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição da bacia hidrográfica do rio Cabril em Vila Real – Portugal.

➤ Hamza et al. (2010) aplicaram através de técnicas de geoprocessamento, os métodos DRASTIC e SI como forma de validação, para verificar a poluição agrícola difusa em dois aquíferos freáticos na região semi-árida do Nordeste da Tunísia

➤ Cunha (2009) determinou a vulnerabilidade intrínseca à poluição no Porto de Pecém no Ceará através dos métodos GOD, que superestimou as classes de vulnerabilidade Alta e Extrema, DRASTIC e SINTACS que não foram eficazes para delimitar áreas com diferentes graus de vulnerabilidade sem sofrer influências excessivas de algum parâmetro hidrogeológico.

➤ Bós (2008) elaborou mapas de vulnerabilidade a partir dos métodos EPPNA, DRASTIC, GOD, SINTACS, AVI e SI para o município de Sananduva (RS), sendo os três

primeiros bem representativos e Lobo Ferreira e Oliveira (2004) aplicaram esses métodos em Portugal obtendo valores inadequados com o método AVI.

- Nobre (2006) Aplicou o DRASTIC modificado à Região Metropolitana de Maceió, ofereceu uma resposta qualitativa e quantitativa para o índice de vulnerabilidade específica, variando de 0 a 100, onde quanto maior o índice mais vulnerável e susceptível à poluição, mostrando-se eficaz quanto a sua proposta e objetivos. A junção dos parâmetros solo e meio insaturado na região fez com que não pudesse se aplicar o método DRASTIC original. O modelo foi validado através de índices de qualidade da água (dados analíticos de cloretos e nitratos) e do mapa de risco de contaminação.
- Rivetti (2010) aplicou o método GOD na Região Metropolitana de Maceió, adquirindo respostas dentro do padrão do modelo, ou seja, obteve índices de vulnerabilidade que variaram de 0,1 (desprezível) a 0,6 (Alta). Este estudo foi baseado nos relatórios da Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL) sobre as características dos aquíferos de Maceió onde ela capita água para população.

Apesar de existirem diversos métodos de determinação da vulnerabilidade de aquíferos, apenas o método GOD tem sido aplicado com frequência na área de estudo. Este método é considerado mais simples, já que possui apenas três parâmetros a serem identificados e atribuídos índices.

A tese desenvolvida por Nobre (2006) foi o único trabalho na RMM que aplicou outra metodologia diferente do método GOD. Este trabalho condensou o mapa de solos (S) com o mapa do meio insaturado (I) ambos da metodologia DRASTIC, reduzindo assim de 7 para 6 os parâmetros analisados, sendo denominado DRASTIC Modificado.

2.3.1 Índice DRASTIC

O DRASTIC é um dos métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos consagrados mundialmente, sendo desenvolvida pela *National Ground Water Association*, (ALLER et. al.1987), e empregada pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (USEPA), se constituindo num modelo qualitativo para avaliar a poluição potencial das águas subterrâneas.

O modelo DRASTIC constitui um sistema padronizado de avaliação das classes de vulnerabilidade natural do tipo de aquíferos (confinado/não confinado) a partir de dados decodificados em planos de informações, como características litológicas e texturais das camadas sobrejacentes ao aquífero, à profundidade da água em relação à superfície e o impacto da zona não-saturada (AUZANI, 2010).

O modelo desenvolvido foi guiado pelas seguintes características:

- o DRASTIC não avalia áreas menores que 0,4 km².
- o contaminante é introduzido à superfície do terreno;
- o contaminante tem a mobilidade da água;
- o contaminante migra verticalmente até o aquífero por infiltração de águas meteóricas;

A metodologia DRASTIC foi criada visando identificar áreas mais susceptíveis à contaminação, ou seja, com o intuito de auxiliar investidores que pretendem expandir seus negócios em determinadas áreas que ainda não possuem informações hidrogeológicas e dar suporte aos estudos para descartes adequados de resíduos. Este método serve ainda para, identificar áreas de proteção e exploração da água subterrânea, detectar áreas onde sejam necessárias medidas rigorosas para a substituição do tanque de armazenamento de produtos perigosos em contato com as águas subterrâneas e ainda como ferramenta para criação de um zoneamento hidrogeológico.

A vulnerabilidade natural do aquífero é obtida a partir de dados decodificados em planos de informações (PI's) distribuídos em sete parâmetros, com a atribuição de índices numéricos conforme sua magnitude e classe. Os parâmetros fazem referência a seu nome em inglês sendo descritos a seguir:

Depth to groundwater – Profundidade da zona não saturada do solo ou do nível freático (m);

Recharge net – Recarga líquida do aquífero devido à precipitação (mm/ano);

Aquifer media – Material ou meio poroso do aquífero - composição litológica (m);

Soil media – Tipo de solo ou a porção superficial do solo;

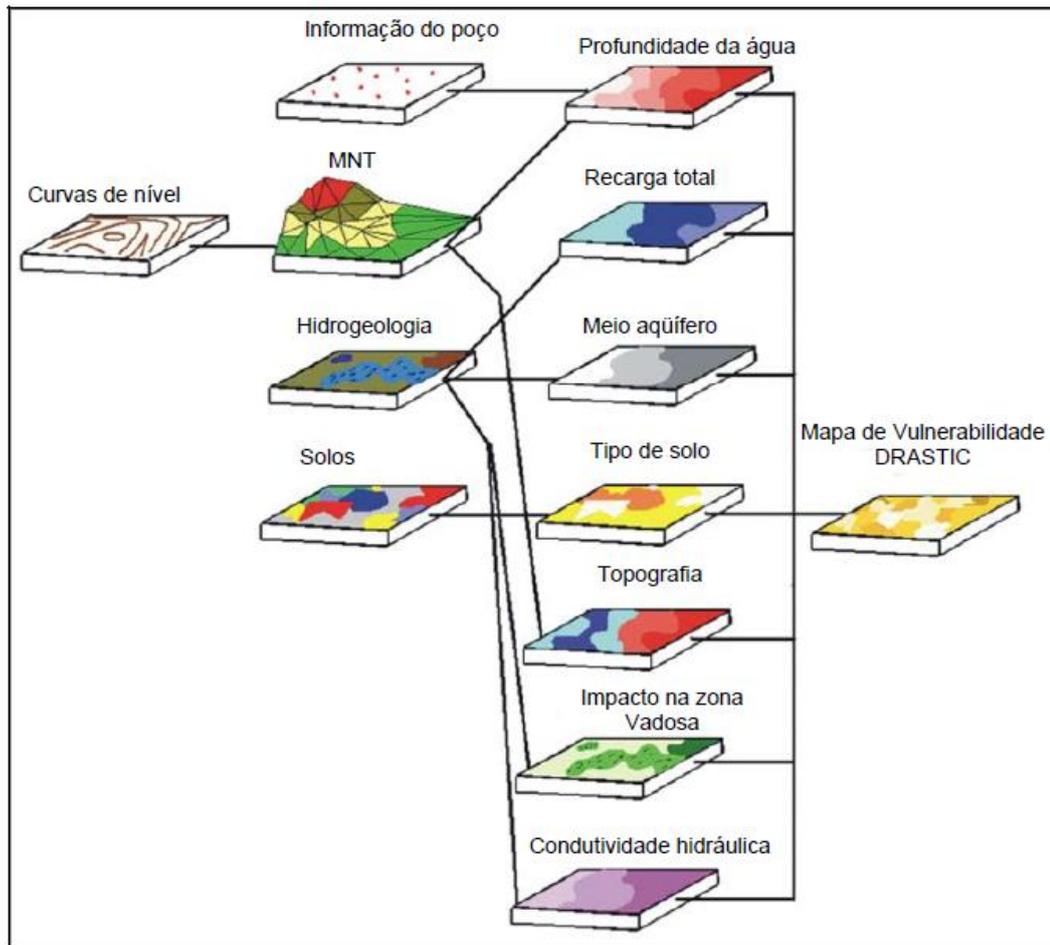
Topography – Topografia ou declividade do terreno;

Impacto of vadose zone – Impacto ou influência na zona não saturada;

Conductivity hydraulic – condutividade hidráulica do aquífero, em (cm/s).

A seguir (Figura 2) é descrito um esquema conceitual do método DRASTIC de avaliação.

Figura 2–Esquema de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos (DRASTIC).



Fonte: Adaptado de Aller et al.(1987) por Camponogara (2006).

Nobre (2006) afirma que o modelo DRASTIC é rígido na atribuição de pesos e notas aos atributos do modelo. Cada parâmetro deste método possui faixas de valores que reflete um potencial de poluição, ou seja, a cada uma dessas faixas é atribuído um índice que varia entre 1 e 10, cujo valor se relaciona diretamente com o potencial de poluição do meio.

Dessa forma, o Índice de Vulnerabilidade DRASTIC é obtido pela soma ponderada do índice de cada parâmetro por um peso que varia entre 1 e 5. A variação do índice fica entre 23 e 226 e quanto maior o valor maior será a vulnerabilidade. As classes definidas para esse método são (tabela 1):

TABELA 1 – Classes de vulnerabilidade da metodologia DRASTIC.

Classes	Intervalos
Vulnerabilidade Reduzida	<120
Vulnerabilidade Média	120 - 160
Vulnerabilidade Elevada	160 - 199
Vulnerabilidade Muito Elevada	>199

Fonte: Aller et al. (1987).

O método DRASTIC avalia a vulnerabilidade do aquífero, dividindo-o em células ou polígonos, onde será calculado o índice de vulnerabilidade, recebendo as classes supracitadas.

Este método recebe críticas devido à quantidade de variáveis utilizadas, a dependência de algumas delas e as ponderações que ele executa podem ser questionáveis (Descovi Filho, 2009). Além disso, o método não se aplica a situações em que o poluente está introduzido à profundidade no aquífero, como em vazamentos de tanques enterrados ou poços de injeção.

Para Bós (2008) outra limitação do método DRASTIC na determinação da vulnerabilidade aquífera é a não consideração de outros tipos de contaminantes e/ou atividades antrópicas presentes na área de estudo.

É importante salientar que para adquirir alguns desses fatores necessita de muita pesquisa de campo e que qualquer suplementação aos dados analisados demandaria mais tempo e custo, como é o caso da condutividade hidráulica, que é obtida através de teste de bombeamento em poços ou ensaios de infiltração (CAMPONOGARA, 2006).

Para Santos (2005) a aplicação do método DRASTIC só é possível se forem atendidas as recomendações a seguir, e que a ausência de dados implicará na falta de avaliação de vulnerabilidade:

- ✓ obter uma representação detalhada da área em escala apropriada;
- ✓ analisar as informações disponíveis para caracterizar hidrogeologicamente o meio;
- ✓ atribuir valores aos parâmetros, utilizando informações existentes, geológicas e hidrogeológicas, bases de dados e eventuais poços presentes no aquífero;
- ✓ fazer um reconhecimento de campo.

2.3.2 Índice GOD

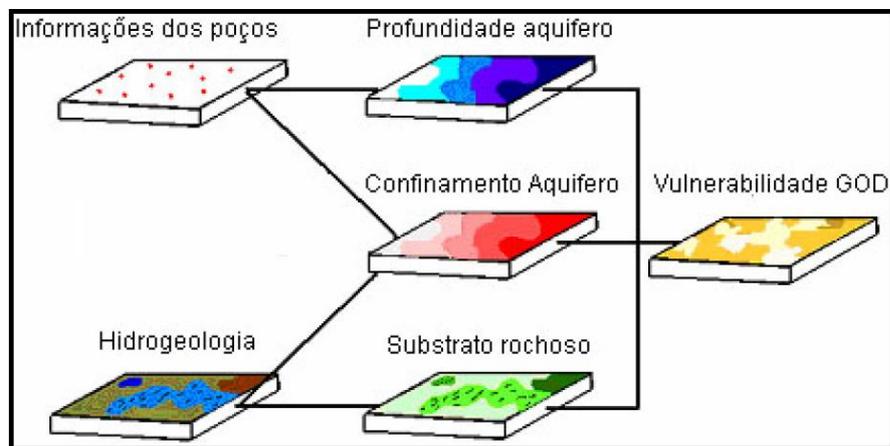
O método de avaliação de vulnerabilidade GOD que significa *Groundwater hydraulic confinement* (grau de confinamento hidráulico – Confinado, Semi-Confinado e Livre), *Overlaying Strata* (ocorrência das características do substrato litológico - grau de consolidação da zona não saturada), e *Depth to groundwater table* (distância do nível da água ou teto do aquífero - profundidade do nível d'água subterrânea), criado por Foster (1987) e adaptado por Foster e Hirata (1988) corresponde a uma das técnicas de determinação de vulnerabilidade mais utilizadas devido a sua simplicidade de conceitos e implementação, uma vez que utiliza dados básicos de estudos hidrogeológicos, como o grau de inacessibilidade hidráulica da zona saturada e a capacidade de atenuação da zona não saturada.

Para Pavão (2004) o método GOD além de avaliar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, orienta sobre comportamento de contaminantes em subsuperfície, sendo

bastante utilizado na América Latina e Caribe na década de 1990, por sua clareza conceitual e a simplicidade de aplicação.

Segundo Bós (2008) este método classifica o aquífero em relação a cada um dos três parâmetros que o compõe, numa escala cujo valor máximo é a unidade. Dessa forma, sendo atribuídos valores variando de 0,0 até 1,0 para vulnerabilidade desprezível a extrema, respectivamente. O valor mínimo que se pode encontrar nessa multiplicação é 0, dessa forma não existirá aquífero. A partir de 0,016 há aquíferos para a análise efetuada. As etapas de inter-relação dos planos de informação são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Descrição Esquemática do Método GOD.



Fonte: Modificado de Valverde e Mesalles, (2006) *apud* Yamada (2007).

A redução de parâmetros do método GOD, não minimiza a abrangência da análise, já que o processo de recarga que é avaliado individualmente no método DRASTIC, por exemplo, está incluído no âmbito da classificação dos estratos de cobertura, quando se dá ênfase à ocorrência de fraturas bem desenvolvidas que podem favorecer o fluxo preferencial, reduzindo, substancialmente, a atenuação dos contaminantes, sendo fator crucial para o aumento da vulnerabilidade (TAVARES et al., 2009).

Para Cunha (2009) apenas o método GOD utiliza explicitamente a existência ou não da camada confinante e o seu grau de confinamento como atributo específico no conceito de vulnerabilidade, já que o DRASTIC e o IS incorporam tal parâmetro de forma implícita dentro de parâmetro específico que é a zona vadosa.

Apesar disso, Foster et al. (2002) apresentam algumas limitações do método de avaliação da vulnerabilidade natural à poluição do aquífero no âmbito hidrogeológico:

- presença de cursos d'água superficiais indefinidos (permanentes ou intermitentes), devido às incertezas na avaliação das suas condições hidrológicas, na definição da

qualidade do curso da água e na capacidade de atenuação dos estratos da zona não saturada (principalmente na indicação das seções potenciais influentes dos cursos que cruzam os aquíferos livres);

- excessiva exploração do aquífero com propósito de abastecimento e consequente variação da profundidade do nível d'água subterrânea e, também, no grau de confinamento do aquífero;
- compactação de argilas, que podem ser fraturadas e geralmente significam incertezas sobre a magnitude de qualquer componente de fluxo preferencial;
- aplicação em aquíferos fissurados (fraturados).

Outro fator limitante quanto à utilização do método GOD, abordado pelos autores Tavares et al. (2009) é a avaliação do perigo de contaminantes despejados abaixo do subsolo (vazamentos de grandes tanques de armazenagem subterrâneos, de lixiviação de aterros de resíduos sólidos sob a camada de solo e com retirada da zona vadosa, de descargas efluentes em pedreiras e minerações, etc.) e derramamento de solventes orgânicos sintéticos imiscíveis.

2.3.3 Índice IS

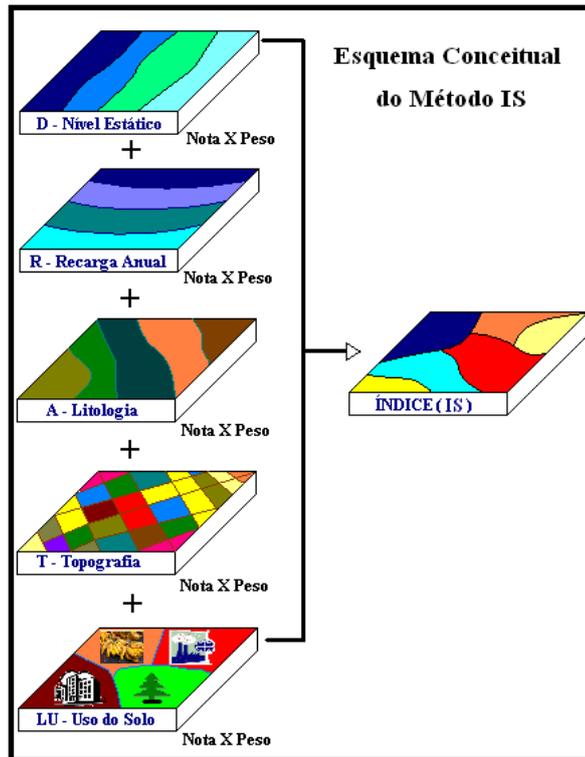
O método IS – Índice de Susceptibilidade foi criado por Francés et al. (2001) *apud* Artuso et al.(2004), para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos à poluição por contaminantes agrícolas.

Este método, como o SINTACS, também é uma derivação do DRASTIC, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. O método IS simplifica o sistema hidrogeológico em termos do número de variáveis importantes para a determinação da vulnerabilidade e introduz o parâmetro relacionado à ocupação do solo, que pretende dar a idéia do impacto ambiental desse uso do solo para a contaminação das águas subterrâneas (BÓS, 2008).

De acordo com BÓS (2007) o índice IS foi desenvolvido com o propósito de caracterizar a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição agrícola e pode ser aplicado para escalas intermédias (1:50.000 – 1:200.000).

O índice IS é calculado a partir da atribuição de notas e ponderação de seus respectivos pesos, a quatro parâmetros derivados do índice DRASTIC, acrescido ao parâmetro de uso e ocupação do solo, sendo posteriormente somados. A seguir pode ser observado na Figura 4 a representação da metodologia IS.

Figura 4 – Descrição Esquemática do Método IS.



Fonte: Autor, 2013.

O método IS não considera que a recarga elevada de um aquífero permeável se associe a uma elevada capacidade de diluição e atenuação dos contaminantes, sendo uma limitação do modelo. Vale salientar que uma alta taxa de recarga pode funcionar como um agente de transporte de contaminantes para o aquífero ou diluidor do mesmo.

2.4 Geoestatística e Uso de SIG na Construção de Mapas

Para a confecção dos mapas do presente estudo, será necessário observar as variáveis que serão trabalhadas neste trabalho e a forma de análise. Com isso, será necessário atribuir índices e notas para locais pontuais e posteriormente interpolá-los para a região estudada. Para tanto, faz-se necessário entender um pouco de geoestatística e interpolação de dados.

Dessa forma, a geoestatística tem como característica principal a aplicação de cálculo para estimar e/ou simular variáveis em locais de escassa ou nenhuma amostragem. “A geoestatística calcula estimativas dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados” (LANDIM; STURARO, 2002, p.2).

Ainda para Landim e Sturaro (2002, p. 2) as técnicas utilizadas em geoestatística levam em consideração a localização geográfica e a dependência espacial entre os dados,

considerando, assim, as duas características essenciais das variáveis regionalizadas: os aspectos aleatórios e os espaciais, reproduzindo os fenômenos naturais com maior fidelidade.

Para Boscatto et al. (2007) interpolação de dados é um método utilizado para encontrar valores de uma sucessão entre dois valores consecutivos conhecidos, é uma técnica utilizada para estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. O mesmo pode ser observado nas palavras de Jacob e Young (2006) quando dizem que interpolação “é uma técnica utilizada para a estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região”.

Os métodos de interpolação, de modo geral, são usados para analisar a variabilidade espacial de um determinado fenômeno. Segundo Nobre (2006) através da geoestatística é possível quantificar a continuidade espacial da grandeza em estudo a partir de modelos de interpolação espacial tendo como base a sua variabilidade estrutural.

Atualmente o termo geoestatística é consagrado como um tópico especial da estatística que trata de problemas referentes às Variáveis Regionalizadas. Para (LANDIM, 2003, p. 172):

São variáveis cujos valores são relacionados de algum modo com a posição espacial onde os mesmos são obtidos, ou seja, é uma função que varia de um lugar para outro, com certa aparência de continuidade. Esta continuidade está relacionada com a variabilidade das propriedades da amostra em relação à distância e direção, ou seja, com a tendência de tornarem valores mais próximos em dois pontos amostrados, quanto menos afastados espacialmente estejam esses pontos. São representadas, por certa quantidade de dados numéricos brutos disponíveis, a partir dos quais são obtidas informações sobre as características do fenômeno natural em estudo.

Para Santos (2010, p. 69) os métodos de interpolação são classificados em dois grupos: os métodos de interpolação determinísticos (atribui valores para os locais não amostrados com base nos valores medidos nas proximidades e utiliza fórmulas matemáticas que determinam a lisura da superfície resultante – IDW – Inverse Distance Weight) e os métodos geoestatísticos (baseados em modelos estatísticos que incluem autocorrelação – Krigagem).

Os métodos de interpolação mais comuns utilizados nos SIGs são justamente o de Krigagem e o Inverso da Distância a Potência. (IDW). Para Boscatto et al. (2007) a Krigagem é um método geoestatístico para pontos de interpolação que apresenta uma superfície estática com uma variável regionalizada com um certo grau de continuidade, enquanto que, o método IDW considera que as coisas que estão mais próximas são mais parecidas do que as que estão mais distante.

Esses métodos de interpolação apresentam diversos níveis de complexidades diferentes, entretanto, estudos feitos por Kravchenko e Bullock, (1999) apud Silva et al., (2008) demonstram que a ponderação do inverso da distância é mais fácil de se realizar, enquanto a Krigagem consome mais tempo e é mais complicada de se aplicar.

Ao apresentar o comportamento do método de interpolação IDW (*Inverse Distance Weighting*), Jacob e Young (2006) descreve:

O IDW “implementa explicitamente o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes. Para predizer um valor para algum local não medido, o IDW usará os valores amostrados à sua volta, que terão um maior peso do que os valores mais distantes, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida em que a distância aumenta, daí seu nome, Jacob e Young (2006, p. 8).

Ainda para Jacob e Young (2006, p. 9) o IDW assume que a superfície possui uma variação local, e funciona melhor se os pontos amostrais estão igualmente distribuídos pela área, sem estarem concentrados em determinado local.

Para Lima (2008) estudos através da geoestatística têm como objetivo principal a tentativa de extrair, da aparente desordem dos dados, uma imagem da variabilidade dos mesmos, é uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço. Este objetivo pode ser alcançado utilizando o variograma e está presente na análise estrutural.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são “sistemas de informação construídos especialmente para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representem objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente e indispensável para tratá-los” (CÂMARA et al., 1996).

Sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial (CÂMARA et al., 2001).

Para Druck (2002), os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) constituem ferramenta indispensável para compreender a distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço em diversas áreas de conhecimento. Com isso, os SIGs são as soluções atuais de análise espacial e temporal de fenômenos geográficos.

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser considerado tecnologicamente, como uma caixa de ferramentas digital para coleta, armazenamento, investigação, análise, transformação e exposição de dados espaciais (SILVA, 2004).

Baseado nesse conceito os SIGs têm os seguintes componentes (CÂMARA, et al., 2001, p. 43):

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Funções de consulta e análise espacial;
- Visualização e plotagem;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados num banco de dados geográficos).

Os SIGs têm como requisitos básicos armazenar a geometria gráfica dos objetos geográficos e de seus atributos, podendo ser utilizado de pelo menos três grandes maneiras convergentes, que refletem a importância relativa do tratamento da informação geográfica dentro de uma instituição (CÂMARA et al., 2001, p. 42):

- ❖ como ferramenta para produção de mapas;
- ❖ como suporte para análise espacial de fenômenos;
- ❖ como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Partindo do pressuposto que um mapa é uma representação gráfica dos fenômenos geográficos em superfície plana (CÂMARA, 1993). Dessa forma, os mapas são formados por Planos de Informação (PIs), diferentes tipos de dados geográficos, em forma de categorias temáticas em duas dimensões (x e y), como mapas de isolinhas, ou três dimensões (x, y e z), como o Modelo Digital do Terreno (MDT) (ORTIZ, 2003, p. 39).

Fundamentados nos requisitos básicos dos SIGs, o mapeamento do grau de vulnerabilidade de aquíferos não tira a necessidade de se investigar tal fenômeno *in situ*. Entretanto, para Aller et al. (1987), tais mapas, podem ser utilizados como ferramenta preliminar do planejamento governamental.

Os trabalhos que representam os fenômenos ambientais através de SIG buscam fornecer resultados satisfatórios com representações contínuas e homogêneas no espaço. Para Druk (2002, p.3) a representação convencional da variabilidade espacial nos SIGs reflete as hipóteses da cartografia convencional em que a representação de múltiplas propriedades que compõem determinado fenômeno é feita em termos de limites precisos e na homogeneidade das suas variações espaciais em uma determinada área.

2.5 Projeto ASUB

O projeto ASUB ao qual este trabalho está vinculado trata da integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas. As

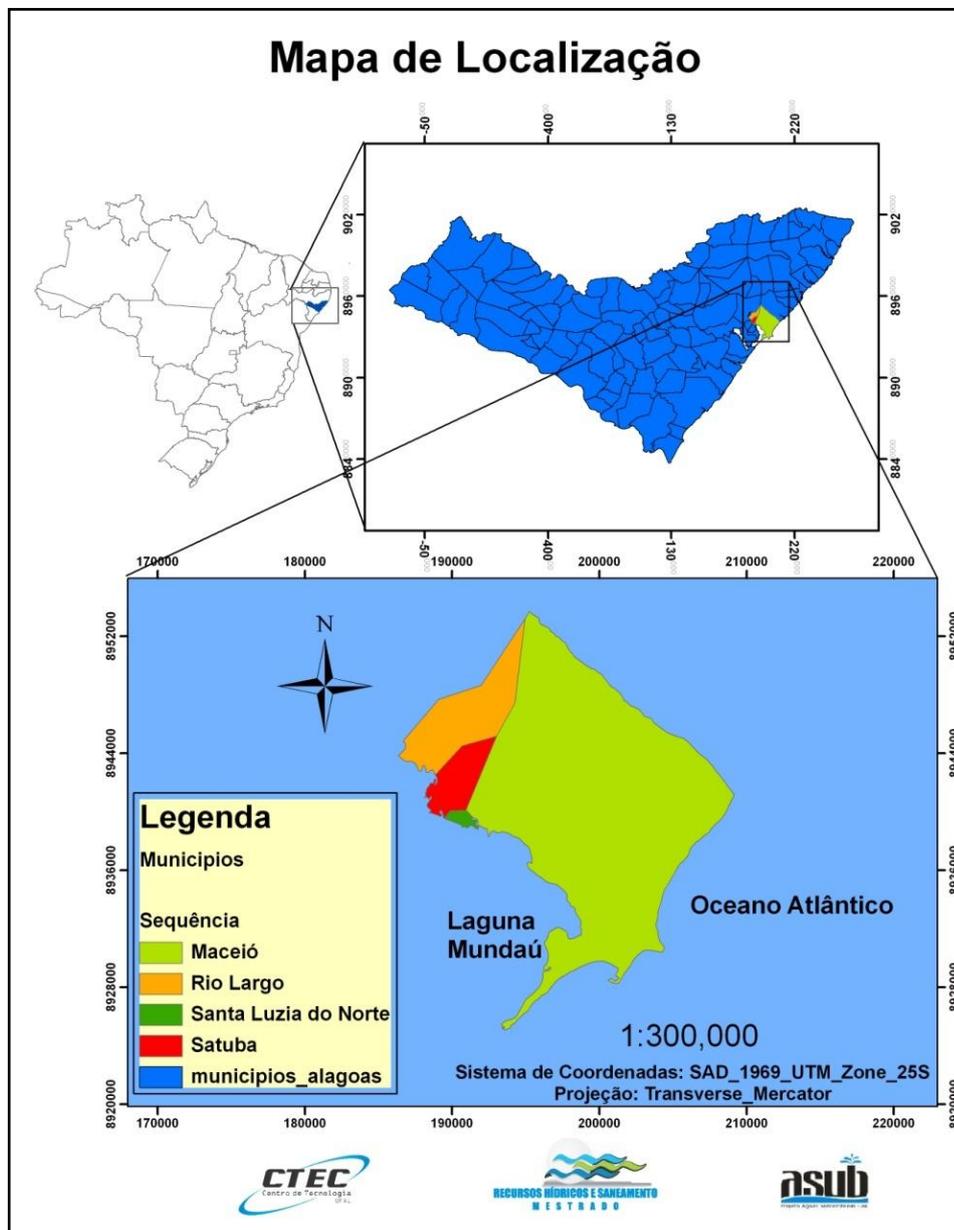
três frentes de ações descritas, foram aplicadas nas águas subterrâneas da região costeira da Bacia hidrográfica do rio Paraíba/PB, Bacia hidrográfica do rio Pratygy/AL e a Bacia hidrográfica do rio Santa Maria/RS, ou seja, foi um projeto conjunto entre as universidades de Campina Grande, Alagoas e Santa Maria, respectivamente.

O Projeto ASUB-AL subsidiou, pelo menos, o desenvolvimento integral de 3 dissertações de mestrados tratando respectivamente: da cobrança pelo uso da água subterrânea; da influência da mata ciliar na qualidade da água; e da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Além de inúmeros artigos para congressos e encontros associados a recursos hídricos.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no Estado de Alagoas, que ocupa a porção centro-oriental do Nordeste brasileiro, estando inserido na Mesorregião do Leste Alagoano e na Microrregião geográfica de Maceió. A RMM é composta por 10 municípios, porém a área de estudo engloba parte de Maceió e dos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte e ocupa uma área de aproximadamente 276 km². Localiza-se na porção central do litoral alagoano, sendo banhado a leste pelo Oceano Atlântico e a sul e a oeste pela laguna Mundaú, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Localização da área de estudo.



Fonte: Autor, 2013.

Na Tabela 2 a seguir, apresenta os municípios da área de estudo e suas respectivas áreas em km².

TABELA 2 – Municípios da área de estudo com suas respectivas áreas.

Municípios da Área de Estudo	Área (km²)
Maceió	229.267
Rio Largo	31.779
Santa Luzia do Norte	1.632
Satuba	13.17
Área Total	275.848

Fonte: Autor, 2013

Como pode ser verificado no mapa acima, Maceió, capital do estado, é o maior município da área de estudo, seguindo-se de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte.

3.1 Topografia

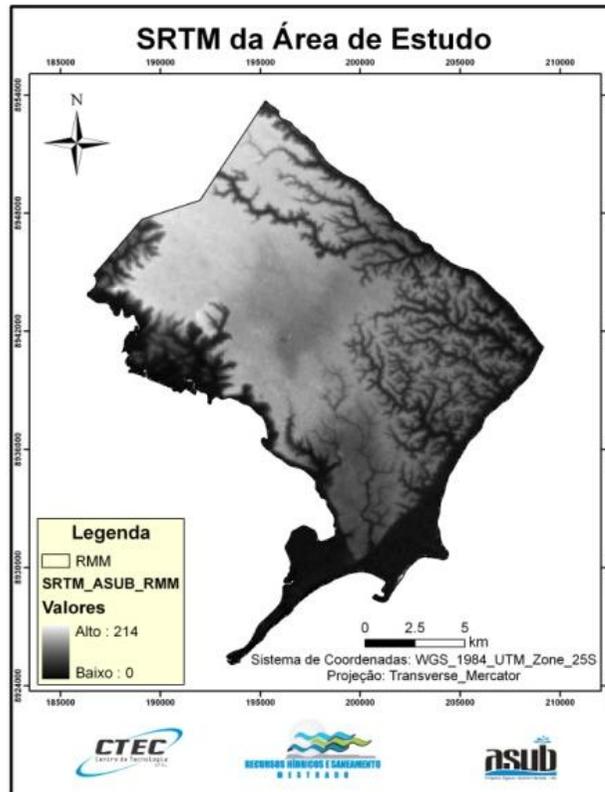
De acordo com Oliveira (2004), Maceió, que concentra maior parte da área de estudo, projeta-se pelo litoral alagoano, alcançando a região dos tabuleiros, abrigando uma bela paisagem de lagoas, mangues, ilhas, enseadas, baías e o mar. Suas encostas apresentam declives que oscilam entre 20% e 30%, dificultando a ocupação urbana e onerando o custo das infraestruturas a serem construídas pelo poder público.

Segundo Oliveira (2004), as encostas cortam toda a cidade de Maceió, é o limite central que separam a planície marinho-lagunar da região do tabuleiro. Essas encostas possuem altitude que variam de 40 a 60 metros e são constituídas de sedimentos friáveis do Grupo Barreiras (atual Formação Barreiras).

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi considerado o mapa da base SRTM para delimitação da área de estudo, Figura 6. A partir daí foi gerado o mapa de curvas de nível, Figura 7, e em seguida o mapa de modelo digital de elevação da área de estudo, Figura 8.

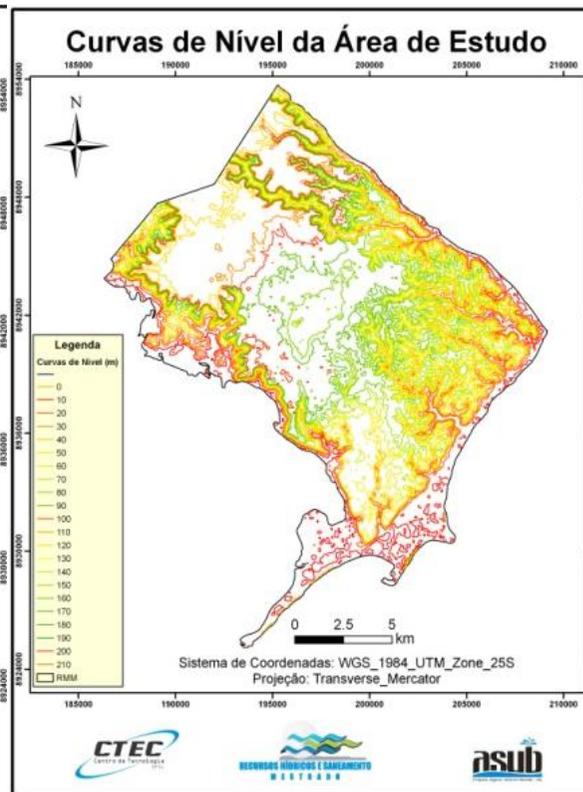
A partir da geração desses mapas, originou-se o mapa de declividade para os métodos DRASTIC e IS.

Figura 6 – Base SRTM



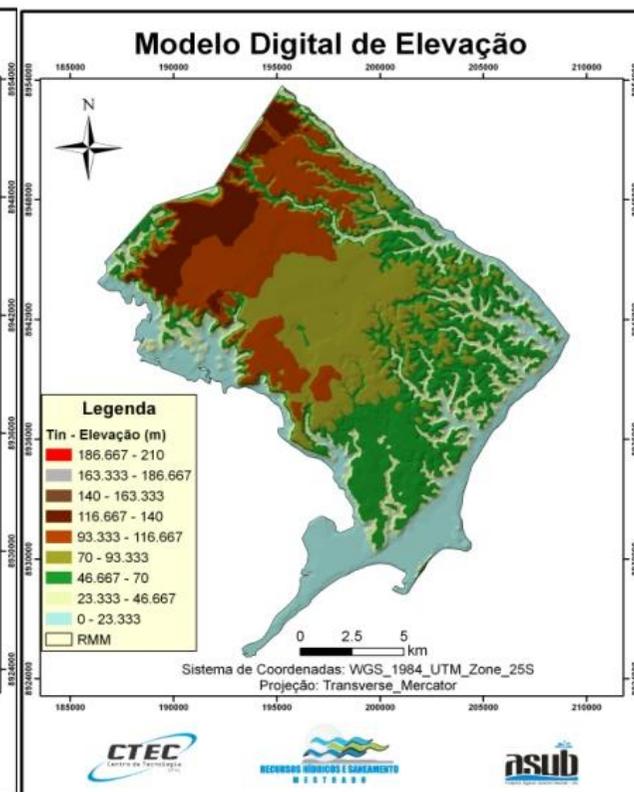
Fonte: Autor, 2013.

Figura 7 – Curvas de nível de 10m.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 8 – Modelo Digital de Elevação



Fonte: Autor, 2013.

As curvas de nível variam de 10 em 10 metros, enquanto que o Modelo Digital de Elevação da área de estudo varia de 23 em 23 metros.

3.2 Clima

A caracterização climatológica e a compreensão dos fenômenos climáticos da área de estudo, são de fundamental importância para o planejamento e utilização dos recursos naturais da região. Para Rocha, (2005) o clima é um dos fatores que mais influencia no comportamento hídrico da região, desempenhando um papel fundamental no equacionamento do balanço hídrico e, em particular, na alimentação e renovação das águas subterrâneas.

É a partir dessa informação que se pode determinar a disponibilidade hídrica, além do melhor tipo de atividade agrícola a ser implantado, a ocupação humana nas bacias, em áreas orográficas, sem danos oriundos de fenômenos climáticos e a implantação de atividades de curto, médio e longo prazo.

A classificação climática de Köppen para a área de estudo, define o clima segundo uma combinação de letras que indicam uma ou várias características climáticas, tais como: temperatura, precipitação e suas distribuições ao longo do ano.

O quadro 2 apresenta as classificações climáticas de Köppen e Thornthwaite para a estação de Maceió em todos os meses do ano.

Quadro 2 - Classificação Climática de Köppen para Maceió.

MÊS	CLIMA
Jan	Semi-árido
Fev	Trop.úmido
Mar	Trop.úmido
Abr	Trop.úmido
Mai	Trop.úmido
Jun	Trop.úmido
Jul	Trop.úmido
Ago	Trop.úmido
Set	Trop.úmido
Out	Semi-árido
Nov	Semi-árido
Dez	Semi-árido

Fonte: Adaptado do Maceió (2010).

Dessa forma, segundo Köppen o clima da região apresenta-se como Tropical Chuvoso com Verão Seco As[?]. A evapotranspiração varia entre 1200 e 1300 mm/ano e a evaporação é menor que 1400 mm/ano (ALAGOAS, 2010). Esse clima tropical apresenta baixa amplitude

térmica anual e a umidade relativa do ar atinge a um máximo de 82,9% em maio e mínimo de 75,7% no mês de novembro (FERREIRA NETO; SANTOS; LIMA, 2004).

Quanto ao clima, Costa e Ramos (2004), afirmam que é quente e úmido, observa-se que ao longo do ano sofre alterações na precipitação e na temperatura, criando condições micro e mesoclimáticas, principalmente em áreas de grande crescimento vertical, como na orla marítima.

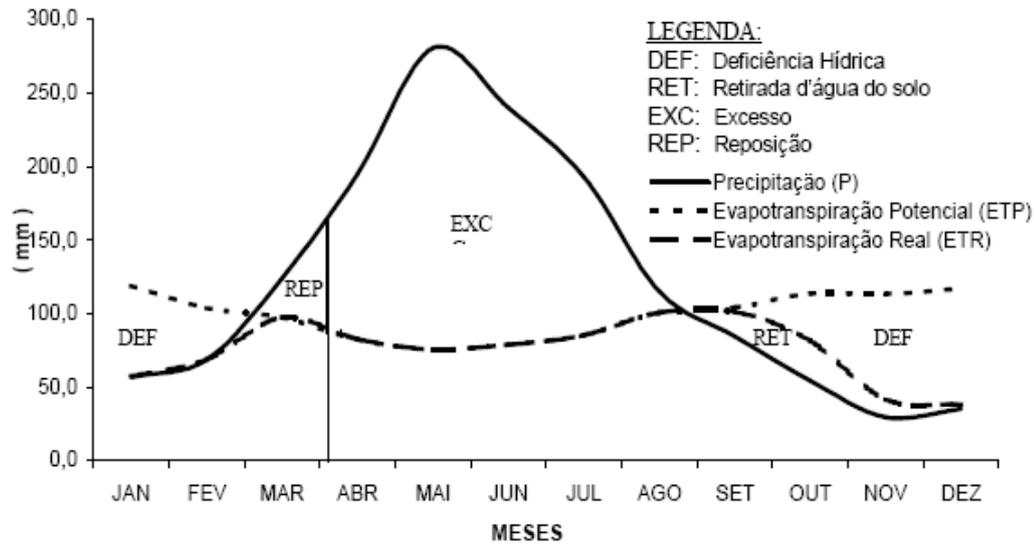
Os ventos predominantes são de sudeste, entretanto, no verão os ventos de nordeste são mais frequentes. A média mensal de insolação em horas/dia varia de 5,7 a 6,2 na estação chuvosa, meses de maio a junho, e atinge o máximo médio de 9,3 nos meses de verão (novembro, dezembro e janeiro), apresentando também baixos índices de nebulosidade (FERREIRA NETO et al., 2004).

Para Rocha (2005) a *evaporação* e *evapotranspiração* são dois importantes parâmetros climáticos para a hidrogeologia, por influenciar no balanço hídrico da região, recebendo ainda influência da temperatura, umidade relativa do ar, ventos, insolação e pressão atmosférica.

Os autores Ferreira Neto et al. (2004) elaboraram para Maceió, um balanço hídrico climatológico na escala mensal, para um ano médio, conforme metodologia de Thornthwaite-Mather, ou seja, utilizando as médias mensais de pluviometria, temperatura e evaporação criaram o balanço hídrico cíclico da cidade, sendo apresentado na Figura 9 a seguir, do qual concluíram que:

- ❖ Março é, potencialmente, o período de reposição hídrica;
- ❖ Abril a agosto corresponde ao período de excedentes hídricos;
- ❖ Setembro a dezembro corresponde ao período tanto de retirada d'água do solo como também de deficiência hídrica;
- ❖ O período de janeiro a fevereiro corresponde exclusivamente ao período de deficiência hídrica.
- ❖ Cerca de 61,6% do total precipitado é consumido pela evapotranspiração e os 38,4% restantes escoam, alimentando os aquíferos.

Figura 9 – Balanço hídrico de Maceió segundo Thornthwait-Mather.



Fonte: Ferreira Neto, Santos e Lima (2004).

Os dados adquiridos das estações pluviométricas têm séries históricas com início a partir de 1960 até o ano de 2010, porém algumas estações possuem séries curtas com 11 anos de dados, sendo bastante concisas em termos estatísticos.

A precipitação média anual determinada pelo Brasil - SUDENE 1990 apud Rocha 2005, utilizando dados obtidos da Estação Hidroclimática de Maceió/AL (n.º 3898357), com uma série histórica de 76 anos (1913 – 1984) é de 1478,6 mm/ano.

Os dados do presente estudo foram adquiridos da SEMARH e do Sistema Hidroweb da ANA. A partir da coleta de dados das precipitações totais mensais, foram determinadas as médias mensais e anuais. Os anos com ausência de dados em mais de um mês foi excluído da análise, permanecendo os dados com uma maior consistência da informação obtida. Os anos que tiveram um mês com ausência de precipitações catalogadas foram tratados adicionando o valor zero (0), já que foram observadas precipitações mensais históricas muito baixas para estes postos, em torno de 25 mm/mês, não afetando o processo de análise.

A partir da coleta e tratamento de dados de precipitação, foi calculada a precipitação total anual, a média das precipitações mensais e anuais, além do cálculo de recarga que é dado através dos 10% da precipitação anual, somando um valor de 100 mm/ano para áreas agrícolas e 300 mm/ano para áreas urbanizadas, conforme descrito no parâmetro recarga da metodologia DRASTIC.

Segundo Nobre (2006, p. 113) a recarga dos aquíferos da região se dá de forma direta por infiltração das precipitações, bem como através de recarga artificial urbana como vazamento de tubulações de águas tratadas e servidas.

3.3 Geologia

A estrutura geológica do Nordeste brasileiro é composta por várias bacias sedimentares acopladas a um grande escudo cristalino, definindo assim os sistemas aquíferos da região. Dessa forma, encontra-se subdividido em dois compartimentos litoestruturais representados pela Província Costeira e da Borborema. A primeira composta por rochas sedimentares ocupa quase a totalidade da área de estudo, enquanto a segunda é formada por rochas cristalinas (Almeida et al., 1977) apud Maceió (2007b).

A Região Metropolitana de Maceió está situada regionalmente na faixa sedimentar litorânea do Estado de Alagoas, fazendo parte da Bacia de Alagoas, Formação Barreiras, Sedimentos de Praia e Aluvião e Embasamento Cristalino (ALAGOAS, 2006). De acordo com a Enciclopédia Municípios de Alagoas (2006) Maceió está assentada, preferencialmente, sobre a Bacia Sedimentar de Alagoas, porém, o extremo norte do município compreende o limite com o complexo de rochas do embasamento do Maciço Pernambuco-Alagoas, sendo representado pelos granitos e migmatitos.

A Bacia Sedimentar de Alagoas é uma depressão resultante da separação dos continentes Americano e Africano, onde se depositaram rochas sedimentares reunidas em grupos e formações geológicas desde o Paleozóico Superior, até os dias atuais (sedimento quaternários) Enciclopédia Municípios de Alagoas (2006).

A espessa seção de sedimentos acumulados na bacia de Alagoas, na área de estudo, apresenta um mergulho suave e uma grande variação faciológica, definindo da base para o topo, às formações Coqueiro Seco, Ponta Verde, Maceió, Poção, Marituba e Barreiras (NOBRE, 2006).

3.4 Formações Litológicas

Serão destacadas a seguir as principais características das Formações Poção, Ponta Verde, Maceió, Marituba, Barreiras e Sedimentos Quaternários de Praia e Aluvião. Entretanto, os perfis de poços tubulares utilizados neste trabalho, de origem da CASAL, SEMARH e SIAGAS, apresentam sondagens penetrantes nas Formações Sedimentos Quaternários de Praia e Aluvião, Barreiras, Maceió, e Marituba, sendo estas últimas parcialmente penetrante.

3.4.1 Formação Poção

Essa unidade litoestratigráfica grada lateralmente para a Formação Maceió, aflorando nas margens dos principais vales fluviais da região norte e nas proximidades da borda da

bacia, com espessura muito variável, além disso, é composta por conglomerados, seixos e matações de origem intrusivas ácidas e gnaisses (CASAL, 2009), que podem atingir até 8 metros de diâmetro.

O topo dessa Formação apresenta-se na região sul ou inferior da área de estudo, no bairro do Pontal da Barra, onde, de acordo com Florêncio et al. (2002), é constituída de espessas camadas de halita com intercalações de folhelhos e rochas carbonáticas, a profundidades superiores a 800m, denominados de evaporitos Paripueira. Esses evaporitos foram descritos na área de estudo na bateria de poços da PETROBRAS na margem lagunar e no Tabuleiro Costeiro, onde ocorre extração de petróleo, pois esses grandes depósitos salíferos possuem essa característica.

3.4.2 Formação Ponta Verde

A formação Ponta Verde apresenta-se com uma espessa seção de folhelhos, funcionando como um importante aquitarde na região. Para ALAGOAS (2006) essa formação é constituída predominantemente por folhelho cinza esverdeado, acicular, depositado em ambiente lacustre, no Eoaptiano.

3.4.3 Formação Maceió

A Formação Maceió, assim como a Formação Ponta Verde, funcionam como uma importante barreira vertical ao fluxo descendente (NOBRE, 2006), sendo a primeira a de maior espessura vertical verificada na área de estudo.

Para Cavalcante (2002b) e ALAGOAS (2006) essa formação é composta por intercalações de arcóseos finos a grossos cinza-claros e castanhos, folhelhos betuminosos castanhos com interlaminações de anidritas e dolomitas e camadas de halitas, denominadas Evaporitos Paripueira. São encontradas camadas de salgema, segundo a CASAL (2009).

3.4.4 Formação Marituba

Essa formação ocorre em subsuperfície, ocupando praticamente toda a área de estudo sobreposta pela Formação Barreiras e os Sedimentos de Praia e Aluvião, sendo que, seu contato com a Formação Barreiras é caracterizado por um nível de argila cinza a esverdeada e sua distribuição é bastante irregular com espessuras variáveis, consequência do sistema de “rifteamento” ocorrido no Cretáceo (ROCHA, 2005).

Na Formação Marituba as rochas foram depositadas por leques costeiros do Campaniano ao Holoceno, predominando o arenito médio a grosso acinzentado (NOBRE, 2006). De acordo com a Casal (2008a), ocorrem principalmente nessa formação arenitos

médios a grosseiros e conglomeráticos, podendo ocorrer, localmente lentes de argilas de cor cinza escuro.

Para Cavalcante (2005) a formação Marituba é composta por clásticos, com predominância de arenitos médios a grossos e conglomeráticos, com intercalações de calcários arenosos, brancos ou cremes, e dolomitos acastanhados, podendo ocorrer, localmente, lentes de argilas de cor cinza escura, atingindo até 500 m de espessura na região norte de Maceió.

3.4.5 Formação Barreiras

A gênese dos clásticos da Formação Barreiras (Plioceno) se deu entre o Terciário e Quaternário, sendo depositados de maneira extensiva sobre a bacia e parte do embasamento cristalino, servindo de cobertura para o registro sedimentar, podendo ser considerada como um episódio independente, mais ligado à evolução da geomorfologia regional (ROCHA, 2005).

Para Rocha (2005) a formação Barreiras apresenta-se, sob a forma de extensos tabuleiros costeiros formando uma superfície elevada, plana e pouco dissecada, com drenagem dada por vales jovens ou rejuvenescidos com perfis em forma de “V” agudo que os retalham profundamente, chegando, às vezes, a desnudar as unidades da Bacia de Alagoas. Essa formação recobre quase a totalidade da área de estudo, exceto alguns afloramentos nas áreas fluvio-lagunares e litorâneas, ou seja, onde predominam os sedimentos de praia e aluvião.

Em sua porção leste, há uma inclinação suave até atingir o oceano, sendo interrompidos abruptamente por falésias ao longo da linha de costa, evidenciando talvez o último estágio de maturidade de uma costa submergente, responsável pela formação da planície costeira (ROCHA, 2005).

A Formação Barreira apresenta espessura média de 62,5 metros, estando sobreposta ao Embasamento Cristalino e sedimentos da Bacia de Alagoas, principalmente sobre as formações Poção e Marituba, sendo sua litologia composta por arenitos argilosos, com intercalações subordinadas de argilas e siltitos (ALAGOAS, 2006).

A formação Barreiras apresenta-se como clásticos continentais não litificados com camadas mal definidos e normalmente compactados, sendo representados por areias argilosas de cor creme, vermelho castanho e amarelo ocre com intercalações subordinadas de argilas, siltes, cascalhos e folhelhos. A espessura dessa formação é bastante variada podendo atingir os 150 metros de profundidade, porém sua profundidade média gira em torno de 80 metros na parte alta da cidade e 40 metros nas regiões costeiras.

3.4.6 Sedimentos de Praia e Aluvião

“É a designação informal dos sedimentos de idade Recente que ocorrem na região. Sua composição litológica varia em função do ambiente de deposição” Agência Nacional de Águas (2011b).

Na Planície Costeira, a área é superficialmente coberta pelos Sedimentos de Praia e Aluvião, que recobrem os sedimentos da Bacia de Alagoas e parte da Formação Barreiras. Rocha (2005) descreve a litologia dos sedimentos de Praia e Aluvião da seguinte forma:

“A litologia desta unidade litoestratigráfica varia conforme o ambiente de deposição. Nas planícies costeiras entre as falésias da Formação Barreiras e o mar, predominam areias finas a grossas, cinza-claro e/ou ligeiramente amareladas; nas planícies aluviais ao longo dos rios é constituída por areias, argilas e localmente cascalhos. Nas zonas de alagadiços e canais de rios sujeitos a influência das marés, é constituída por sedimentos paludiais com argilas arenosas em proporções que variam com a energia da corrente no local da deposição. Os arrecifes, alinhados paralelamente à orla marítima são do tipo barreiras formados por arenitos com cimento calcífero” (ROCHA, 2005).

“Com base nos perfis dos poços perfurados nessa planície estes sedimentos estão constituídos por areias variadas, com níveis de argilas orgânicas, turfas, paleocorais, limos e vasas, de origem continental ou marinha” Agência Nacional de Águas (2011b).

Os Sedimentos de Praia e Aluvião localizam-se nas margens de rios e laguna, além da região litorânea. Sua espessura é bastante variável com média de 10 metros nas planícies costeiras, 20 metros nas margens dos rios e 50 metros nas desembocaduras dos principais rios, e em particular 134m no bairro da Ponta Verde, (ALAGOAS, 2006).

Embora possam constituir localmente bons armazenadores de água subterrânea, a importância como aquífero fica comprometida na planície costeira, em razão da sua vulnerabilidade à contaminação por águas poluídas e pela cunha salina. Esses sedimentos repousam discordantemente sobre os depósitos da Formação Barreiras ou unidades da Bacia de Alagoas.

As áreas ocupadas pelos Sedimentos de Praia e Aluvião são normalmente mais permeáveis, devido a menor concentração de argila, e o maior agrupamento de areias, que facilita a penetração da recarga. Esses sedimentos geralmente repousam discordantemente sobre a formação Barreiras.

Com base nos perfis dos poços perfurados na planície costeira esses sedimentos são constituídos por areias variadas, com níveis de argilas orgânicas, turfas, paleocorais, limos e vasas, de origem continental ou marinha (LIMA, 2011).

Os mapas geológicos, de subafloramento e do perfil geológico, abaixo apresentados nas Figuras 10, 11 e 12, subsidiam o entendimento dos sistemas aquíferos na região de estudo.

Figura 10 – Mapa geológico.

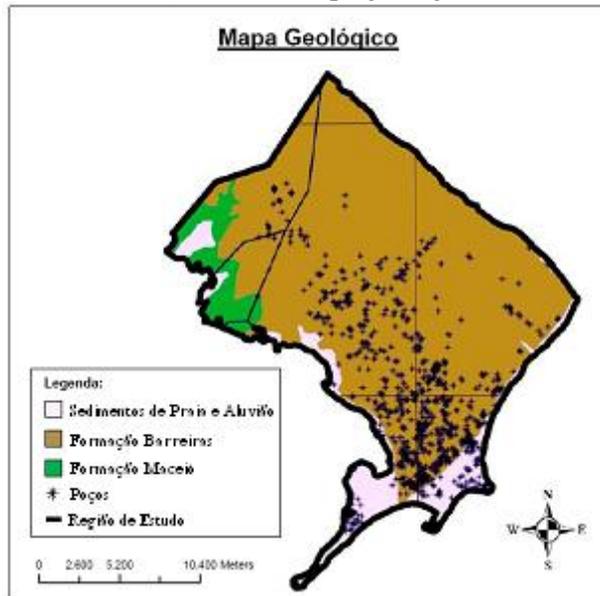
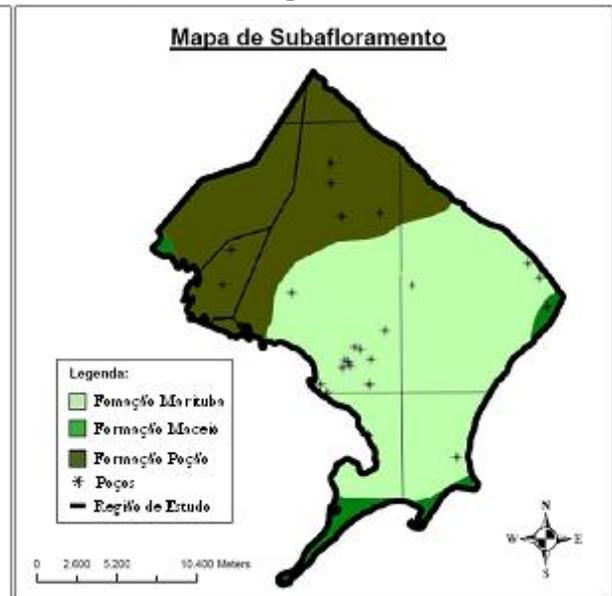


Figura 11 – Mapa de subafloramento.



Fonte: adaptado da SEMARH (2006).

Figura 12 – Perfil geológico sintetizado da cidade de Maceió.



Fonte: Marques (2004) *apud* Marques e Marques (2005).

3.5 Geomorfologia

Maceió tem seu sítio urbano localizado sobre terrenos sedimentares neocenozóicos (Formação Barreiras) e quaternários (resultante da ação marinha, fluvial e eólica nos últimos 120.000 anos, dando origem à planície litorânea e lagunar com terraços marinho, cordões arenosos e antigos estuários afogados que dão origem às lagoas (COSTA; RAMOS, 2004, p. 193). Segundo Oliveira (2004) geomorfologicamente, Maceió possui duas formas específicas de paisagem física: a planície marinho-lagunar e o planalto sedimentar do tabuleiro.

A planície litorânea é constituída de praias, restinga, terraços, recifes, dunas, mangues e rios, situada a 5 metros do nível do mar. A planície marinha é constituída de sedimentos de praia.

A planície lagunar, que apesar de receber muitos sedimentos dos rios afluentes do Mundaú, sofre com a ação antrópica de aterramento dos canais fluviais para construção de habitação.

Por sua vez, o tabuleiro é um baixo planalto sedimentar, constituído de sedimentos terciários da Formação Barreiras, com extensas áreas aplainadas com pequenos declives que oscilam entre 0 e 5%. Na direção leste os Tabuleiros terminam próximo à costa formando falésias que bordejam a planície costeira.

A rede hidrográfica que corta essa região de topos planos forma pequenas depressões onde se acumula água da chuva. Para Rocha (2005) em alguns locais esses tabuleiros apresentam-se fortemente recortados pelo ciclo erosivo iniciado no Quaternário e em desenvolvimento atualmente, gerando relevos em vertentes íngremes e vales em “V” fortemente encaixados, esculpido pela rede de drenagem.

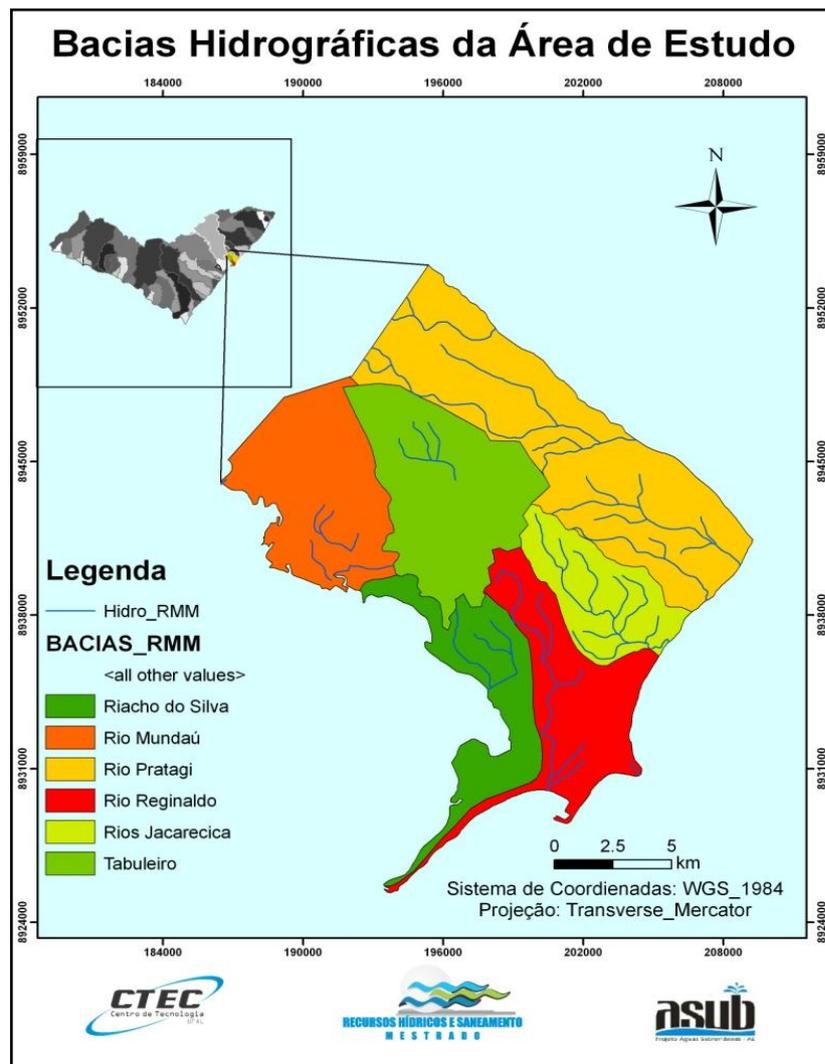
Com exceção da porção superior das bacias do Reginaldo e Jacarecica, o relevo apresenta uma configuração de bacia endorréica, com cota de 65 metros formando uma depressão ou lagoa (ROCHA, 2005). Essa configuração é de grande importância para a recarga dos aquíferos subjacentes por meio da infiltração direta das águas de chuva e na formação de praticamente toda a rede de drenagem do Tabuleiro do Martins (FERREIRA NETO et al., 2002).

O relevo plano também é encontrado ao longo da estreita faixa de costa e nas regiões flúvio-lagunares, apresentando cotas inferiores a 10 metros, sendo constituídos por depósitos de sedimentos quaternários.

3.6 Hidrografia

Hidrograficamente a área de estudo encontra-se inserida na vertente Atlântica Alagoana, representada pelas bacias hidrográficas dos Rios Pratagy, Reginaldo, Jacarecica e do Tabuleiro, e do riacho do Silva que deságua na laguna Mundaú, Figura 13.

Figura 13 – Mapa das bacias hidrográficas inseridas na área de estudo.



Fonte: Autor, 2013.

A área de estudo é drenada por pequenas bacias com vales encaixados que drenam normalmente para o oceano Atlântico (riacho do Ferro) ou para a laguna Mundaú (riacho Catolé, além dos canais da Levada e do Trapiche). Além disso, o processo de urbanização, industrialização e pavimentação das estradas aceleram o escoamento superficial provocando alagamentos nos bairros do Farol (rua Miguel Palmeira ao lado do CEPA) e Tabuleiro (rua Rotary próximo ao Colégio Rotary) e enchentes (fz dos riachos Salgadinho e Sapo) em lugares específicos da área de estudo.

A bacia do rio Reginaldo, que é um antigo afluente do rio Mundaú, nasce na região do tabuleiro costeiro de Maceió próximo ao Polo Multissetorial Governador Luiz Cavalcante. Para Rocha (2005) este rio apresenta vazões no seu alto e médio curso apenas quando supram a deficiência do solo excedendo a capacidade de infiltração, ou seja, quando todos os poros estão preenchidos formando o excedente hídrico. Essa bacia apresenta como afluentes o córrego do Rego Seco e Pitanga, riacho Pau Darco, do Sapo e Gulandim, estando todos num grau avançado de degradação proveniente por rejeitos domésticos *in natura*.

De acordo com a Enciclopédia Municípios de Alagoas (2006) o rio Reginaldo é caracterizado como um rio influente (aquele que alimenta o aquífero) tem aproximadamente 10 km de curso, deságua na praia da Avenida da Paz, separando os bairros de Jaraguá e Centro. Ao alcançar o bairro do Poço, recebe o nome de Salgadinho em virtude da salinidade de suas águas, pela influência das marés.

O riacho Reginaldo (Salgadinho) atualmente é um receptor e desaguadouro de grande parte de dejetos e efluentes advindos da parte alta da cidade, sendo um potencial foco de contaminação do lençol freático.

Outra bacia hidrográfica da cidade que está passando por um processo semelhante é a do Jacarecica que é um rio efluente (aquele que é alimentado pelo aquífero), estando bastante assoreado pelos resíduos jogados pelos moradores de suas encostas.

O rio Jacarecica é perene, sendo caracterizada como efluente, que é alimentado pelo aquífero. Apresenta vale em “V” no médio curso e fundo raso com bancos arenosos no baixo curso. Também é caracterizado por receber descarga de lixos e esgotos.

Na bacia do rio Mundaú que é perene, encontra-se o riacho do Silva, de pequeno porte que deságua na laguna. É alimentado pelo aquífero e apresenta-se poluído pelo despejo de esgoto.

A bacia do Tabuleiro, também conhecida como endorréica, tem seu ponto mais baixo na lagoa do Pólo Multissetorial Governador Luiz Cavalcante. Atualmente suas águas são transpostas para a bacia do rio Jacarecica pelo canal da macrodrenagem que deságua na nascente principal deste rio. É caracterizado por apresentar baixas declividades, estando localizadas no Tabuleiro Costeiro ou interflúvio tabuliforme pouco dissecado.

3.7 Hidrogeologia

Visando a caracterização hidrogeológica da área de estudo da presente dissertação será realizada uma primeira avaliação dos perfis de poços disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH) e do Sistema de Informações

de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Dessa forma foi elaborada uma primeira avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos dos poços cadastrados, sendo observados a quantidade, a localização, o nível estático e as profundidades dos aquíferos presentes.

Em função das características geomorfológicas, pedológicas e hidrogeológicas existentes na área de estudo, foram identificados dois sistemas aquíferos distintos, definidos através de parâmetros como a porosidade, o potencial hidrogeológico, a vulnerabilidade e as dimensões, os domínios aquífero fraturado (fissural) e intersticial (poroso) (ALAGOAS, 2006).

O domínio fraturado ocorre na parte oeste e noroeste da Região Metropolitana de Maceió nos municípios de Messias, rio Largo e Pilar, enquanto que o domínio intersticial ou poroso é composto pelos Sistemas Aquíferos da Bacia de Alagoas, Formação Barreiras e Sedimentos de Praia e Aluvião (ALAGOAS, 2006).

Ainda para ALAGOAS (2006) o meio aquífero fissural, comumente designado por “cristalino” ou ainda maciço rochoso, é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha, promovendo uma produtividade baixa, com vazão média de 3,985 m³/h e vazão específica média inferior a 0,380 m³/h/m, apesar da qualidade físico-química da água ser considerada muito boa, quando comparada com o agreste e sertão.

Sobre as direções preferenciais de fluxo, esse sistema é de caráter anisotrópico, não permitindo uma definição local da superfície potenciométrica, sendo controlada pela topografia e orientando-se segundo os vales das drenagens superficiais.

A supremacia da recarga dos aquíferos se dá por infiltração pluviométrica direta nas áreas de afloramento e, por consequência, através de sistemas de transferências aquíferas, interação com drenagens superficiais influentes e, particularmente nos meios urbanos, a partir da perda hídrica do sistema de abastecimento público (ALAGOAS, 2010). Esta recarga na área de estudo ocorre sobre os afloramentos de rochas sãs, tendo infiltração a partir da rede de drenagem superficial.

Nas bacias sedimentares, os depósitos são relativamente extensos e mais ou menos consolidados, constituindo domínios hidrogeológicos importantes, que por vezes alternam sequências de camadas argilosas e arenosas, os quais podem ser compartimentadas por zonas de fraturas (REBOUÇAS, 2002).

Tal análise se deu através das escavações dos poços da PETROBRAS e dos poços de captação de água subterrânea. Os domínios aquíferos identificados são o Fraturado ou Fissural

(localizado na porção oeste e noroeste da área de estudo – Falha geológica de Rio Largo) e o Intersticial ou Poroso que é composto pelos Sistemas Aquíferos da Bacia de Alagoas, Formação Barreiras/Marituba e Sedimentos de Praia e Aluvião, ocupando quase a grande maioria da área de estudo (ALAGOAS, 2006).

3.7.1 Sistema Aquífero Barreiras

Esse aquífero isolado ou em conjunto com o aquífero Marituba, representa o principal manancial hídrico em condições hidrogeológicas e hidroquímicas, sendo amplamente explorado para abastecimento público, privado e industrial (ALAGOAS, 2006).

De acordo com ALAGOAS (2006) as águas do Sistema Aquífero Barreiras são classificadas como doces do ponto de vista físico-químico, não apresentando problemas de potabilidade a nível regional e predominando o tipo cloretado sódica. Vale salientar que a níveis de contaminação locais/pontuais foram detectadas nesse sistema aquífero por Silva (2012) e Fazzio et al. (2009, 2010a e 2010b).

A Formação Barreiras é aflorante em quase toda a área de estudo, sob a forma de extensos tabuleiros costeiros. Sua espessura é bastante variada, apresentando descontinuidade horizontal dos níveis confinantes, fazendo com que o potencial das águas subterrâneas seja comandado pela superfície da zona livre, podendo se comportar como um sistema livre ou semilivre, conforme a sequência litológica predominante (ROCHA, 2005).

Rocha (2005) analisando os testes de bombeamento dos relatórios técnicos dispostos na Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais do Estado de Alagoas (SEMARHN) atual Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH) verificou diferentes transmissividades ($3,3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ a $7,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) e condutividades hidráulicas ($1,1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ a $6,6 \times 10^{-8} \text{ m/s}$), tanto vertical quanto horizontalmente, resultando em transmissividade média de $4,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, condutividade hidráulica média de $1,3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e coeficiente de armazenamento de $2,9 \times 10^4$, proveniente da variação litológica, representada por intercalações de níveis arenosos, sílticos e síltico-argilosos.

Ferreira Neto et al. (2002), estudando o aquífero Barreiras para gerenciamento dos recursos hídricos da bacia evaporimétrica do Tabuleiro do Martins em Maceió, encontraram uma transmissividade de $1,208 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade hidráulica de $4,497 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

Segundo Feitosa (1996) apud Rocha (2005) esse sistema aquífero apesar de apresentar poços com vazão específica média de $4,845 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e vazão média de $18,236 \text{ m}^3/\text{h}$ são

considerados de média potencialidade devido aos seus valores médios de transmissividade e condutividade hidráulica.

A recarga por infiltração direta dos excedentes pluviométricos de 567,7mm/ano, obtida no balanço hídrico, é facilitada pela morfologia predominantemente de tabuleiros, com drenagem pouco desenvolvida e incipiente e alto índice e regularidade das precipitações pluviométricas (ROCHA, 2005). Esse sistema aquífero é alimentado de forma direta pelas precipitações, pelos vazamentos da rede de abastecimento e saneamento público, alimentando também o Sistema Aquífero Marituba.

O Sistema Aquífero Barreiras está ameaçado de degradação devido à expansão urbana, onde os efeitos mais impactantes estão concentrados na drenagem que funciona como rede coletora do esgoto urbano, sistema de saneamento com deposição *in situ* de efluentes domésticos (fossas e sumidouros), de atividades cemiteriais, postos de gasolina, a fertirrigação da monocultura da cana-de-açúcar, além da ocupação desordenada do terreno (ALAGOAS, 2006)

Segundo Rocha (2005), o aquífero Barreiras na zona urbana de Maceió, originalmente com águas de boa qualidade, vem sendo em algumas áreas gradativamente contaminadas por águas salinizadas da Formação Marituba, por meio da ascensão vertical de cones salinos, devido à exploração intensiva desse sistema.

3.7.2 Sistema Aquífero Marituba

O Aquífero Marituba não ocorre em superfície, mas, como subaflorentamento Pré-Barreiras e Sedimentos de Praia e Aluvião, e abrange uma faixa de aproximadamente 20 km, a partir de Maceió em direção nordeste.

É um dos dois aquíferos mais importantes da região, em função da média potencialidade observada nos parâmetros hidrodinâmicos realizados por Rocha (2005), apresentando transmissividade média igual a $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, condutividade hidráulica de $4,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, vazão média por poço de $40,242 \text{ m}^3/\text{h}$, e capacidade específica média de $2,562 \text{ m}^3/\text{h/m}$, e das boas condições hidrogeológicas e hidroquímicas, favorecendo a sua exploração por particulares, empresas e principalmente pela CASAL para abastecimento público.

A recarga do Sistema Aquífero Marituba acontece exclusivamente por percolação vertical, através da Formação Barreiras e dos Sedimentos de Praia e Aluvião que tem seu contato caracterizado pela presença de camada de argila cinza esverdeada que ocorre sempre na base desses aquíferos, indicando uma faixa de transição.

Este aquífero é constituído por uma sequência de arenitos quartzosos médios a grosseiros cinzentos, que passa em profundidade para folhelhos, dolomitos, calcários e arenitos. Os intervalos arenosos representam 40% da espessura total, (ALAGOAS, 2005).

Esse sistema aquífero que começa nas margens da lagoa Mundaú e se estende para nordeste paralelamente à linha de costa, apresenta condições predominantemente de semiconfinamento com drenança, podendo ocorrer também uma condição de semilivre, e indicou através do cálculo de reservas reguladoras uma disponibilidade hídrica de $15,056 \times 10^6$ m³/ano e a efetiva $9,789 \times 10^6$ m³/ano (ALAGOAS, 2006).

Atualmente é bastante explotado por particulares, indústrias e principalmente pela CASAL para abastecimento público, diminuindo as cargas potenciométricas. Com isso, sua salinização por intrusão salina já é evidente na Planície Costeira, parte do Tabuleiro e principalmente nas baterias do Bebedouro, Baixo Reginaldo, Praça Gonçalves Ledo e Mangabeiras (ROCHA, 2005).

3.7.3 Sistema Aquífero Barreiras / Marituba

O comportamento litoestratigráfico evidencia que os aquíferos Barreiras e Marituba, conceituados, respectivamente, como livre e confinado encontram-se em amplas áreas em estado de comunicação permanente, ou seja, compõem um único sistema hidráulico, o qual denomina-se de Sistema Aquífero Barreiras-Marituba (ALAGOAS, 2006).

O sistema aquífero Barreiras em conjunto com o Marituba, representa o principal manancial hídrico em condições hidrogeológicas e hidroquímicas, com uma zona livre superior e diversas camadas confinantes e descontínuas que separam horizontes mais permeáveis, constituindo o principal manancial na região dos tabuleiros, sendo vastamente explotado para abastecimento público, privado e industrial (ROCHA, 2005).

O Sistema Aquífero Barreiras-Marituba é caracterizado, geralmente, por uma zona livre superior e diversos horizontes confinados, influenciados pelas variações sazonais, sendo que sua área de ocorrência coincide com a área do aquífero Barreiras e grande parte dos Sedimentos de Praia e Aluvião (ALAGOAS, 2006).

A análise dos perfis litológicos, a partir de poços que penetraram esse sistema, indica condições predominante de semiconfinamento com drenança, podendo ocorrer também, condições de semilivre, porém vale salientar que os poços que penetram nas duas formações, são parcialmente penetrantes na segunda (CAVALCANTE, 2005).

A descontinuidade horizontal dos níveis confinantes faz com que o potencial das águas subterrâneas seja comandado pela superfície da zona livre, podendo se comportar como um sistema livre ou semilivre, conforme a sequência litológica predominante (ALAGOAS, 2006).

Sua potencialidade está condicionada à infiltração direta das chuvas na Formação Barreiras. Os valores dos parâmetros hidrodinâmicos indicam, de um modo geral, uma potencialidade média para esse sistema aquífero, com transmissividade (T) média de $6,1 \times 10^{-3}$ m²/s, condutividade hidráulica (K) média de $1,4 \times 10^{-4}$ m/s e coeficiente de armazenamento (S) de $1,3 \times 10^{-4}$ (ROCHA, 2005).

3.7.4 Aquífero Poção

O aquífero Poção ocorre como subafloramento na área de estudo, a uma profundidade média de 80 metros, estendendo-se por toda a margem noroeste, bordejando o sistema de falha marginal. Caracteriza-se por ser muito heterogêneo e anisotrópico, sendo composto por espessas intercalações de areias em argilas e conglomerados, podendo também ser formado pela matriz, quando arenosa, dos conglomerados. Apresenta-se como confinados ou semiconfinados, de acordo com a sequência litológica da Formação Barreiras que está sobreposta ou com a natureza granulométrica dos diversos horizontes da própria unidade que estão acima das lentes mais arenosas (ALAGOAS, 2005).

A potencialidade desses aquíferos varia em função da granulometria e da espessura das faixas de areia e dos conglomerados, que se alteram em toda extensão dessa formação. Possui uma transmissividade média de $1,160 \times 10^{-4}$ m²/s, caracterizando um aquífero de baixa potencialidade e condutividade hidráulica de $1,203 \times 10^{-4}$ m/s (ALAGOAS, 2006).

A recarga ocorre principalmente por filtração vertical por meio dos sedimentos da Formação Barreiras e água superficial de alguns rios provenientes da área do cristalino, tais como o Mundaú, Paraíba e Sumaúma, que penetram na faixa sedimentar (ALAGOAS, 2006).

3.7.5 Aquífero Sedimentos de Praia e Aluvião

Para Rebouças (2002) nos depósitos aluviais e dunas, as águas subterrâneas são rasas ou freáticas, muito vulneráveis e se encontram, regra geral, sob condições de pressão atmosférica normal, ou seja, formam aquíferos livres.

Segundo Rocha (2005) os poços construídos nesse aquífero são rasos, principalmente por conta do aumento do teor de cloreto que aumenta com a profundidade, constatado em diversos poços na Planície Costeira.

Para Rocha (2005) a recarga desse sistema é dada exclusivamente por chuva e perdas significativas por vazamentos na rede de distribuição de abastecimento d'água e saneamento

público, desempenhando um papel importante na recarga dos aquíferos Maceió e Marituba. Essa formação exerce a função de uma unidade de transferência para os aquíferos Coqueiro Seco, Maceió e Marituba.

Os valores hidrodinâmicos médios obtidos por ALAGOAS (2006) são transmissividade com $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade hidráulica de $1,2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, que caracteriza esse aquífero de baixa potencialidade.

Este aquífero é, entretanto, muito vulnerável à contaminação por águas salinizadas e/ou poluídas, em função de suas características de aquífero superficial raso e com horizontes muito permeáveis (ROCHA, 2005).

3.7.6 Aquífero Maceió

O aquífero Maceió ocorre como subafloramento na faixa paralela à costa em Maceió, com uma largura média de 15 km. Aflora raramente em alguns trechos do litoral norte e em alguns vales próximos à foz no Oceano Atlântico.

Possui um sistema hidráulico muito heterogêneo e anisotrópico, comportando-se ora como semiconfinado, ora confinado, dependendo da unidade que está sobreposta. Sua litologia varia bastante chegando a ser encontrado em sequência arenitos, folhelhos com intercalações de calcários e evaporitos, chegando a atingir mais de 1000 m de espessura na área de estudo. Embora se apresente como um aquífero de baixa potencialidade, com vazão específica média de $0,855 \text{ m}^3/\text{h/m}$ e vazão média de $25,509 \text{ m}^3/\text{h}$, vem sendo pouco explorado em função da qualidade da água de elevada dureza e cloreto, (ALAGOAS, 2005).

O Sistema Aquífero Maceió ocorre como subafloramento dos Sedimentos de Praia e Formação Barreiras. O caráter predominantemente argiloso da formação pode ser verificado a partir da bateria de poços existentes nos bairros do Pontal da Barra, Trapiche da Barra, Ponta Grossa e Prado e a sudeste na Ponta Verde.

Com base em dados de bombeamento de seis poços parcialmente penetrantes construídos nesse aquífero encontrou uma transmissividade média de $2,758 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e uma condutividade hidráulica de $5,062 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, confirmando a baixa potencialidade desse aquífero (ROCHA, 2005). Estudando os aquíferos litorâneos de Maceió, Cavalcante (1996) apud (ALAGOAS, 2005), encontrou para o aquífero Maceió, valores de transmissividade de $7,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividade hidráulica de $3,6 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, o que também confirma a baixa potencialidade desse aquífero.

Segundo (ALAGOAS, 2005) a recarga é por infiltração vertical, por meio dos clásticos da Formação Barreira e/ou Sedimentos de Praia e Aluvião, sendo insignificante a

contribuição por precipitação pluviométrica. Sua distribuição em sub-superfície indica a possibilidade de conexão hidráulica com o Oceano Atlântico e localmente com as areias basais dos Sedimentos de Praia e Aluvião.

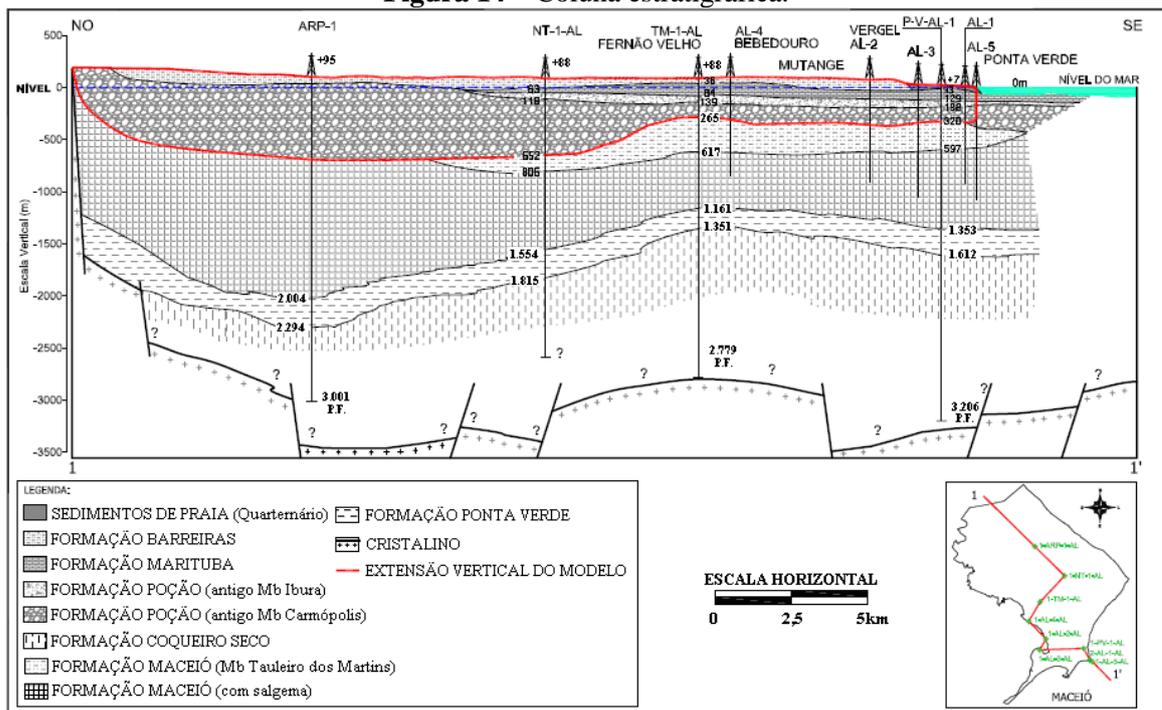
A recarga por infiltração pluviométrica é ínfima tendo em vista a pequena extensão dos afloramentos na área de estudo, em relação a sua área de subafloramento pré-Barreiras. Dessa forma, sua principal recarga ocorre por filtração vertical dos sedimentos da Formação Barreiras e por água superficial de alguns rios e/ou riachos do Maciço Pernambuco-Alagoas, que penetram na faixa sedimentar, alcançando-o.

É um aquífero de baixa potencialidade que vem sendo pouco explotado em função da qualidade da água de elevada dureza e cloreto, além de apresentar um sistema hidráulico muito heterogêneo e anisotrópico, comportando-se ora como semiconfinado, ora confinado, dependendo da unidade que está sobreposta (ROCHA, 2005).

Na planície costeira, esse aquífero encontra-se mais vulnerável às contaminações provenientes dos Sedimentos de Praia e Aluvião, decorrentes da rede de esgoto, galerias pluviais e salinização por intrusão marinha (ROCHA, 2005).

Segundo Rocha (2005) sua distribuição em sub-superfície indica a possibilidade de conexão hidráulica com o Oceano Atlântico, lagoa do Mundaú, e localmente com as areias basais dos Sedimentos de Praia e Aluvião, conforme observado nos perfis dos poços. A Figura 14 apresenta um detalhamento estratigráfico da área de estudo.

Figura 14 – Coluna estratigráfica.



Fonte: Adaptado de LIMA (1990) *apud* Nobre (2006).

3.8 Solos

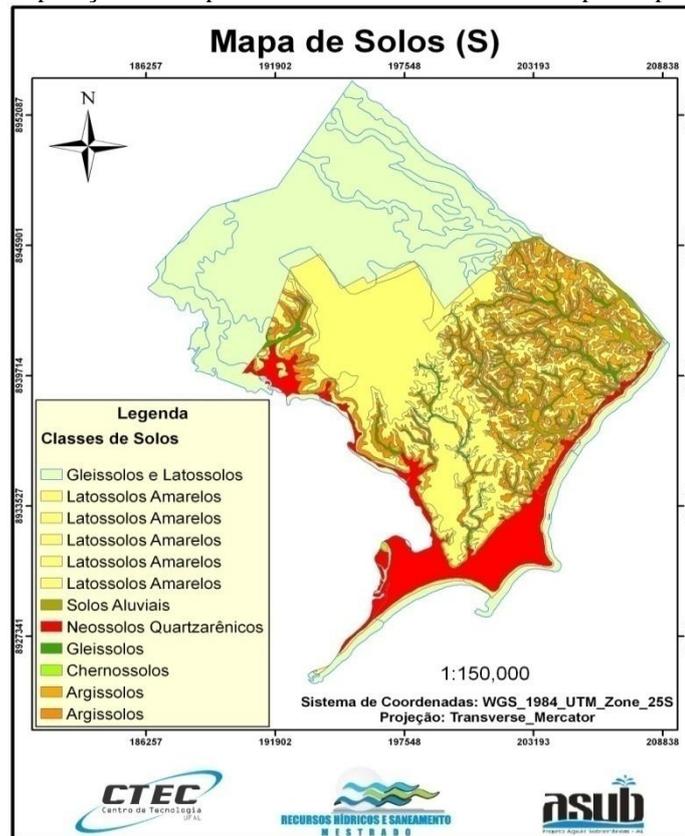
Em virtude da grande variedade litológica na área de estudo, há conseqüentemente uma ampla diversidade de solos (Latosolos, Argissolos, Gleissolos e Neossolos) que, atrelados aos demais fatores ambientais, exercem forte influência nos tipos de agriculturas presentes no espaço.

Esses grupos de solos estão associados aos fatores físicos-ambientais (localização na parte tropical do globo que predomina a ocorrência de Latossolos que interage com as classes de vegetação original representada pelas Florestas e pelos Cerrados) e paleoambientais (gênese da evolução) (ALAGOAS, 2005).

Os Latossolos são representados pelas superfícies aplainadas dos Tabuleiros, sobretudo nas bordas, estando na sua maior parte recoberto por canaviais. Já os Argissolos ocupam a segunda maior área, sendo também extensivo nos Tabuleiros, sendo associada às áreas de encostas, inclusive das depressões suavizadas dos platôs. Os Gleissolos e os Neossolos estão relacionados às áreas de planícies, com distribuições mais restritas, devido às condições geomorfológicas e litológicas (sedimentos holocênicos), entretanto os primeiros têm a sua distribuição ao longo dos canais de drenagem, compreendidos pelas várzeas laterais resultantes dos depósitos aluviais, sendo ocupadas pelos canaviais e pelas pastagens, enquanto que o segundo está distribuído nas planícies marinhas, representadas pelas restingas, por onde se estendem os coqueirais e as extensões urbanas (ALAGOAS, 2005).

O mapa de solos da área de estudo foi confeccionado a partir de dois mapas em escalas diferentes desenvolvidos pelo Centro Nacional de Pesquisa de Solos (EMBRAPA, 2005 e 2008). A Figura 15 a seguir apresenta o mapa de solos que foi utilizado na confecção do mapa de vulnerabilidade de aquíferos. Foram utilizados mapas de solos em escalas diferentes, em função da ausência de dados digitais para a área de estudo, ou seja, foi realizado uma união simples de mapas na escala de 1:100.000 com mapa na escala de 1:50000, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Sobreposição de mapas de solos da EMBRAPA adaptado para área de estudo.



Fonte: Adaptado da Embrapa (2005 e 2008) *apud* Autor (2013).

A maior parte da área de estudo é recoberta pelos Latossolos Amarelos e/ou Vermelho-Amarelo, em toda a região dos tabuleiros costeiros onde há a plantação de cana-de-açúcar. Para Demattê et al. (1996) o solo da região apresenta características mais argilosas de baixa saturação por bases, elevado teor de alumínio, podendo ter severas deficiências de micronutrientes principalmente cobre e zinco.

Nos vales fluviais e depressões apresentam-se solos Podzólicos Acinzentado ou Podzois nas áreas mais íngremes. De acordo com Demattê et al. (1996), nas áreas menos deprimidas e de boa drenagem, os chamados Tabuleiros Costeiros, apresentam os Latossolos Amarelo de textura argilosa a muito argilosa.

3.9 Vegetação

Com o processo de antropização da área de estudo, a flora original (Mata Atlântica) foi substituída em sua maior parte pela agricultura da cana-de-açúcar, pela pecuária e extração de madeira que reduziu a vegetação original a pequenos remanescentes que geraram desequilíbrios ecológicos. Sobre a atual situação da vegetação de Maceió (COSTA & RAMOS, 2004, p. 197-198), afirma que:

A cobertura vegetal encontra-se completamente devastada. A vegetação litorânea praticamente não existe; manguezais como o da lagoa da Anta foram exterminados, dando lugar a um estabelecimento hoteleiro. Outras formações como floresta e cerrado que ocorriam no planalto também foram desmatadas para dar lugar a conjuntos habitacionais, residências ou implantação de indústrias. Restam ainda na orla litorânea coqueirais e alguns resquícios de vegetação de restinga. No planalto, são encontrados alguns sítios e encostas com uma mata secundária, que vem sendo alvo do fogo, e uma vez queimadas, são rapidamente ocupadas pela população de baixa renda, ou sem renda, que não tendo outra opção, ali se instalam, apesar dos riscos a que se expõem.

As áreas com vegetação original localizadas na área de estudo são de responsabilidade de manutenção dos órgãos ambientais como o Instituto do Meio Ambiente de Alagoas (IMA) e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), além de áreas de usos particulares de relevada inclinação, ou seja, acima de 45° de inclinação.

Na área de estudo a Floresta Ombrófila compreende a porção leste da área de estudo, enquanto que a Floresta Semidecidual ocupa o lado oeste, compreendendo as áreas das nascentes dos rios que compõem a rede hidrográfica local, entretanto, vale salientar que, apesar do grande avanço dos desmatamentos generalizados, no interior de cada uma delas ainda são encontrados remanescentes dessas referidas formações (ALAGOAS, 2005).

De acordo com Rocha (2005) a vegetação da área estudada é normalmente monótona, com o domínio das florestas de subperenifólia e os cerrados nos tabuleiros costeiros, já na faixa litorânea é caracterizada por campos e florestas de perenifólia de restinga e várzeas, podendo ser encontradas localmente as formações vegetais de dunas.

3.10 Restrições de Uso e Ocupação do Solo da área de estudo.

Com o crescimento urbano desordenado, motivado pelos fortes investimentos no setor imobiliário que está em plena expansão, há a necessidade de se planejar a ocupação do solo na área de estudo. Para tanto, tem-se observado a estrutura legal que rege a forma de ocupação da área de estudo, como a Lei municipal nº 5486/2005, que institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Territorial de Maceió, principal instrumento da política de desenvolvimento urbano e ambiental do município, baseado no Estatuto das Cidades Lei Nº 10.257/2001.

De acordo com (ALAGOAS, 2005) a Região Metropolitana de Maceió vem sofrendo um processo de expansão urbana, que está ocasionando uma pressão sobre as áreas exploradas pela agricultura da cana e a pecuária, ou seja, onde anteriormente havia cana-de-açúcar e criação de animais de pequeno porte, vem sendo gradativamente ocupada por prédios residenciais e comerciais, fato que pode ser observado na região do aeroporto de Zumbi dos Palmares e do bairro do Benedito Bentes. Tal fenômeno pode ser caracterizado pela redução

da área plantada e pelo aumento da produtividade com a introdução de novas técnicas de plantio, utilização de novas variedades e, principalmente, com a prática da irrigação.

Para Tavares (2008), os aspectos socioeconômicos da cidade de Maceió têm influenciado sua urbanização, fazendo com que a população de baixa renda migre para favelas, vales que cortam os planaltos, encostas e áreas alagadiças às margens da Laguna Mundaú. Além da migração da população, há também de setores da economia como o comércio e indústrias para o interior do município, abrangendo áreas além dos limites do centro da cidade, como os bairros do Farol, Tabuleiro dos Martins e Benedito Bentes, os quais têm ampliado cada vez mais sua população e fontes de renda.

A Lei municipal nº 5.593/2007a, dentre outras coisas, institui o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió e estabelece o zoneamento da cidade de acordo com os parâmetros de macrozoneamento do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (Lei Municipal nº. 5.486/2005). Este Código de Urbanismo tem como algumas diretrizes (Art. 2º), a “compatibilização do uso, da ocupação e do parcelamento do solo” e a “regulação do sistema individual de saneamento básico, de modo a evitar a contaminação do lençol freático”.

O Plano Diretor de Maceió é o principal instrumento da política de desenvolvimento urbano e ambiental do município, estabelecendo as diretrizes gerais do desenvolvimento urbano. O plano diretor tem como premissas em seu Art. 3º § III e IV, respectivamente a “*proteção ao meio ambiente*” e a “*gestão integrada e compartilhada do desenvolvimento de Maceió*”, ou seja, visa desenvolver integralmente a cidade, mas sem deixar de proteger o meio ambiente.

O Art. 19 do Plano Diretor organiza o território municipal tendo como referência o Sistema Ambiental de Maceió, sendo composto pelo patrimônio natural e cultural, do sistema municipal de saneamento ambiental e do sistema municipal de meio ambiente.

Já o Art. 27 do Plano Diretor traz algumas diretrizes para a gestão do patrimônio natural de Maceió como a preservação das áreas florestadas nas encostas, ao longo dos cursos d’água e de linhas de drenagem natural e dos remanescentes de mangues, várzeas, dunas, mata atlântica e restinga, da recuperação e adequação de áreas ambientalmente frágeis e de preservação permanente como: nascentes e foz dos rios e riachos; laguna Mundaú e a boca da barra; recarga dos aquíferos; orla lagunar e marítima; e encostas com declividade igual e superior a 45°, e adequação da ocupação urbana à proteção de mananciais, das áreas de recarga dos aquíferos e dos locais de captação superficial de água.

O Plano Diretor de Maceió divide em zonas a região metropolitana, identificando locais que podem ou não ser ocupados. Há, no entanto, Zonas de Interesse Ambiental e

Paisagístico (ZIAPs) como os terrenos de marinha do litoral e da lagoa Mundaú, as encostas com declividade igual ou superior a 45°, as Áreas de Proteção Ambiental do Pratagy e de Catolé e Fernão Velho, a ponta da restinga no Pontal da Barra, contendo o Complexo Cloroquímico com o Cinturão Verde, a faixa de proteção de 30 metros das margens dos cursos d'água, os remanescentes de Mata Atlântica do bairro Benedito Bentes, o Parque Municipal de Maceió, e a Reserva Florestal do IBAMA com o horto florestal, que não devem ser ocupados por serem “*áreas de especial importância ambiental, em face de sua relevante contribuição para o equilíbrio ecológico*” Art. 31.

A Política Habitacional de Maceió, conforme Art. 92 do Plano Diretor, estabelece diretrizes e estratégias de ação objetivando reduzir o déficit das necessidades habitacionais e conter a produção de moradia irregular, sendo implementadas por meio de programas e projetos habitacionais nas áreas indicadas como Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), elevando a qualidade de vida da população.

As ZEIS não serão implantadas em áreas não antropizadas e ambientalmente frágeis, sobre terrenos de absorção de águas pluviais e alimentação do lençol freático, sobre encostas com declividade superior a 30°, que apresentem alto risco à segurança de seus ocupantes.

A cidade de Maceió, que ocupa cerca de 83% da área de estudo, apresentava índices de tratamento de esgoto da ordem de 27% Casal (2012) e com a conclusão das obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC I) na capital, esse valor está sendo ampliado para 40% (obras em fase de conclusão). As obras estão sendo realizadas e gerenciadas pela Secretaria de Estado da Infraestrutura (SEINFRA). Tal fato evidencia os riscos que os aquíferos da região estão submetidos ao longo dos anos e dos diversos usos do solo da área, como comércios variados (postos de combustíveis e cemitérios), áreas residenciais e agrícolas.

Todas as diretrizes e fiscalizações têm, dentre outros objetivos, o de preservar a quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas, por serem fontes de desenvolvimento socioeconômico e cultural. Para isso deve-se conhecer, mapear e definir zonas de restrição de uso e ocupação do solo, que também pode ser realizado através da elaboração de mapas de vulnerabilidade de aquíferos. Daí a importância do presente trabalho.

No zoneamento da vulnerabilidade de determinada área, os aquíferos que são considerados como de menor vulnerabilidade à contaminação, em termos gerais, tendem a ser os mais difíceis de serem reabilitados, uma vez contaminados (FOSTER, 1993).

4. METODOLOGIA

A determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos foi realizada através de métodos indexadores, onde os parâmetros hidrogeológicos, fisiográficos e antrópicos foram qualificados e quantificados, ou seja, foram caracterizados através da atribuição de índices e conseqüentemente pesos.

Visando a caracterização hidrogeológica da área de estudo foi realizada uma avaliação dos perfis de poços disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), pelo Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e pela Companhia de Saneamento de Alagoas (CASAL). Dessa forma, foi elaborada uma primeira catalogação e avaliação dos parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica, transmissividade e armazenamento específico) dos poços cadastrados, sendo observadas ainda sua localização, quantidade, nível estático e as profundidades dos poços e aquíferos presentes.

O levantamento dos poços para posterior cadastramento, teve por base os seguintes critérios:

- ❖ Ter descrição de perfil litológico;
- ❖ Possuir nível estático;
- ❖ Conter coordenadas geográficas;

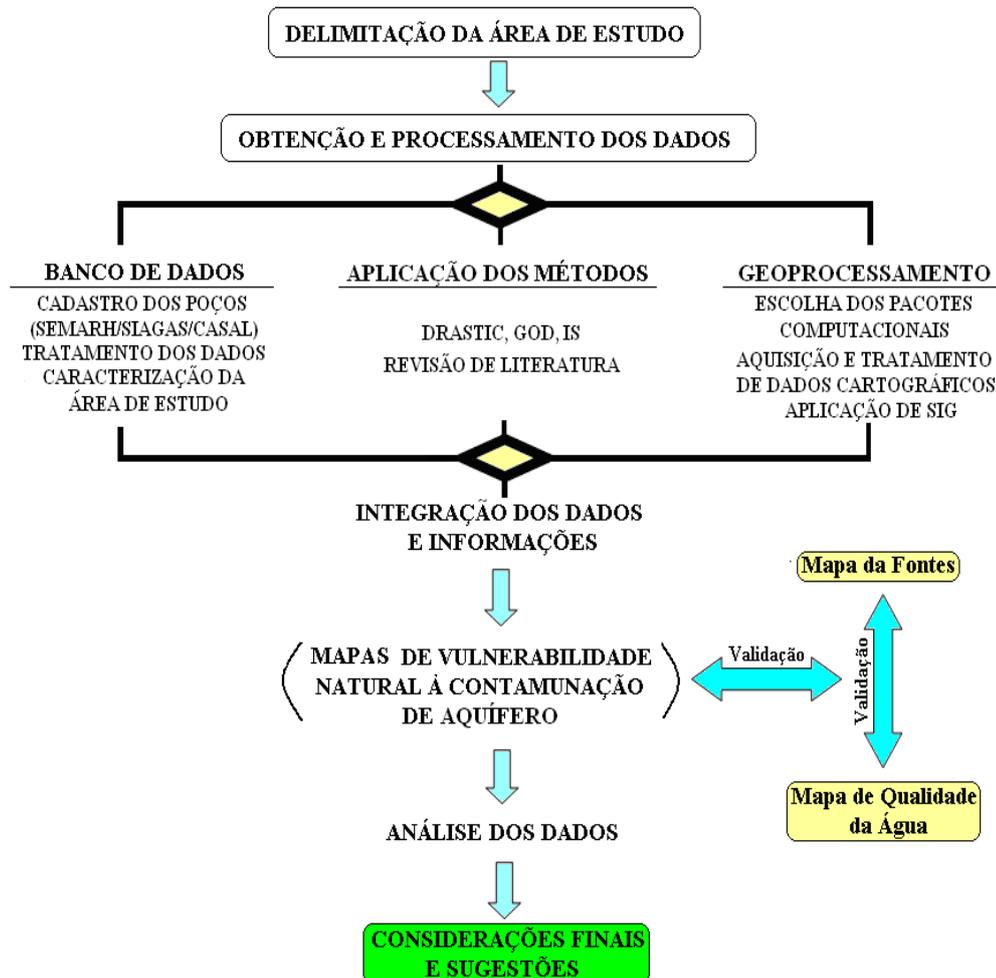
Foram selecionados e analisados um total de 417 poços na área de estudo. Os poços cadastrados apresentaram perfurações que penetram as Formações dos Sedimentos de Praia e Aluvião, Barreiras, Marituba, Maceió e Poção. A maior parte dos poços encontra-se localizadas na zona de afloramento da Formação Barreiras.

Durante o processo de análise e leitura dos perfis dos poços, foi definida uma rede de poços, que foram monitorados pelo Projeto ASUB (2011) para aquisição de níveis estáticos, condutividades hidráulicas e qualidade da água, como forma de validação dos mapas gerados.

Vale salientar que não fizeram parte dos critérios de formação do cadastro dos poços a possibilidade do proprietário do poço permitir o acesso a coletas atuais de dados e nem a unidade aquífera explorada.

Para o alcance dos objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizados alguns procedimentos metodológicos, descritos a seguir juntamente com os materiais a serem utilizados. A Figura 16 apresenta um fluxograma (mapa conceitual) de desenvolvimento da presente pesquisa, sendo melhor detalhado na seqüência.

Figura 16 – Fluxograma das etapas de trabalho desenvolvidas nesta pesquisa.



Fonte: Autor, 2013.

O processamento dos dados extraídos dos relatórios de perfurações dos poços no presente estudo foi promovido através do georreferenciamento das informações (SIG) e cruzamento dos dados para elaboração de mapas temáticos na escala de 1:150.000 e posterior comparação entre os mesmos.

Foram utilizados dois *softwares* para conversão de dados e análise, como o ArcGis versão 9.3 da ESRI aplicando as extensões ARCMAP, ARCVIEW, ARCCATALOG e ARCTOOLBOX e o VISTA SAGA (Sistema de Análise Geo-Ambiental 2007), *software* gratuito do Laboratório de Geoprocessamento da UFRJ, utilizando os módulos de visualização, criação e análise de *rasters*. Além do *Google Earth* para visualização e localização dos potenciais focos de contaminação.

As principais atividades executadas foram:

- Pesquisa da base de dados e atributos;
- Conversão de formatos matriciais para vetoriais;

- Atribuição de parâmetros e valores;
- Sistema de análise geográfica e geoestatística;
- Álgebra de mapas;
- Criação de superfícies a partir de dados matriciais;
- Sistema de exposição cartográfica;
- Importação e exportação de mapas.

O sistema de coordenadas utilizado foi o *Universal Transverse Mercator* (UTM), estando a área de estudo situada no fuso 25 S. As coordenadas empregadas na confecção dos mapas são oriundas do datum *World Geodetic System* (WGS-84).

4.1 Procedimentos para o cálculo do Índice DRASTIC

A metodologia de avaliação de vulnerabilidade DRASTIC, desenvolvido por Aller et al. (1987), foi calculada através da soma ponderada dos sete parâmetros hidrogeológicos, aos quais foram atribuídos valores de 1 a 10, a depender da faixa de valores e com base no índice de contaminação da água subterrânea. Posteriormente são multiplicados por um Peso Relativo (p), que varia entre 1 a 5, sendo o peso 5 mais significativo, já descrito anteriormente. A Equação 1 a seguir calcula o índice DRASTIC:

$$\text{Índice DRASTIC} = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + IpIc + CpCc \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip, Cp = são os pesos dos fatores DRASTIC na equação;

Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic, Cc = são os índices (notas atribuídas aos parâmetros) das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência. Através da soma dos produtos dos pesos e notas de cada índice é gerado o mapa de vulnerabilidade DRASTIC.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros do Índice DRASTIC e seus respectivos fatores de ponderação, utilizados na quantificação da vulnerabilidade natural de aquíferos.

TABELA 3 – Parâmetros e pesos relativos do Índice DRASTIC

Parâmetros		Pesos Relativos (p)
(D)	Profundidade da zona não-saturada do solo	5
(R)	Recarga do aquífero	4
(A)	Material do aquífero	3
(S)	Solos	2
(T)	Topografia	1
(I)	Impacto da zona não saturada	5
(C)	Condutividade hidráulica	3

Fonte: Aller et al. (1987).

Esses fatores de ponderação (pesos) variam de 1 a 5 sendo fundamentais na aplicação da metodologia DRASTIC. Quanto menor o peso, menor o grau de importância para determinação da vulnerabilidade. Dessa forma, os parâmetros de nível estático e impacto da zona não saturada são os parâmetros mais relevantes enquanto que a topografia é o parâmetro de menor valia para o método.

4.1.1 Parâmetro D

Por receber Peso Relativo 5, o parâmetro Nível Estático é o de maior importância para a determinação da vulnerabilidade natural determinada pelo método DRASTIC, juntamente com o parâmetro Impacto da Zona não Saturada.

Como a maior parte da área de estudo encontra-se sob afloramento dos aquíferos Barreiras e Sedimentos de Praia a Aluvião, ambos os aquíferos são predominantemente livre, portanto, a profundidade do topo do aquífero refere-se à profundidade do nível estático (NE).

A profundidade do nível estático foi extraída dos perfis de poços perfurados na área de estudo. Como critério base para confecção desse parâmetro foram catalogados poços com data de perfuração entre os anos 2000 e 2010, perfazendo um total de 111 poços. Na Tabela 4 são apresentados os intervalos de classes das profundidades do lençol freático.

TABELA 4 - Classes de profundidade do nível d'água com seus pesos e índices.

Profundidade do Lençol Freático (D)		
Profundidades (m)	Peso (p)	Índice (c)
< 1,5	5	10
1,5 – 5	5	9
5 – 10	5	7
10 - 15	5	5
15 - 23	5	3
23 - 30	5	2
> 30	5	1

Fonte: Aller et al. (1987).

De posse desses dados foi realizada uma plotagem dos pontos na área de trabalho, sendo interpolado através do software Arc Gis 9.3 através do método IDW no Arc Toolbox – Spatial Analyst Tools – Interpolation – IDW e consequentemente reclassificado no mesmo ambiente do ArcGis (Reclass – Reclassify).

4.1.2 Parâmetro R

A recarga é a quantidade de água que passa pela zona de recarga, e chega ao lençol freático, ou seja, é a água que passa da superfície do terreno para o interior do solo, alcançando a zona saturada. Nesse trajeto pode transportar solutos no meio poroso. Portanto,

considera-se que quanto maior a recarga, maior a possibilidade de transportar contaminantes que afetem as águas subterrâneas.

É sabido que a recarga na região se dá pela infiltração pluviométrica direta, pela transferência de fluxos subterrâneos de sistemas aquíferos sobrepostos e pelas atividades adicionais urbanas e agrícolas. Nesse sentido, foram catalogados e discretizados os dados de chuva dos postos pluviométricos, de acordo com a equação 2 que também integra a recarga final valores de infiltração a partir dos diversos usos do solo.

Os valores de precipitação, juntamente com os valores adotados para os diversos usos do solo, foram integrados em forma digital, mapas georreferenciados no *software* Arc Gis 9.3. A equação 2 evidencia a proposta metodológica descrita por Nobre (2006).

$$\mathbf{R = 10\%P + R_A} \quad \mathbf{Eq. 2}$$

Onde:

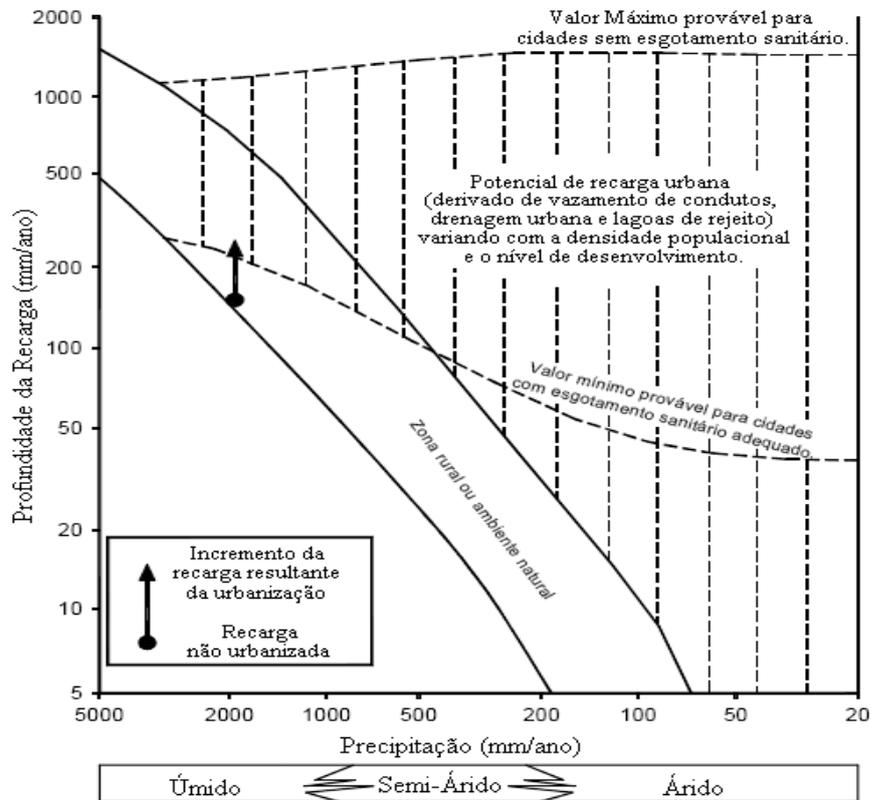
- R – Valor de recarga do aquífero em mm/ano;
- 10% - Percentual de precipitação total anual que efetivamente infiltrará no subsolo;
- R_A – Contribuição da recarga artificial do aquífero, devido o uso do solo (300mm/ano para recarga urbana e 100mm/ano para recarga agrícola).

O valor de 10% não é aleatório e consiste da aplicação da metodologia de separação de hidrogramas para cálculo de recarga em bacias hidrográficas, sendo adequado para trabalhos acadêmicos, conforme estudos pretéritos de Reese et al. (2005) e Szilagyi et al. (2003) *apud* (NOBRE, 2006).

Da mesma forma, os valores de recarga artificial adotados, da ordem de 300mm/ano e 100mm/ano, não foram aleatórios. Foster et al.(1999) obtiveram valores de recarga em áreas urbanizadas da América Latina e Ásia que oscilam de 300 a 700 mm/ano, independentemente da situação climática. Wahnfried e Hirata (2005) e Reese et al. (2005) *apud* (NOBRE, 2006) acharam valores próximos àqueles mencionados por Foster et al. (1999) e Hirata et al. (2002) registrando uma recarga urbana de 282 mm de recarga em 5 meses de pesquisa, utilizando o método da variação do nível de água, usando as oscilações episódicas.

Dessa forma a integração de dados de precipitação com os de uso e ocupação do solo são de grande valia para a determinação da recarga na área de estudo. A seguir é apresentada a Figura 17 que descreve o potencial de recarga em áreas agrárias e urbanas.

Figura 17 – Potencial aumento da infiltração em aquíferos urbanos semi-confinados.



Fonte: Foster et al., 1999)

Cavalcante (1982) afirma que a pluviometria média anual na área de estudo é da ordem 1700 mm/ano sendo a taxa de infiltração de 30% do volume precipitado, ou seja, 510 mm/ano, correspondendo aproximadamente à metodologia proposta nesse trabalho. Como a precipitação média da região é de aproximadamente 2000 mm/ano e encontra-se em área urbanizada, então a recarga é superior a 300 mm/ano, validando as respostas encontradas na metodologia proposta por Nobre (2006).

A impermeabilização da superfície é um fator redutor da recarga. No entanto, em uma área urbanizada, esta tende a ser maior do que em uma área equivalente sem impermeabilização, devido às perdas de água pela rede de água e esgoto, irrigação de jardins, entre outros (FOSTER *et al.*, 1999).

O mapa de recarga foi gerado a partir da coleta e análise de dados das precipitações dos postos pluviométricos localizados na área de estudo. A base de dados adquiridos foi através da SEMARH-AL e HIDROWEB-ANA.

Através do cálculo de precipitação total anual, foi determinada a média da precipitação anual e extraído respectivamente 10% dessa média para confecção do mapa de distribuição espacial, através do método de interpolação IDW.

A partir desse mapa, e tomando como base o mapa de uso e ocupação do solo, foram identificadas áreas que realmente correspondem a atividades humanas agrárias ou de uso urbano, essencial para adicionar o valor de recarga, no mapa final.

Com a reclassificação do mapa de uso e ocupação do solo, foram criados novos campos (*fields*) formando arquivos (*shapes files*) da área de estudo com apenas valores de recarga de 100 mm e 300 mm de recarga. Esse mapa foi cruzado (somado) com o mapa de distribuição espacial de 10% da precipitação média, gerando o mapa final de recarga.

De posse deste mapa foram aplicadas suas respectivas notas (índices c) e fator de ponderação (Pesos Relativos) conforme descrito na tabela 5

TABELA 5 - Classes de recarga com seu fator de ponderação e respectivos índices.

Recarga (R)		
Recarga (mm)	Peso (p)	Índice (c)
0 - 50	4	1
50 - 100	4	3
100 - 180	4	6
180 - 255	4	8
> 255	4	9

Fonte: Aller et al. (1987).

4.1.3 Parâmetro A

O material do aquífero (**A**) refere-se à litologia da zona saturada da unidade litoestratigráfica, conforme apresentado na Tabela 6. Para Monteiro et al. (2008) a zona saturada apresenta características como transmissividade, condutividade hidráulica, porosidade efetiva, arranjo e granulometria dos grãos que definem o tamanho dos poros, parâmetros fundamentais no transporte e propagação de poluentes.

O limite entre a zona saturada e a zona insaturada ou zona vadosa é a superfície freática ou nível d'água. A zona saturada por sua vez é o intervalo no qual os poros do solo ou da rocha estão completamente repletos, cheios, de água (COLERIDGE, 2006).

Para Camponogara (2006) o meio aquífero (**A**) é definido a partir de unidades geológicas e hidrogeológicas, podendo ser associadas aos tipos de aquíferos existentes (Livre, Confinado e Semi Confinado). Entretanto, há de ser feita uma ressalva para a difícil determinação dos aquíferos confinantes na área de estudo, ocorrendo apenas pequenas lentes de argila não caracterizando o aquífero por completo como confinado. Na maior parte da área de estudo tem-se aquíferos livre e semilivre. A depender da análise litoestratigráfica pode-se identificar lentes de argila espessas que tornam o aquífero confinado ou semi-confinado.

TABELA 6 – Descrição do material do aquífero com seus Pesos Relativos e índices.

Material do Aquífero (A)		
Descrição	Peso (p)	Índice (c)
Folhelho argiloso, argilito	3	1-3 (2)
Rocha Metamórfica Sã/Ígnea	3	2-5 (3)
Rocha Metamórfica/Ígnea alterada	3	3-5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificados	3	5-9 (6)
Arenito maciço	3	4-9 (6)
Calcário maciço	3	4-9 (6)
Areia	3	4-9 (8)
Basalto	3	2-10 (9)
Calcário cárstico	3	9-10 (10)

Fonte: Aller et al. (1987).

As notas (índices c) adotadas nos parâmetros do material do aquífero variaram em decorrência do tipo do aquífero, ou seja, nas formações Quaternária Sedimento de Praia e Aluvião(QSPA), Poção e Maceió as Areias e Pedregulhos receberam nota 6 já nas formações Barreiras e Marituba as Areias e Pedregulhos receberam nota 8. As argilas, folhelhos e calcários receberam nota 6 em todas as formações geológicas.

Os valores atribuídos para o meio aquífero correspondem a menor ou maior capacidade de atenuação de poluentes do aquífero, já que é função do material que o constitui. Dessa forma, materiais mais grosseiros ou fraturados possuem menor capacidade de atenuação de poluentes, recebendo as maiores notas (índices c).

4.1.4 Parâmetro S

Para a atribuição do índice do parâmetro Solo (S), demonstrados na Tabela 7, de acordo com a descrição da metodologia DRASTIC, que apresenta os tipos de solos com seus respectivos Pesos relativos e Índices foram aplicados de acordo com a variação textural.

TABELA 7 – Descrição dos solos com seus respectivos índices e pesos.

Tipos de Solos (S)		
Descrição	Peso (p)	Índice (c)
Fino ou ausente	2	10
Saibro	2	10
Areia	2	9
Turfa	2	8
Argila expansiva e/ou agregada	2	7
Franco arenoso	2	6
Franco silto	2	4
Franco argiloso	2	3
Calcário	2	2
Argila não agregada e não expansível	2	1

Fonte: Aller et al. (1987).

A atribuição de Peso Relativo 2 reflete o grau de importância do parâmetro para a determinação da vulnerabilidade geral da área de estudo. Vale lembrar que os Pesos Relativos variam de 1 a 5, onde o maior valor corresponde a maior capacidade de impactar o sistema aquífero.

Os valores atribuídos aos índices neste parâmetro foram baseadas na tabela de atributos do mapa de solos do Zoneamento Agroecológico de Alagoas (EMBRAPA, 2008) e da tabela de atributo dos solos identificados pelo projeto RADAM BRASIL, década de 1970, disposto no acervo da biblioteca digital da Universidade de São Paulo. Para Heath (1983), quanto maior a granulometria de um solo, maior a sua permeabilidade. De posse dessas informações foi realizada uma coleta de dados (mapas digitais de solos) da área de estudo. Diante das dificuldades na aquisição dos mesmos, conseguiu-se apenas duas bases de mapas da EMBRAPA, sendo que em escalas diferentes. O primeiro na escala de 1:100.000 que é o ZAAL e o segundo na escala de 1:50.000.

O mapa na escala maior (1:50.000) abrange a maior parte da área de estudo, ocupando a quase totalidade da área urbanizada e asfaltada além dos vales fluviais em seu médio e baixo curso. Enquanto que o mapa em escala menor (1:100.000) abrange a região ocupada pela agricultura canavieira em maior parte e a fase inicial (juvenil) dos rios. Dessa forma foi realizada uma composição de mapas (união) através do *Software Arc Gis 9.3* na aba Arc Toolbox – 3D Analyst Tools – Overlay – Union.

Após a união dos mapas de solos em escalas diferentes partiu-se para a reclassificação das classes de solos adotada pela EMBRAPA, já que a metodologia original DRASTIC não corresponde ao método de classificação brasileira de solos, apresentando inclusive nomenclaturas diferentes.

Para realização deste procedimento a composição dos mapas de solos da área de estudo foi adaptada a partir das características texturais dos solos da área de estudo, buscando-se aproximar ao máximo das características da metodologia proposta do índice DRASTIC.

No parâmetro de solo (**S**) foi analisada a composição textural ou caracterização granulométrica, ou seja, os teores de silte, argila e areia, sendo obtidos a partir de dados de solos brasileiros do projeto RADAM BRASIL da década de 1970, sendo que os dados foram catalogados no site da biblioteca digital da Universidade de São Paulo. Essa forma de reclassificação se assemelha à metodologia DRASTIC, já que possui características texturais com franco arenoso, siltoso e arenoso, além de areia e argila.

O projeto RADAM BRASIL classificou os solos de todo o território nacional quanto as suas texturas, com isso, conseguiu-se uma correlação entre as classificações de solos

propostas pelo índice DRASTIC com a classificação brasileira de solos. Segundo Santos (2005) quanto maior a espessura e mais fina sua textura, maior será a garantia de proteção dos solos para com os aquíferos.

4.1.5 Parâmetro T

A metodologia proposta descreve as classes de declividade pretendidas para a atribuição de índices (c) e Pesos Relativos (p), para posterior álgebra de mapas. A Tabela 8 descreve as classes predeterminadas.

TABELA 8 – Classes de declividade com seus pesos e índices.

Topografia (T)		
Declividade (%)	Peso (p)	Índice (c)
< 2	1	10
2 - 6	1	9
6 - 12	1	5
12 - 18	1	3
> 18	1	1

Fonte: Aller et al. (1987).

Inicialmente foi catalogada a base SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), AL SC-25-V-C da área de estudo, em seguida foi extraída a área de estudo (Arc GIS 9.3 – Arc Toolbox > Extraction > Extract By Mask) e as curvas de nível (Arc Toolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Contour).

Posteriormente foi gerado o Modelo Digital do Terreno (MDT) através da aplicação do método Triangular Irregular Networks (TIN) que interpola as altitudes por triangulação de vários pontos (vértices). Para a criação do TIN foram utilizadas as ferramentas: 3D Analyst; Create / Modify TIN; Create TIN from Features).

De posse do mapa do (MDT), foram geradas as declividades (SLOPE > PERCENT) sendo reclassificadas as classes em porcentagem de declive conforme a Tabela 8, sendo atribuído seus respectivos índices (c) e Pesos Relativos (p).

O método de inclinação é proveniente do ângulo de inclinação entre a superfície e um plano horizontal, podendo ser analisado em graus ou porcentagem. A declividade em porcentagem é obtida pela variação de altura dividida pela mudança na distância horizontal, multiplicado por 100, conforme a Equação 3.

$$\text{Declive} = \arctan \left(\frac{A}{dX} \right) \times 100$$

Eq. 3

Apesar de todo o tratamento necessário para a geração do mapa de declividade, este parâmetro tem a menor relevância de todos os parâmetros da metodologia DRASTIC, já que recebe Peso Relativo 1.

4.1.6 Parâmetro I

O impacto da zona não saturada (I) está relacionado ao tipo de material que a compõe, afetando o tempo de penetração de uma pluma contaminante no meio aquífero. Essa demanda de tempo necessária para a penetração do poluente pode atenuar o processo de contaminação das águas subterrâneas através, por exemplo, do processo de biodegradação.

Assim, a Tabela 9 mostra os materiais que compõem este parâmetro e suas principais características.

TABELA 9 – Tipos de materiais com seus respectivos pesos e índices.

Impacto da Zona Não Saturada (I)		
Descrição	Peso (p)	Índice (c)
Camada confinante	5	1
Argila/Silte	5	2-6 (3)
Xisto	5	2-5 (3)
Calcário	5	2-7 (6)
Arenito	5	4-8 (6)
Intercalações de Arenito, Calcário e Argilito estratificado	5	4-8 (6)
Areias e Pedregulhos Siltosos e Argilosos	5	4-8 (6)
Rocha Metamórfica e Ígnea Intrusiva	5	2-8 (4)
Areias e Cascalhos	5	6-9 (8)
Basalto	5	2-10 (9)
Calcário Cárstico	5	9-10 (10)

Fonte: Aller et al. (1987).

Foram atribuídos índices de 0 a 10 de acordo com cada camada litoestratigráfica descrita nos perfis dos poços tubulares. Para atribuição de um índice único por poço tubular foi realizada uma média ponderada do tamanho das camadas litológicas multiplicando pelos índices atribuídos sendo dividido por uma soma do produto do tamanho das camadas, conforme descrito na Equação 4.

$$\text{SOMAR_PRODUTO} = \frac{\text{L_Camadas} \times \text{Ind_Litológico}}{\text{Soma(L_Camadas)}} \quad \text{Eq.4}$$

Onde: L é o comprimento das camadas litoestratigráficas; Ind_Litológico é o índice atribuído de acordo com proposta metodológica descrita na Tabela 10.

A média ponderada de cada poço da camada litológica não saturada foi interpolada para a área de estudo. Após a aplicação das notas para cada poço, foram ponderadas (Peso

Relativo 5) e conseqüentemente interpolados para confecção do mapa de vulnerabilidade que em contato com os demais mapas da metodologia DRASTIC proposta, gerou o mapa de vulnerabilidade intrínseca.

Esse fator de ponderação (5) reflete o grau de importância do parâmetro para o resultado final da metodologia. Dessa forma, o parâmetro é considerado de alta valia para o método proposto, juntamente com o parâmetro de profundidade do nível estático.

4.1.7 Parâmetro C

A condutividade hidráulica quantifica a facilidade com que o aquífero transmite água em meio poroso, dessa forma, quanto maior for à condutividade, maior será a taxa de transporte no meio aquífero. Este parâmetro tem um valor muito significativo, pois está relacionado ao fluxo horizontal e vertical da formação aquífera, determinando a maior ou menor facilidade de deslocamento do contaminante (SANTOS, 2010). A Tabela 10 apresenta as classes de condutividade hidráulica que foram adotadas neste trabalho.

TABELA 10 – Classes de condutividade hidráulica com seus pesos e índices.

Condutividade Hidráulica (C)		
Condutividade (cm/s)	Peso (p)	Índice (c)
0,00004 – 0,004	3	1
0,004 – 0,012	3	2
0,012 – 0,028	3	4
0,028 – 0,04	3	6
0,04 – 0,08	3	8
> 0,08	3	10

Fonte: Aller et al. (1987).

O Peso Relativo (3) atribuído ao parâmetro condutividade hidráulico é intermediário na escala de importância para determinação da vulnerabilidade hidráulica, já que os pesos variam de 1 a 5 conforme o método DRASTIC.

Os dados de condutividade hidráulica foram determinados através dos testes de bombeamento dos poços tubulares, exigidos pela SEMARH/AL a todos os usuários que buscam a obtenção da outorga de direito de uso das águas subterrâneas.

Para este trabalho foram utilizados dados de condutividade hidráulica de 100 poços inseridos na região de estudo e interpolados através do método IDW para toda a RMM. Vale salientar que essas condutividades são pontuais e não dispostas uniformemente no espaço.

4.2 Procedimentos para o cálculo do Índice GOD

Para o cálculo do Índice GOD, foram determinadas as coordenadas em UTM (Datum SAD 69) para cada poço, a tipologia do aquífero em que este poço está inserido, juntamente com a litologia e a profundidade do nível estático.

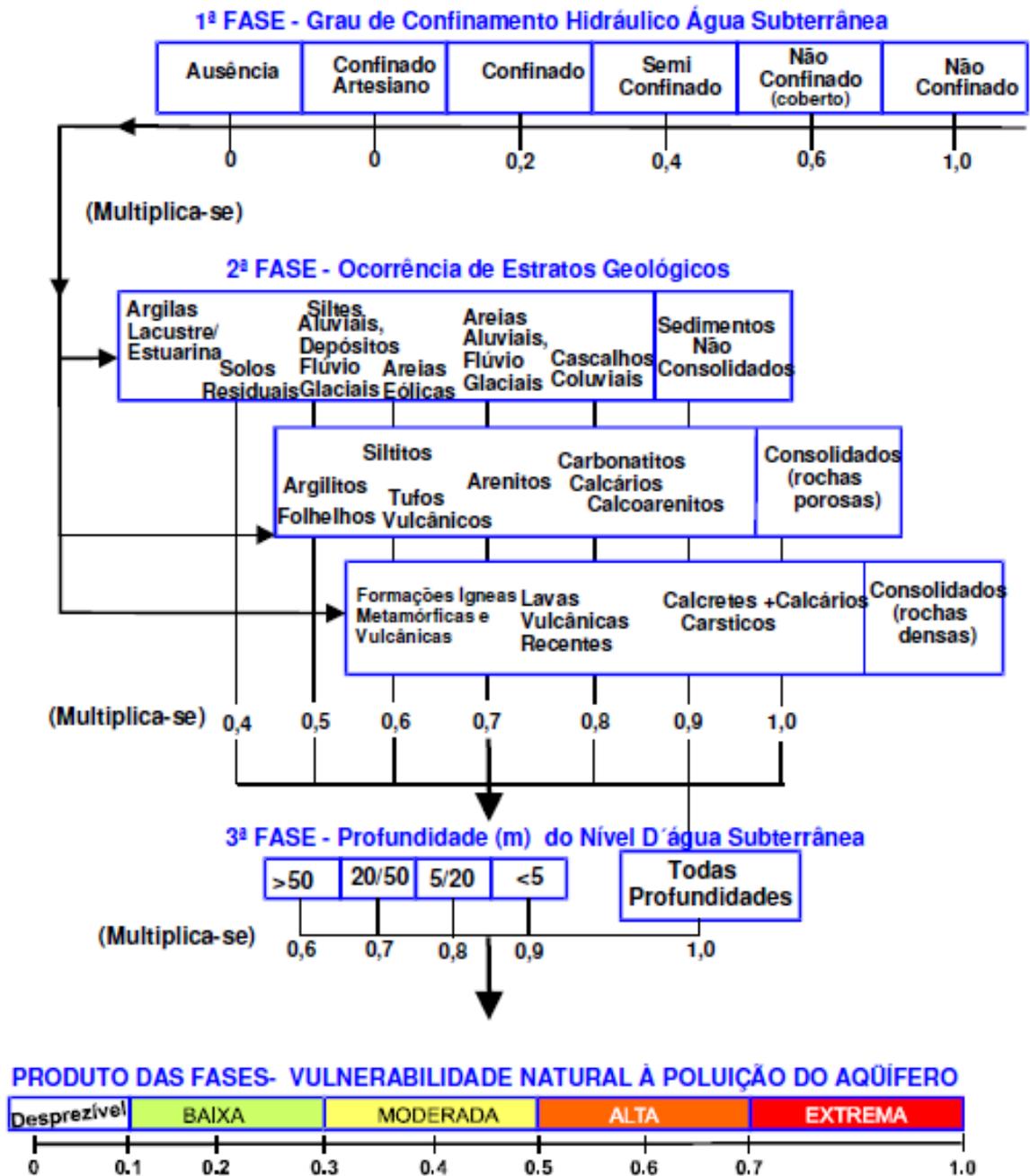
A partir da análise e interpretação das fichas cadastrais dos poços, fornecidas pela SEMARH-AL, CASAL e SIAGAS, foi realizada uma transferência de dados para o *software* de geoprocessamento Arc Gis 9.3 onde serão realizadas atividades de localização e inserção dos poços da área de trabalho em meio digital, interpolação através da ferramenta (Spatial Analyst Tools – Interpolation - IDW) multiplicação e análise dos mapas. Este método de interpolação escolhido foi utilizado em todos os parâmetros dos métodos de vulnerabilidade, já que as informações adquiridas são pontuais, sendo necessário uma abrangência da informação em toda a área de trabalho.

A multiplicação dos mapas resultantes do método GOD foi realizada a partir da ferramenta do SIG Arc Gis Spatial Analyst (Raster Calculator). Esta ferramenta tem a capacidade de construir expressões na Calculadora Raster usando álgebra de mapas no formato *rasters*, podendo ainda fazer seleções em seus dados na forma de consulta e atribuir pesos a expressões algébricas, desde que os mapas estejam em escalas e proporções iguais.

Inicialmente, foram interpolados através do método IDW dos índices individualizados (valores atribuídos a cada parâmetro do método GOD, determinado na análise do poço tubular cadastrado), obtendo uma resposta espacializada para cada parâmetro. Em seguida, foram multiplicados os três parâmetros da metodologia GOD, obtendo um mapa final de vulnerabilidade.

A Figura 18 ilustra de forma sucinta e descritiva os procedimentos adotados neste trabalho e que tem como base as fases descritas a seguir.

Figura 18 – Metodologia GOD para determinação de classes de vulnerabilidade.



Fonte: Foster et al.(2002).

O sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade GOD foi dividido em três fases interligadas e sucessivas, conforme a equação a seguir.

$$GOD = G \times O \times D \quad \text{Eq. 5}$$

Foram multiplicados entre si, os parâmetros de entrada do modelo (G - grau de confinamento hidráulico, O - ocorrência das características do substrato litológico ou grau de consolidação da zona não saturada e D - distância do nível da água ou teto do aquífero ou

profundidade do nível d'água subterrânea), que fornecem um valor final que indica o índice de vulnerabilidade.

Quanto mais próximo de uma unidade mais vulnerável é o sistema aquífero. Entretanto, para adquirir valores entre 0,7 e 1,0 que significa classe de extrema vulnerabilidade é necessária uma combinação de índices próximo a 1 nos três parâmetros da metodologia GOD.

O resultado foi apresentado numa planilha eletrônica de Excel, sendo destacado cada parâmetro físico e seus respectivos valores, além do valor final de cada aquífero e suas vulnerabilidades. Com as informações obtidas, foi elaborado o mapa de vulnerabilidade resultante.

O método GOD define cinco classes de vulnerabilidade de aquíferos a partir dos cálculos apresentados. A Tabela 11 apresenta e descreve cada classe.

TABELA 11 - Classes de vulnerabilidade e suas respectivas definições.

Classes de Vulnerabilidade	Intervalos Resultados	Definição
Extrema	0,7 - 1	Vulnerável à maioria dos poluentes da água com rápido impacto em muitos cenários de poluição. Imprescindível a realização de estudos qualitativos e quantitativos de detalhe (ensaios laboratoriais e geofísicos) para as intervenções antrópicas.
Alta	0,5 - 0,7	Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição. Necessário realizar estudos qualitativos e quantitativos (geofísicos) que identifiquem as condições hidrogeológicas locais.
Moderada	0,3 - 0,5	Apresenta maior capacidade atenuadora que as classes, Extrema e Alta . Vulnerável a alguns poluentes. Resíduos e/ou efluentes resultam em risco de contaminação quando são continuamente descartados ou em situação de vazamento. Entretanto necessita de estudos qualitativos específicos e detalhados para cada tipo de empreendimento.
Baixa	0,1 - 0,3	Somente vulnerável a poluentes conservativo (baixa mobilidade) quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento. Necessários estudos de detalhe qualitativos para cada tipo de empreendimento.
Desprezível	0 - 0,1	Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical.

Fonte: Modificado de Foster et al. (2002).

Vale ressaltar que na determinação da vulnerabilidade GOD o componente traçado como um possível poluidor é a água, ou seja, o contaminante tem características semelhantes a ela.

4.2.1 Parâmetro G

O parâmetro (G) do método GOD, relaciona o grau de confinamento hidráulico e a pressão exercida, recebendo notas que variam de 0 a 1,0. Desta forma, a partir da análise dos perfis de poços catalogados, foram observados nos relatórios a classificação do grau de confinamento dos aquíferos. Aquíferos Livres receberam índice 1, enquanto que os Não Confinados Cobertos receberam 0,6, os Semi-confinados 0,4 e os confinados 0,2.

4.2.2 Parâmetro O

A caracterização do substrato litológico (grau de consolidação da zona não saturada) que corresponde ao parâmetro (O) foi alcançada através da interpretação geológica dos poços cadastrados, com o intuito de determinar índices para os mesmos.

O método GOD utiliza esse parâmetro considerando-o a predominância do material terrígeno presente no aquífero. Entretanto, para este trabalho será realizada uma média dos índices atribuídos a todos os materiais constituintes do aquífero até atingir o lençol freático, ou seja, se existe duas camadas num determinado poço, sendo que uma com areia e a outra com argila, então as notas correspondentes serão 0,4 e 0,7 obtendo uma média de 0,55.

O parâmetro (O) relaciona as características litológicas da zona vadosa em termos de grau de consolidação (presença e ausência de fissura) e tipo de litologia (porosidade, permeabilidade, umidade da zona não saturada ou especificar a retenção), que determinem a capacidade de atenuação do contaminante. Dessa forma, os valores adotados para as formações litológicas da região variaram de 0,4 até 1,0.

4.2.3 Parâmetro D

Ao parâmetro (D) foram atribuídos valores entre 0,6 e 1,0, de acordo com as profundidades do nível d'água dos aquíferos da região. O projeto ASUB forneceu dados de profundidade do lençol freático na área de estudo. Vale salientar que este é um dos parâmetros hidrogeológicos mais presentes nos diversos métodos de determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos.

De posse dos dados do Projeto ASUB, foram verificados os poços com profundidade superior a 50m, estes receberam índice 0,6, já os poços com profundidade entre 20 e 50 receberam índice 0,7, os poços que variarem entre 5 e 20 metros receberam 0,8, já os poços que variaram de 1 a 5 metros receberam 0,9 e os poços que tiverem profundidade inferior a 1 metro receberam o índice máximo do método (1,0).

Este parâmetro é de fundamental importância, uma vez que, determina a espessura que o contaminante terá que atravessar antes de chegar ao aquífero. A profundidade do lençol freático foi extraída dos perfis dos poços.

4.3 Procedimentos para o cálculo do Índice IS

O Índice de Susceptibilidade (IS) é composto de 5 parâmetros, dos quais os 4 primeiros (D, R, A e T) são idênticos aos do DRASTIC, sendo calculados e extraídos diretamente do mesmo, enquanto que o último parâmetro (LU) define o uso e a ocupação do solo. Embora ocorra a extração de parâmetros, as interpretações e respostas dos mapas não são os mesmos, já que os índices e pesos atribuídos são diferenciados.

Para a formação do Índice de Susceptibilidade (IS), cada parâmetro recebe um índice que variou de 0 a 100 sendo multiplicados por um peso. Após essa etapa, são somados os parâmetros e multiplicados por dez para facilitar a leitura, sendo definido o grau de vulnerabilidade, que é apresentado em classes.

Apesar da inspiração no método DRASTIC, o método IS que utiliza 4 dos 5 parâmetros da metodologia de origem, atribuem índices e pesos diferentes, já que o primeiro método descrito tem pesos variando de 1 a 5 enquanto o método derivado apresenta pesos variando de 0,121 a 0,259. O destaque dado aos pesos foi definido por uma equipe científica de peritos portugueses, na área da hidrogeologia (FRANCÊS et al., 2001). A Tabela 12 apresenta os parâmetros com seus respectivos pesos (fatores de ponderação).

TABELA 12 – Parâmetros do método IS com seus fatores de ponderação

Parâmetro	Significado	Fator de Ponderação
D	Profundidade da toalha freática	0,186
R	Recarga anual dos aquíferos	0,212
A	Geologia dos Aquíferos	0,259
S	Declives do terreno	0,121
LU	Ocupação do solo	0,222

Fonte: Francês et al. (2001).

Novamente a declividade do terreno (topografia) recebe a menor ponderação, sendo o parâmetro de menor importância na determinação da vulnerabilidade. Por sua vez, a inserção do parâmetro LU (uso e ocupação do solo) ganha notabilidade ao receber a segunda maior nota (0,222) ficando atrás no grau de importância apenas da geologia do aquífero que recebe nota 0,259.

O parâmetro LU, de uso e ocupação do solo, salientado nesse método, visa atribuir maiores notas a áreas com maiores potenciais de contaminação. Dessa forma, áreas de

descargas industriais e de espalhamento de lixos são mais passíveis de contaminação do que áreas agrícolas, que também apresentam índice de contaminação elevado. Entretanto áreas florestais, meios semi-naturais e corpos d'água não contribuem de modo algum na poluição dos aquíferos, recebendo valor 0 na classificação. Os quatro primeiros parâmetros são apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 – Parâmetros e índices do método IS.

D (m)		R (mm/ano)		A		T (%)	
Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	Valor	Classe	Valor
< 1,5	100	< 51	10	Xisto argiloso, argilito	10 – 30 (20)	< 2	100
1,5 – 4,6	90	51 – 102	30	Rocha metamórfica/ígnea	20 – 50 (30)	2 – 6	90
4,6 – 9,1	70	102 – 178	60	Rocha metamórfico-ígnea alterada	30 – 50 (40)	8 – 12	50
9,1 – 15,2	50	178	80	“Till” glacial	40 – 60 (50)	12 – 18	30
15,2 – 22,9	30	-	90	Arenito, calcário e argilito estratificado	50 – 90 (60)	> 18	10
22,9 – 30,5	20	254		Arenito maciço	40 – 90 (60)		
> 30,5	10	> 254		Calcário maciço	40 – 90 (80)		
				Areia e balastro	40 – 90 (80)		
				Basalto	20 – 100 (90)		
				Calcário carsificado	90 – 100 (100)		

Fonte: Francês et al. (2001).

De posse dos quatro parâmetros anteriores, oriundos do método DRASTIC, tem-se que identificar no mapa de uso e ocupação do solo os diversos empreendimentos com capacidade de poluir as águas subterrâneas. Para tanto, abandona-se a ideia de determinar a vulnerabilidade do aquífero de forma totalmente intrínseca, já que, atribuiu-se índices e consequente ponderação das atividades humanas.

Para aplicar os índices do parâmetro ocupação do solo, tem-se como base a utilização da Carta Corine Land Cover de 1985/87 do CNIG, com seus respectivos valores adotados, ou seja, seus índices são baseados no potencial de contaminação da atividade antrópica, definido por uma equipe de peritos portugueses em hidrogeologia, conforme pode ser verificado na Tabela 14.

TABELA 14 – Usos do solo, com base na carta CORINE Land Cover (1988).

LU	Classificação
Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	100
Perímetros regados, arrozais	90
Pedreiras, zonas de extração de areia, minas a céu aberto, estaleiros	80
Aeroportos, zonas portuárias, infraestruturas da rede de auto-estrada e ferroviária	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
Espaços verdes urbanos	75
Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	75
Tecido urbano contínuo	75
Tecido urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, etc.)	70
Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	50
Sistemas culturais e parcelares complexos	50
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	50
Territórios agro-florestais	50
Meios aquáticos (sapais, salinas, etc.)	50
Florestas e meios semi-naturais, superfícies com água	0

Fonte: CNIG (1988) apud Stigter et al. (2002).

Através do conhecimento da região de estudo in loco e a utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG), pode se identificar as áreas ocupadas pelos diversos empreendimentos e usos agrícolas, urbanos e naturais.

A tabela 15 apresenta as classes de vulnerabilidade do índice IS com seus índices.

TABELA 15 – Classes de Vulnerabilidade conforme o método IS.

Índice SI	Classe de Vulnerabilidade
85 – 100	Muito alta
65 – 85	Alta
45 – 65	Intermédia
0 – 45	Baixa

Fonte: Lobo Ferreira e Oliveira, (2003).

As respostas do Índice de Susceptibilidade (IS) obtidas podem variar entre quatro classes de vulnerabilidade. Vale ressaltar que tal método visa identificar áreas mais susceptíveis à contaminação oriunda de atividades agrícolas, sendo o nitrato seu parâmetro de validação principal.

4.3.1 Parâmetros de origem do DRASTIC

Os parâmetros D, R, A e T extraídos do método DRASTIC receberam novos pesos e índices, conforme descritos nas Tabelas 13 e 14, respectivamente. Dessa forma, as respostas dos mapas gerados foram divergentes dos de origem.

4.3.2 Uso e ocupação do solo (LU)

Tendo em vista o conhecimento ainda limitado quanto às fontes de poluição, foram enfatizadas inicialmente as informações relativas às principais fontes disponíveis como indústrias, lixões, cemitérios, postos de gasolina, lagoas de retenção de águas pluviais e de saneamento e estações de saneamento.

As campanhas de campo tiveram como objetivo identificar e coletar informações sobre essas fontes principais de contaminação na área de estudo. Estes lugares foram georreferenciados e destacados num mapa base da área de estudo com símbolos, letras, elementos e cores de identificação.

As áreas industriais juntamente com as cemiteriais e os corpos d'água foram estimadas, não refletindo exatamente o tamanho na realidade. Essas áreas foram estimadas através do ponto de localização (coordenadas geográficas) e criadas um polígono (*Buffer*) para representar cada tipo de uso e ocupação do solo. Dessa forma foram atribuídos valores de 10m para os corpos d'água, indústrias 100m, aterro sanitário e lixão 400m, cemitérios 150m, posto de gasolina 15m, lagoas de drenagem e saneamento 60m, estruturas de saneamento 50m e porto, aeroporto e estação de trem 100m.

Tal procedimento foi necessário para correlacionar o mapa original de uso e ocupação do solo, com os pontos de identificação de uso e ocupação do solo que são as coordenadas geográficas. Por exemplo, um posto de gasolina como os demais usos variam sua área sendo necessária uma homogeneização dos diversos usos para integração dos mapas.

Como alguns dos usos receberam a mesma nota das atividades urbanas contínuas, como os postos de gasolinas e os cemitérios, então as classes dispostas na Tabela 15 estão coerentes. Os demais empreendimentos identificados na área de trabalho e presentes na Tabela 16, supracitada, receberam notas segundo a metodologia IS.

O mapa de uso e ocupação do solo será extraído, do Mapa de Uso e Ocupação do Solo de Alagoas, elaborado pela Embrapa (2008). A partir da obtenção desses dados, serão cadastradas as fontes potenciais de contaminação, ou seja, plotados os empreendimentos capazes de produzir efeitos nocivos às águas subterrâneas.

Os mapas de vulnerabilidade gerados a partir destes 3 métodos (DRASTIC, GOD e IS) foram analisados, comparados e validados entre si. Outra forma de validar os mapas de vulnerabilidade foi a partir do catálogo de valores de nitrato na região de estudo pretéritos, realizados pelo Projeto ASUB (2011) além da análise e interpolação para geração de manchas de poluição.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (DRASTIC)

A análise e interpretação do índice DRASTIC tem que ser relativa e estar baseada na subjetividade imposta na escolha dos índices que podem ser alterados pelo usuário e dos Pesos Relativos que são fixos na etapa anterior de processamento, dessa forma não há resposta absoluta e os resultados encontrados somente têm significado para o ambiente analisado (CUNHA, 2009). Sobretudo quando a base de dados disponibilizados são escassos, como a disposta neste trabalho.

5.1.1 Mapa de vulnerabilidade do Nível Estático - NE (D)

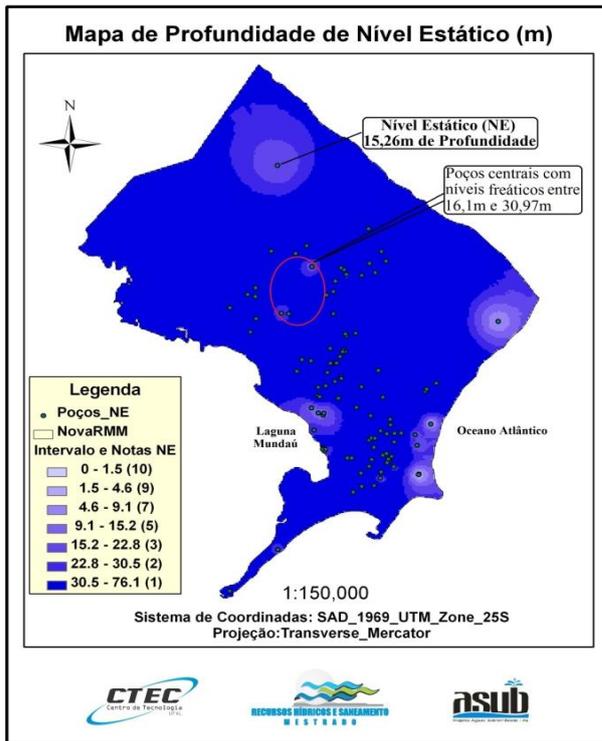
Através do cadastro de poços, foi permitido levantamento dos respectivos níveis estáticos. Apesar de existirem poços cadastrados desde a década de 1960, foram utilizados para o cálculo de interpolação poços a partir dos anos 2000. Isso foi considerado devido à gama de poços existentes na área de estudo que influenciam no rebaixamento dos aquíferos.

Para fins de cálculo do nível estático, não foram consideradas a exploração de águas subterrâneas através de poços tubulares antigos, por não determinar com fidelidade o nível estático. O volume de água encontrado no período de outorga de um poço, pode não servir de referência devido a maior ou menor retirada de água e a recarga do aquífero ao longo dos anos, podendo não representar a realidade atual.

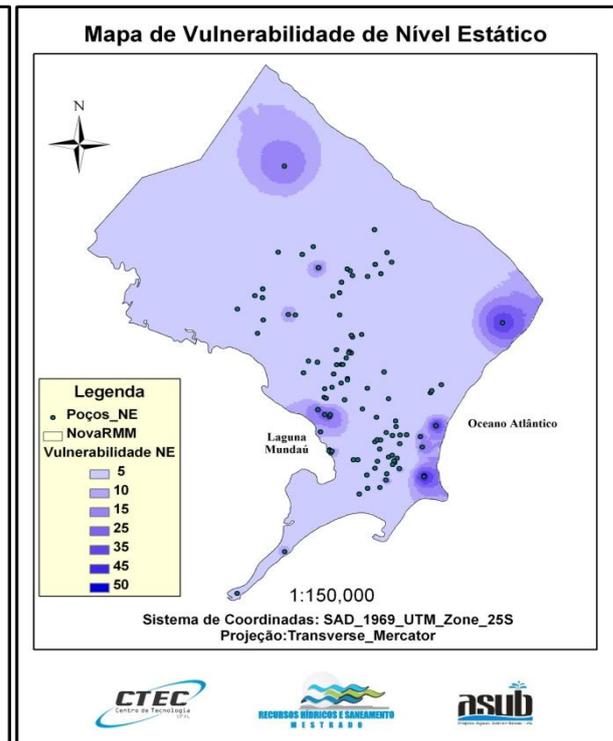
Como a maior parte dos poços tubulares estão distribuídos na região dos tabuleiros costeiros, e as profundidades dos níveis estáticos nessa região normalmente encontram-se a uma profundidade superior a 20m, essa distância atenua o impacto de uma possível disseminação de poluentes no aquífero.

O mapa de profundidades do nível estático pode ser utilizado, na previsão de profundidade do nível d'água para captação da água subterrânea através de escavações de poços, na instalação adequada de novas atividades potencialmente poluidoras e/ou empreendimentos, auxiliando na elaboração de mapas de vulnerabilidade, entre outras aplicações.

Nas Figuras 19 e 20 são apresentados, respectivamente, os mapas constando à distância do nível estático em relação à superfície terrestre na área de estudo com a atribuição de suas notas e a ponderação de seu peso, aplicação dos índices, propostas pela metodologia DRASTIC, gerando o mapa final de vulnerabilidade para esse parâmetro.

Figura 19 –Variação dos níveis estáticos.

Fonte: Autor, 2013.

Figura 20 – Vulnerabilidade dos níveis estáticos.

Fonte: Autor, 2013.

O poço localizado na parte de cima do mapa possui nível estático de 15,26 metros de profundidade, tal fato é evidenciado pela sua localização num vale fluvial, fazendo com que as águas subterrâneas da região alimentem o rio da região. Os demais poços que apresentam seus níveis estáticos próximos à superfície ocorrem devido à proximidade com o mar e a laguna Mundaú, justificando tais índices.

Há três poços centrais com níveis freáticos variando de 16,1 m a 30,97 m de profundidade. Tais valores não são frequentes na região, entretanto, vale salientar que esta região concentra uma bacia hidrográfica endorreica, acumulando águas pluviais e residuais, que pode ampliar a zona saturada.

O parâmetro Nível Estático (NE) é fundamental para entender o possível tempo de transporte de um poluente até atingir o aquífero e seu respectivo fator de atenuação. Por esse motivo, o parâmetro NE recebeu os maiores índices de acordo com a proposta metodológica, em função de evidenciar o tempo e a distância a ser percorrida por um contaminante quando lançado a superfície. A importância do parâmetro NE se justifica ainda pelo peso atribuído ao mesmo, valor máximo (5).

A maior parte da área de estudo recebeu índice de vulnerabilidade 5. Tal fato pode ser explicado pela quantidade reduzida de poços, distribuídos aleatoriamente e com profundidade do freático superiores a 30 metros.

5.1.2 Mapa de vulnerabilidade da Recarga (R)

A recarga foi considerada como fator imprescindível na determinação da vulnerabilidade aquífera de uma região, já que, é através da precipitação e posterior lixiviação que o contaminante pode possuir a capacidade de adentrar a zona vadosa. Essa precipitação em contato com substâncias nocivas com características idênticas a da água (mobilidade) pode ser transportada de acordo com os padrões de fluxo apresentados dentro do aquífero e sofrerem os vários processos de atenuação que ocorrem nesse cenário, e pode reduzir as concentrações de contaminantes.

Para o cálculo do parâmetro recarga dos métodos de vulnerabilidade DRASTIC e IS foram considerados os dados de precipitação como os de fontes adicionais (vazamentos), ou seja, toda água que possivelmente atingirá a zona saturada ou sistema aquífero, podendo ocasionar inclusive transporte de poluentes.

A recarga (pela infiltração da chuva), considerada pelo modelo DRASTIC, está relacionada com a quantidade de água que atinge a zona saturada, ou seja, condiciona o transporte dos poluentes que possivelmente poderão atingir o sistema aquífero. Com isso, quanto maior for a recarga, maior será o acúmulo de água no sistema aquífero, porém, havendo atividades com potencial de poluição em superfície, poderá haver transporte de substâncias poluidoras até o sistema aquífero.

Foram catalogadas precipitações de 12 postos pluviométricos presentes na área de influência do presente estudo. Existem 4 postos pluviométricos com apenas 11 anos de dados analisados, estando eles dispostos a seguir: Pilar – Manguaba (cód. 00935014); Utinga Leão – Rio Largo (00935060); Riacho Doce e Jacarecica (estes últimos do Banco de Dados Hidrometeorológicos – BDHM da SEMARH).

O período de precipitações registradas, 11 anos em 4 postos pluviométricos, não é favorável para o melhor desenvolvimento da pesquisa, afinal, uma série de dados pluviométricos para caracterizar o comportamento médio do clima de uma região, seria de ao menos 30 anos, conforme recomenda a Organização Meteorológica Mundial – OMM (1989).

Desses quatro postos pluviométricos, apenas o da usina de cana de açúcar Utinga Leão apresentou dados contínuos, com análise entre os anos de 2000 a 2010. Os demais tiveram falhas mensais em algum dos anos da sequência cronológica.

Os anos com mais de dois meses sem dados foram excluídos do processo de análise. Os anos com apenas um mês de falhas de dados, foi adotado o valor zero (0), como forma de

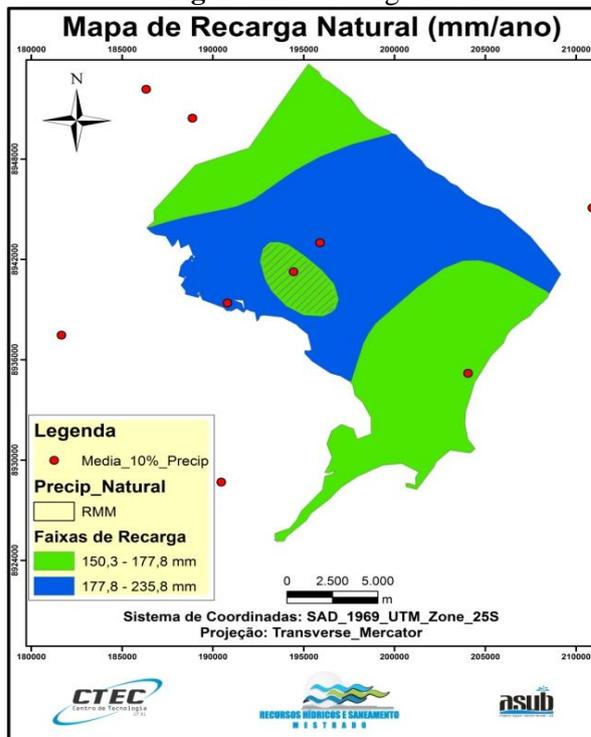
tratamento dos dados para não excluir o posto pluviométrico, já que a maior precipitação cadastrada nos demais anos da série para os meses em questão não ultrapassou 25mm/mês.

Em 7 postos pluviométricos, dos 12 catalogados, o início da coleta de dados deu-se a partir da década de 1960, entretanto só 1 posto (Tabuleiro – INMET – cód. 00935031) encontrou-se em operação até o ano de 2012. Vale salientar, no entanto, que houve falha de catalogação de dados entre os anos de 1977 a 2009, sendo registrados apenas 14 anos de precipitação contínua.

As maiores séries de dados pluviométricos analisadas neste trabalho são a do posto Satuba 1963 – 1999 (33 anos amostrados) seguido do posto Rio Largo 1963 – 1999 (28 anos amostrados) e Posto Saúde 1963 – 1994 (27 anos amostrados). As intercalações de amostragens e análises das precipitações prejudicam a caracterização climática da região afetando os cálculos subsequentes utilizados a partir da precipitação como é o caso da recarga.

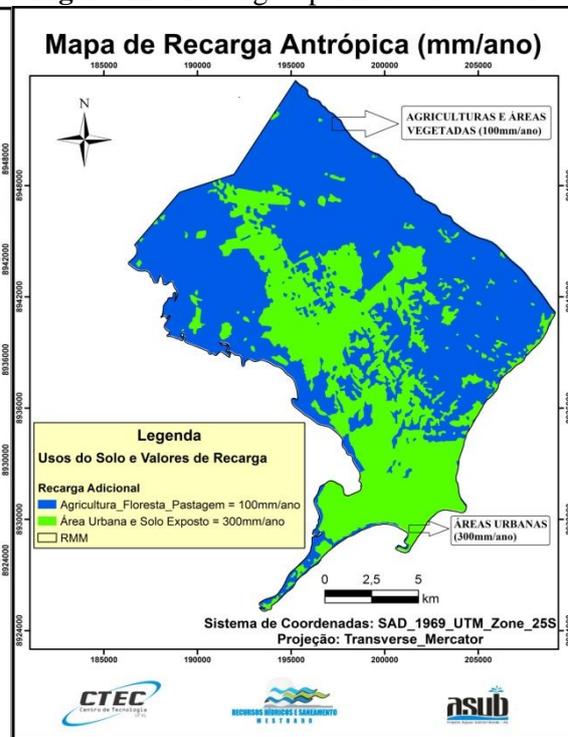
As Figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos para recarga natural, 10% da precipitação conforme a metodologia proposta, e recarga antrópica, baseada no uso e ocupação do solo, que determina acréscimo de infiltração para o aquífero a partir de vazamentos do sistema de abastecimento, saneamento e irrigação.

Figura 21 – Recarga natural.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 22 – Recarga a partir do uso do solo.



Fonte: Autor, 2013.

O mapa da Figura 21 apresenta a variação da recarga na área de estudo, porém esta não ultrapassa mais do que duas classes, conforme descrito na metodologia DRASTIC. A

Figura 22 foi adaptada do mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo, sendo adicionado uma precipitação de 100mm/ano nas áreas rurais e 300mm/ano nas áreas antrópicas, para caracterizar as águas que recarregam os aquíferos, provenientes de irrigação e vazamentos na rede de distribuição, respectivamente.

O posto pluviométrico de Maceió (Lat. 8941263 / Long. 194449) localizado dentro do círculo verde rachurado (Figura 21) apresentou uma precipitação média para os 26 anos amostrados de 1.503,48 mm/ano e uma média dos 10% das precipitações de todos os anos estudados de 150,35 mm/ano. Esse valor em porcentagem é referente à metodologia proposta para determinação da recarga.

A maior e menor média dos 10% das precipitações de todos os postos pluviométricos foram respectivamente o posto de Satuba com 235,89 mm/ano e o de Rio Largo com 136,24 mm/ano. A interpolação desses valores, através do método IDW resultou em apenas duas classes de recarga de acordo com a metodologia DRASTIC.

Como a metodologia utilizada neste trabalho necessita da inserção de recargas extras, foram acrescentados valores de 100 mm/ano nas áreas agrícolas, áreas de pastagem e florestas e 300 mm/ano nas áreas com solo exposto, urbanizadas e ambientes aquáticos.

A Tabela 16 apresenta as classes de uso e ocupação do solo da área de estudo e os valores atribuídos de recarga para cada tipo de uso, conforme descrito na metodologia.

TABELA 16 – Recargas aquíferas a partir dos diversos usos do solo.

Tipos de Uso e Ocupação	Recargas Adicionais (mm)
Cana de Açúcar	100
Pastagem Área Úmida	100
Mata Atlântica	100
Solo Exposto	300
Água	300
Área Urbana	300

Fonte: Autor, 2013.

A partir da reclassificação do mapa de uso e ocupação do solo, foram atribuídos valores de recarga para cada uso. Apenas as classes solo exposto, área urbana e corpos d'água receberam recargas de 300 mm/ano, as demais receberam valores de recarga de 100 mm/ano. Esses valores foram somados ao mapa de recarga natural, Figura 20, resultando no mapa de recarga final da região, Figura 23.

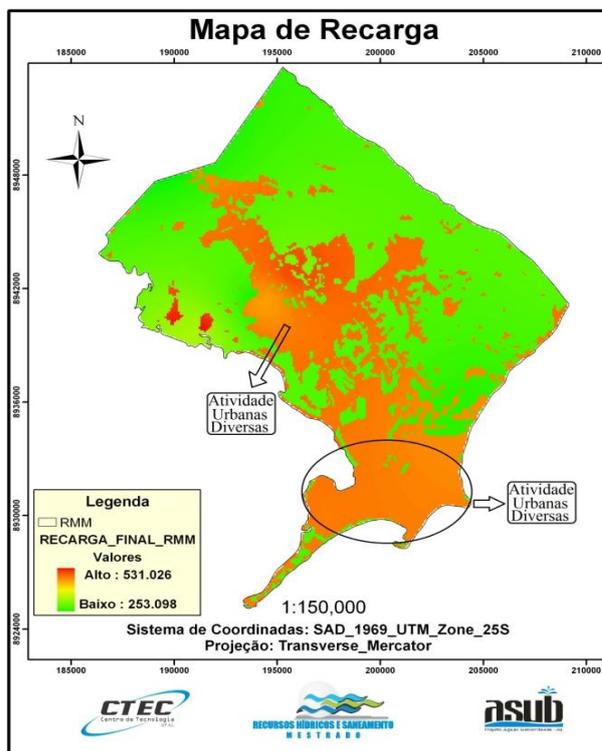
Os mapas de recarga natural (Figura 21), extraídos dos 10% das médias das precipitações, e recargas antrópicas (Figura 22), recargas extras a depender do uso do solo,

foram somados, através do SIG Arc Gis, ferramenta Raster Calculation e resultando no mapa de recarga final, Figura 23, a seguir.

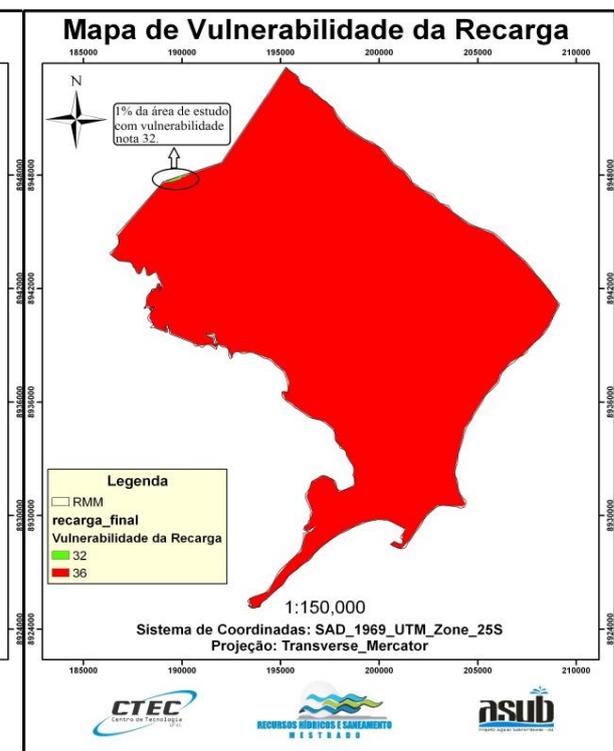
Quando reclassificado, o mapa de recarga final (Figura 23) foi encontrado apenas duas classes ou faixas de valores de recarga que variaram de 177,8 mm/ano a 254 mm/ano (cor verde) e a segunda que é superior a 254 mm/ano (cor vermelha), conforme pode ser observado na Figura 24. Vale salientar que essa figura retrata a vulnerabilidade do parâmetro de recarga para a metodologia DRASTIC.

Figura 23–Mapa de recarga em mm/ano.

Figura 24–Mapa de vulnerabilidade de recarga.



Fonte: Autor, 2013.



Fonte: Autor, 2013.

A variação da recarga calculada de acordo com a precipitação média dos postos pluviométricos e a infiltração adicional promovida pela irrigação e perdas na rede de distribuição variou de 253 mm/ano a 531 mm/ano, pode ser observada na Figura 23.

A variação da recarga é da ordem de aproximadamente 270 mm/ano, e seu valor final foi semelhante aos estudos pretéritos. Vale salientar que áreas com grandes recargas podem ser mais propícias à poluição em detrimento de áreas de menor recarga, aquíferos confinados, normalmente poluindo menos. Essas áreas de grande recarga, por sua vez, também podem favorecer a diluição dos poluentes.

A Figura 24 apresenta cerca de 99% da área com notas finais 36 de vulnerabilidade para o parâmetro recarga da metodologia DRASTIC. Como a recarga foi calculada baseando-

se pela precipitação média da região mais um incremento anual para áreas urbanas e rurais, obteve-se uma recarga quase que uniforme para a área de estudo.

A partir da determinação da recarga observou-se que de acordo com a metodologia proposta obteve-se apenas duas classes, ou seja, entre 180 – 255 e maior que 255, recebendo respectivamente índices 8 e 9. O peso 4 atribuído ao parâmetro recarga evidencia sua importância na determinação da vulnerabilidade natural do aquífero. Dessa forma, apenas o parâmetro Nível Estático ou Profundidade do Topo do Aquífero (D) possui peso maior (5).

Neste trabalho não foi considerado para o cálculo da recarga a evaporação e a evapotranspiração, a topografia e o grau de confinamento do aquífero que influenciam diretamente na quantidade de água que alimenta efetivamente o aquífero. Sendo considerado apenas a precipitação e suas respectivas perdas, além dos incrementos de recarga artificial como as perdas de processo de abastecimento e irrigação.

Os exutórios dos aquíferos da região são representados pelos poços de extração de água e os rios efluentes, que são alimentados pelo lençol freático. Conforme afirma o Alagoas (2010), que os exutórios dos aquíferos da região são representados pela evapotranspiração, drenagens efluentes, para o mar nas regiões costeiras e, sobretudo, pelos poços que representam exutórios artificiais das águas subterrâneas.

5.1.3 Mapa de vulnerabilidade do Meio Aquífero (A)

Visando evitar qualquer tendenciosidade, foram atribuídas notas de 6 a 8. Sendo a menor nota para as lentes de argila e folhelho, valores intermediários para as intercalações de arenito e calcário e as maiores notas para as lentes de areia grossa e cascalho, muito presente em toda a área de estudo.

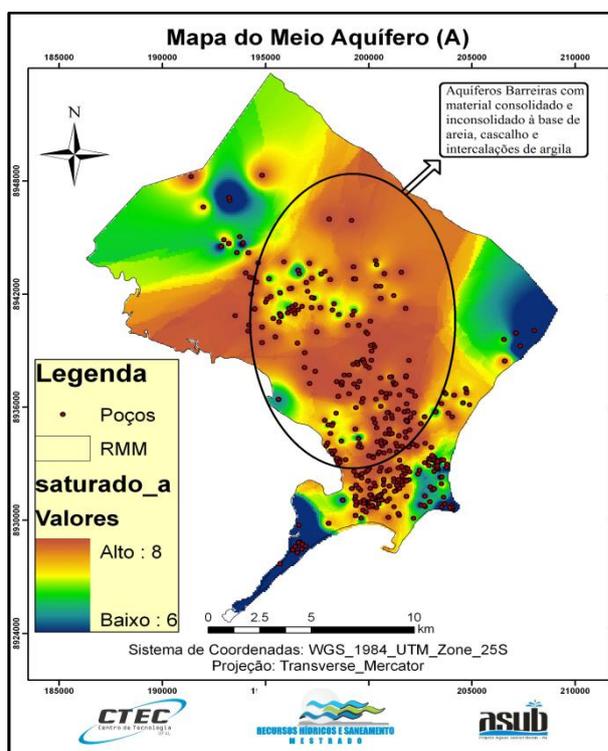
A aquisição de dados para geração desse mapa foi através da análise litológica dos 417 poços encontrados na área de estudo. Foram atribuídas notas que variaram de 6 a 8, de acordo com a metodologia proposta. As maiores notas foram para as areias não consolidadas e as menores notas para as intercalações de argila presente. Os sedimentos da Formação Barreiras, presentes na maior parte da área de estudo apresentam cores variadas, predominando o amarelo-ocre e o vermelho acastanhado.

Dessa forma, os resultados obtidos para cada um dos poços analisados foram interpolados e, posteriormente, realizada uma ponderação para geração do mapa final da zona saturada. O Peso 3 atribuído a este parâmetro, diz respeito ao grau de importância do mesmo na determinação da vulnerabilidade.

Mediante a análise do meio aquífero da região (poroso), as notas atribuídas (média ponderada de cada camada litológica) variaram relativamente pouco (6 – 8) não apresentando uma alta amplitude de valores que caracterizariam os aquíferos totalmente livres e confinados. Dessa forma variando apenas com intercalações, predominando grandes áreas de aquíferos semilivres. Os valores mais baixos correspondem às argilas e calcários, enquanto que valores intermediários aos siltes, as areias argilosas, as argilas arenosas, os folhelhos e os feldspatos, enquanto que, os valores maiores apresentam predominantemente areias médias a grossas, cascalhos e conglomerados.

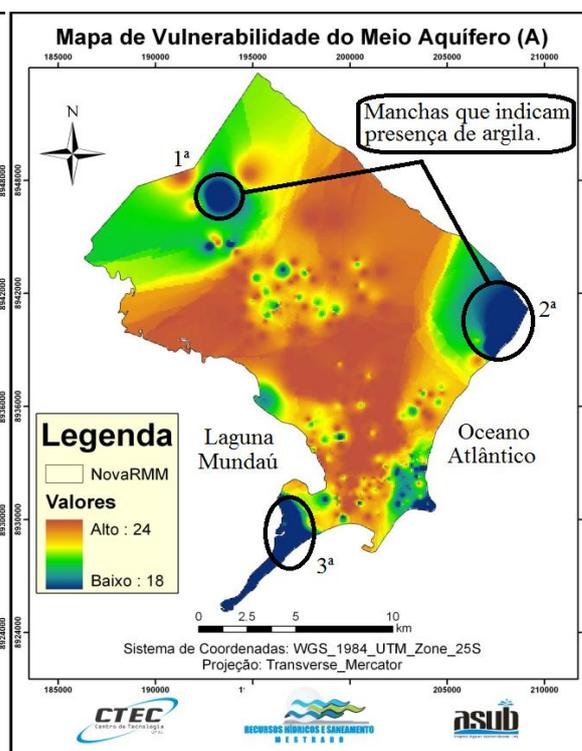
A seguir (Figuras 25 e 26) são apresentados os mapas interpolados com as notas originais atribuídas neste trabalho e sua respectiva ponderação.

Figura 25 – Interpolação IDW do índice do meio aquífero.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 26 – Mapa de Vulnerabilidade da zona saturada.



Fonte: Autor, 2013.

A maior parte da área de estudo, em cor amarelada/avermelhada, Figura 25, apresenta no perfil litológico dos poços material consolidado e inconsolidado à base de areia, cascalho e intercalações de argila. Vale salientar que a maior parte da área de estudo encontra-se aflorando o aquífero sedimentar, poroso, denominado Barreiras. Alguns dos perfis dos poços ultrapassam esse aquífero penetrando a Formação Marituba. A proximidade desses aquíferos é reconhecida como um sistema único que tem sua união dada por uma camada de argila cinza a esverdeada ou uma camada de calcário.

A região de cor azul escuro diz respeito à detecção de grandes camadas de argila cinza escura à preta, além de fragmentos de folhelho preto na região noroeste (Tabuleiro dos Martins, Clima Bom, Santos Dumont e Cidade Universitária). As três manchas azuis selecionadas da Figura 26 ocorreram pela pequena quantidade de poços analisados na região, apresentando camadas de argila significativamente espessas. Essas manchas não correspondem à expectativa das análises preliminares, já que, a primeira ocorre na região de tabuleiro costeiro e as duas últimas trata-se de uma área de restinga na região litorânea, onde predominam as areias quartzosas.

Vale salientar, porém que a segunda região encontra-se inserida na foz do rio Pratygy no bairro do Riacho Doce, onde pode ser percebida *in loco* a presença manguezais que se formam em terreno pantanoso com bastante matéria orgânica, areia e argila. O mesmo acontece na 3ª mancha azul onde a presença da Laguna Mundaú e da vegetação de restinga e manguezal acontece.

A região mais avermelhada do mapa do meio aquífero corresponde a uma predominância em seus estratos de areia média a grossa com pequenas intercalações de argila. A zona de transição da argila para a areia foi representada pela cor verde.

5.1.4 Mapa de vulnerabilidade de Solos (S)

Através da análise do mapa de solos da região e da nova classificação de solos proposta pela Embrapa (2005), pode-se identificar um total de 6 classes, já que há variações de coloração e de classes do mesmo solo de forma espacializada e intercalada. A Tabela 17 apresenta as classes de solos presentes na área de estudo com suas respectivas proporções texturais.

TABELA 17 – Classes dos solos com suas porcentagens de silte, argila e areia.

SOLOS ANTIGOS	SOLOS NOVOS	SILTE	ARGILA	AREIA
A	Solos Aluviais	21%	27%	52%
AM ou LA	Latosolos	2%	38%	60%
AQ	Neossolos Quartzarênicos	3%	4%	93%
G	Gleissolos	22%	47%	31%
LA1	Latosolos	2%	38%	60%
LA2	Latosolos	2%	38%	60%
LA3	Latosolos	2%	38%	60%
LA4	Latosolos	2%	38%	60%
M	Chernossolos	31%	24%	45%
PA1	Argissolos	17%	34%	49%
PA2	Argissolos	17%	34%	49%

Fonte: Adaptado da Embrapa (2008).

De acordo com as porcentagens apresentadas na Tabela 17, a maior proporção dos solos são arenosos ou areno-argilosos. Apenas os Gleissolos apresentam características de argilo-arenosos. Os Chernossolos apresentam a maior proporção de silte de todos os solos presentes na área de estudo.

Os solos encontrados na área de estudo possuem variações na sua cor (amarelo – avermelhado a esbranquiçado) e na sua granulação e proporção de silte, argila e areia (Quadro 3). Com isso, há solos com texturas mais arenosos ou arenosos com argilosa. Os solos predominantes na área e suas características principais são apresentados a seguir:

Quadro 3 - Características dos solos presentes na área de estudo.

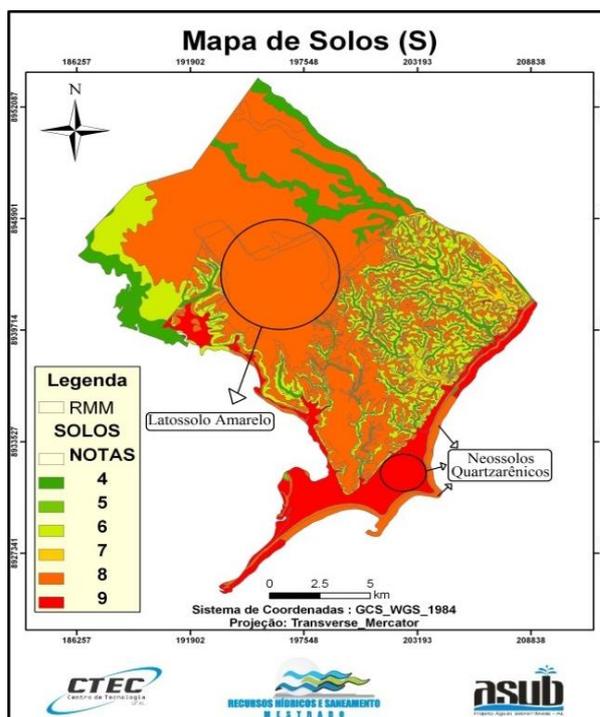
SOLOS	CARACTERÍSTICAS
Solos Aluviais	Solo proveniente de depósitos aluviais, com horizonte A escurecido sobre camadas estratificadas que formam o horizonte C
Latossolos	fertilidade média a alta, textura média, fortemente drenado, relevo plano. As superfícies aplainadas dos tabuleiros não apresentam muita variação nos teores de argila, sendo bastante porosos (solos cujos materiais são os mais decompostos, mais velhos e geralmente mais profundos).
Neossolos Quartzarênicos	Áreas de planícies, sendo distribuídos nas planícies marinhas e restingas, local dos coqueirais e extensões urbanas.
Gleissolos	Áreas de planícies, sua distribuição se dá ao longo dos canais de drenagem, compreendidos pelas várzeas laterais resultantes dos depósitos aluviais (horizonte A espesso e escuro).
Chernossolos	Estes solos são encontrados em regiões subúmidas, onde existe suficiente umidade para manter uma vegetação (é comum, desenvolvem-se em materiais sedimentares finos, transportados pelos ventos).
Argissolos	Associado ao Latossolo Amarelo originados da formação Barreiras, pobre em ferro; é comum nos platôs litorâneos, áreas de encostas, depressões suavizadas dos platôs.

Fonte: Autor, 2013.

Os solos da área de estudo receberam, de acordo com a metodologia DRASTIC, fator de ponderação (Peso Relativo) 2 e notas variando de 4 a 9 de acordo com sua granulometria. O peso atribuído ao parâmetro solo corresponde a pouca significância na determinação da vulnerabilidade do aquífero, já que o peso 5 corresponde aos parâmetros mais importantes.

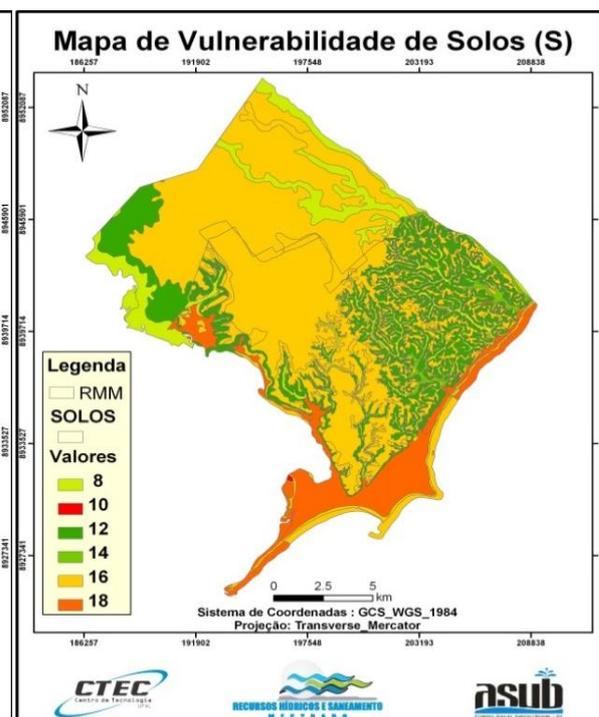
No mapa de solos, foram constatados 6 tipos de classes. Estas classes receberam notas a partir da análise das quantidades percentuais de areia, silte e argila, de acordo com o modelo DRASTIC. O mapa resultante de solos, já aplicada às notas com suas respectivas ponderações, pode ser observado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Índices do parâmetro solos.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 28 – Mapa de vulnerabilidade de solos.



Fonte: Autor, 2013.

A predominância dos solos na área de estudo são os Latossolos Amarelos, contudo os Neossolos Quartzarênicos (ambos apresentados respectivamente pela cor laranja e vermelha na Figura 27) são os mais propícios à penetração de contaminantes (vulnerabilidade) devido à predominância de areia (93%).

A maior vulnerabilidade encontrada na área de trabalho está disposta na parte baixa da cidade, onde há a predominância dos Neossolos Quartzarênicos e solos de Sedimentos de Praia e Aluvião, devido à proximidade da zona região litorânea e vales fluviais onde os solos são mais grosseiros, possibilitando assim uma possível ação de poluentes. Tal fato pode ser exemplificado pela granulometria encontrada no perfil de poços dessa área com areia grossa da ordem de (1,0 – 2,0 mm) e o silte + argila (< 0,062 mm).

Além disso, a região pode ser caracterizada como textura arenosa e areno-argilosa já que atingiram a ordem de aproximadamente 90% de areia para os neossolos e 50% de areia para os solos aluviais.

5.1.5 Mapa de vulnerabilidade da Topografia (T)

A topografia foi considerada por condicionar efeitos de atenuação do poluente em decorrência de sua influência no solo, ocasionada pela diferença de velocidade do escoamento superficial do poluente. Como afirma Camponogara (2006), a declividade é um fator muito importante para a recarga dos aquíferos, pois em declividades menores o processo de

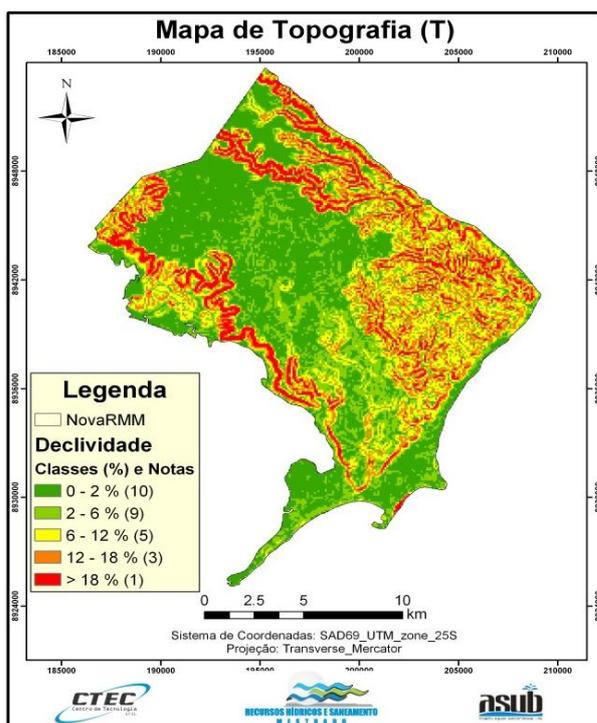
infiltração ocorre com maior intensidade, em contrapartida, nas declividades maiores ocorre maior escoamento superficial e conseqüentemente menor será a infiltração.

As áreas de encostas mais íngremes, representadas na Figura 28 pelas declividades superiores a 18%, apresentam maiores velocidades da água subterrânea e superficial e conseqüentemente mais dificuldades de infiltração, portanto, menor probabilidade de infiltração de contaminantes, dificultando ainda mais a poluição da água subterrânea.

As áreas de encostas são favoráveis à erosão e conseqüentemente à contaminação das águas superficiais. Por sua vez, as declividades da ordem de até 6% (representadas pela cor verde claro e escuro na Figura 29) ampliam significativamente a capacidade de infiltração da água e possíveis contaminantes dispersos na superfície terrestre.

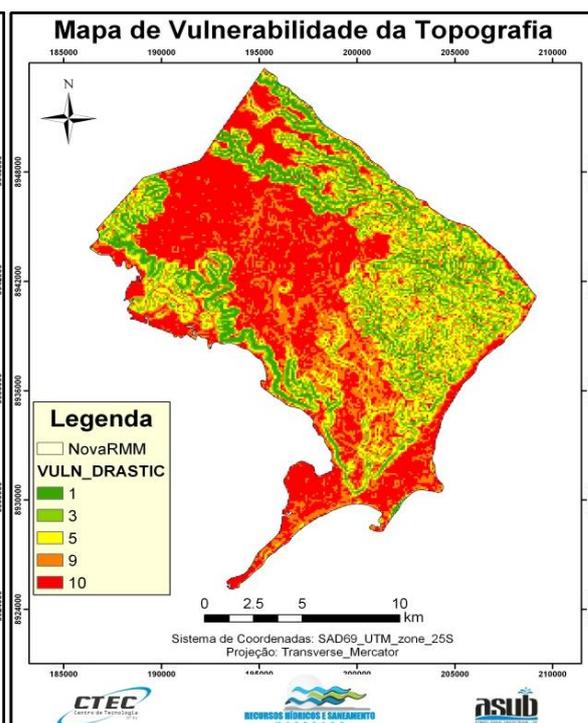
Os mapas de percentual de declividade com suas respectivas notas e a vulnerabilidade determinada para o parâmetro topografia são apresentados nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Mapa de declividade em %.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 30 – Vulnerabilidade da declividade.



Fonte: Autor, 2013.

Quanto maior a inclinação do terreno, maior será o escoamento superficial da chuva efetiva e menor será o volume infiltrado. Com isso, as áreas mais planas do relevo, Figura 29 cor verde, favorecem a infiltração da água e de possíveis poluentes lançados na superfície, tornando-a mais vulnerável.

A região avermelhada da Figura 30 apresenta os maiores índices atribuídos, variando entre 9 e 10. Essas áreas apresentam relevo plano ou suavemente ondulando. Entretanto, este

parâmetro recebeu Peso 1, ou seja, na determinação da vulnerabilidade aquífera pelo método DRASTIC ele é o menos importante para avaliação.

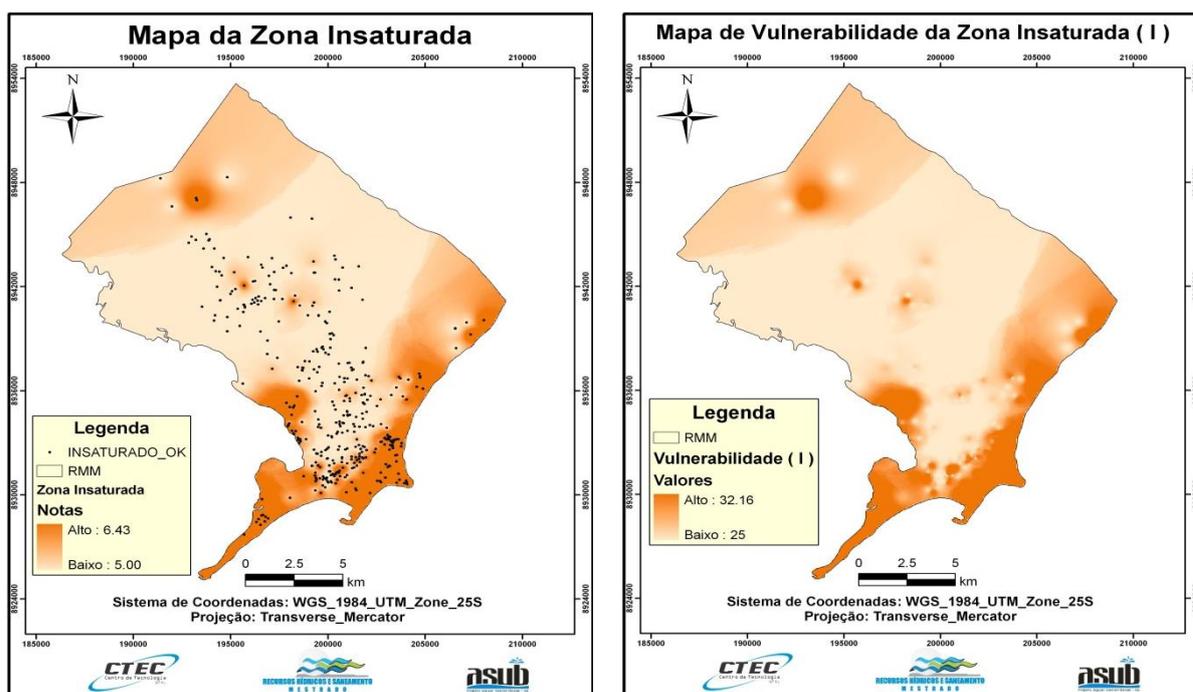
5.1.6 Mapa de vulnerabilidade do Meio Insaturado (I)

A zona não saturada ou vadosa (I) é a região do terreno localizada abaixo da superfície do solo e acima do nível freático, sofrendo variações de espessura ao longo das estações do ano (precipitação e evaporação) e da exploração das águas subterrâneas. Além disso, o tipo de material existente determina a velocidade vertical de percolação do poluente até atingir o aquífero. Na área de estudo a zona insaturada e o meio aquífero são praticamente dos mesmos materiais.

Nos sedimentos quaternários (QSPA) as areias receberam índices 6 cascalhos (conchas) e pedregulhos tiveram índice 7 e os calcários, siltes e argilas índice 5. Já nas formações Barreiras, Marituba, Poção e Maceió que são menos vulneráveis que o QSPA as areias, siltes e argilas receberam índice 5. Como essas camadas litoestratigráficas iniciais não formam aquíferos então seu poder de biorremediação é superior ao de contaminação. As maiores médias estão localizadas na zona costeira e na margem esquerda da laguna Mundaú.

Os diversos extratos de silte e argila encontrados na área de estudo servem como barreira para retardar o movimento perpendicular dos líquidos. As figuras 31 e 32 a seguir, apresentam os índices atribuídos e a vulnerabilidade desse parâmetro para a área estudada.

Figura 31 – Índices da zona insaturada. Figura 32 – Vulnerabilidade da zona insaturada.



Fonte: Autor, 2013.

Fonte: Autor, 2013.

As regiões litorâneas e próximas aos vales fluviais apresentam materiais insaturados com maior porosidade como cascalhos, pedregulhos e areias grossas que faz ampliar sua vulnerabilidade. A predominância dos materiais encontrados nas áreas alaranjadas da Figura 31 são areias e cascalhos com silte e níveis variados de concentração de argila não consolidada, reduzindo assim a permeabilidade dos depósitos aquíferos. Dessa forma, quanto mais laranja escuro, Figura 32, mais vulnerável é o aquífero.

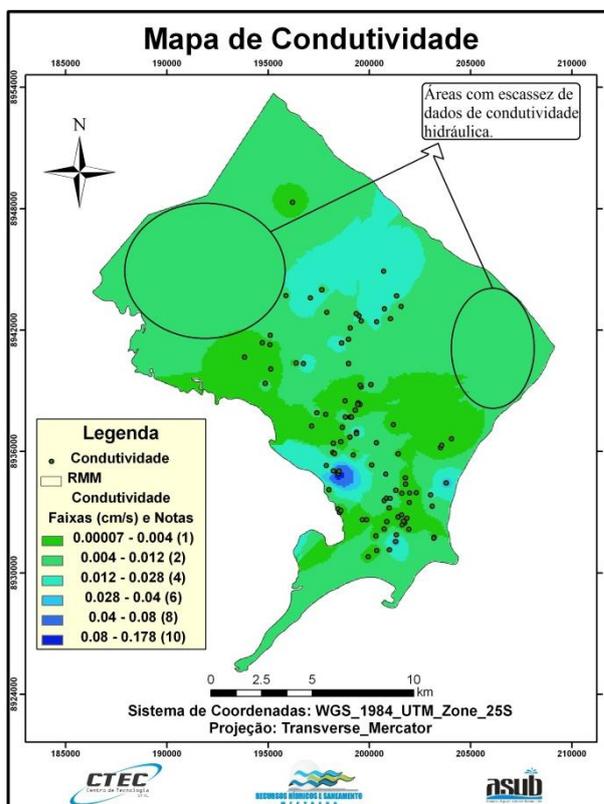
O parâmetro Impacto da Zona Insaturada juntamente com a Profundidade do Lençol Freático são os mais importantes na determinação da vulnerabilidade pelo método DRASTIC recebendo os maiores pesos (5).

Ao contrário do que aconteceu no parâmetro A, as camadas litológicas superficiais não apresentaram camadas confinantes de argila, mas pequenas lentes de argila que não se caracterizaram confinantes. Essas camadas aconteceram após a linha do nível estático na transição entre as Formações Barreiras e Marituba e Sedimentos de Praia e Aluvião e Barreiras, não participando deste parâmetro, mas do Meio Aquífero.

5.1.7 Mapa de vulnerabilidade da Condutividade (C)

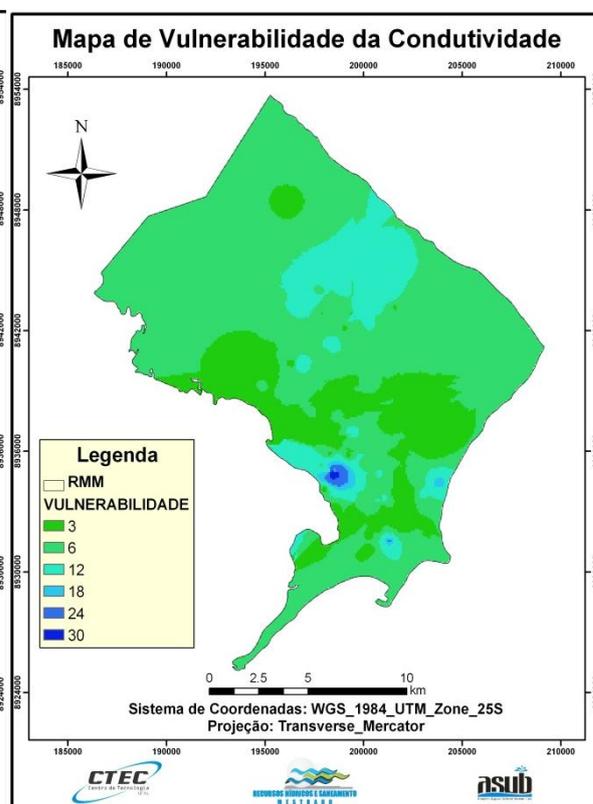
A condutividade hidráulica (C) que é a capacidade da água se movimentar através das rochas sob um determinado gradiente hidráulico, controla o fluxo subterrâneo, foi determinado através dos testes de bombeamento de poços tubulares. A condutividade hidráulica dos 100 poços catalogados e interpolados para a melhor visualização em mapas temáticos estão dispostas nas figuras 33 e 34.

Figura 33–Faixas de condutividade em cm/s.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 34 – Mapa de vulnerabilidade (C).



Fonte: Autor, 2013.

A escassez de dados de condutividade hidráulica na parte leste e noroeste da área de estudo, torna a análise desse parâmetro limitada para essas regiões. A predominância da condutividade hidráulica na área de estudo variaram entre 0,004 cm/s a 0,012 cm/s. Quanto menor os valores encontrados, maior a dificuldade de percolação da água subterrânea e do contaminante.

As maiores condutividades hidráulicas que receberam índices 6, 8 e 10 foram detectadas na confluência entre os bairros de Bebedouro (maior parte da área), Pinheiro, Gruta de Lourdes e Chã de Jaqueira.

Os bairros de Cruz das Almas e Mangabeiras apresentaram condutividades hidráulicas de 0,034 cm/s e 0,045 cm/s respectivamente, influenciando diretamente nos resultados da interpolação de sua área de influência.

Os bairros do Benedito Bentes e da Cidade Universitária apresentaram uma grande mancha de condutividade hidráulica que varia de 0,012 a 0,028 cm/s. Tais valores apresentam-se numa escala intermediária do método DRASTIC recebendo índice 4.

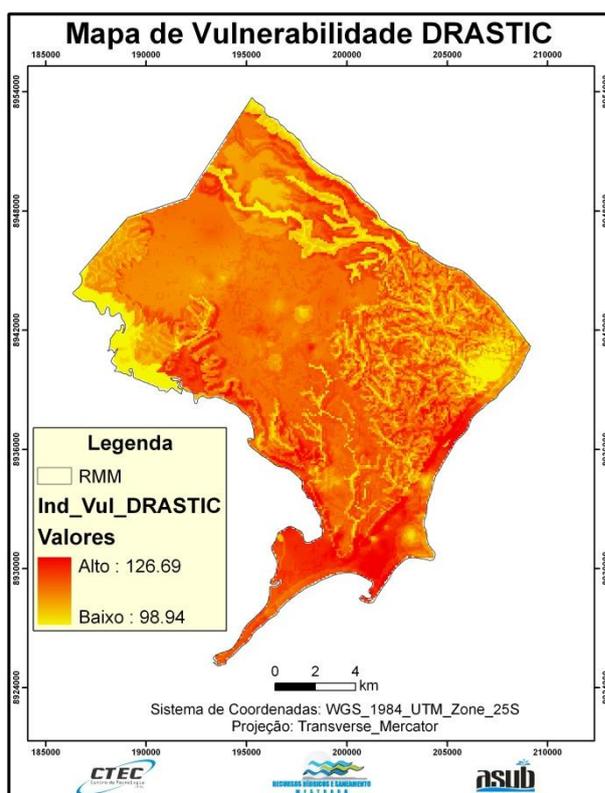
A grande faixa que recebeu índice 2 (cor verde claro) ocorreu devido à ausência de dados para alimentar o *software* em sua interpolação. Tal fato pode ser evidenciado pela falta

de poços cadastrados nos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte, além dos bairros de Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce (região leste da Figura 33).

5.1.8 Mapa de Vulnerabilidade DRASTIC

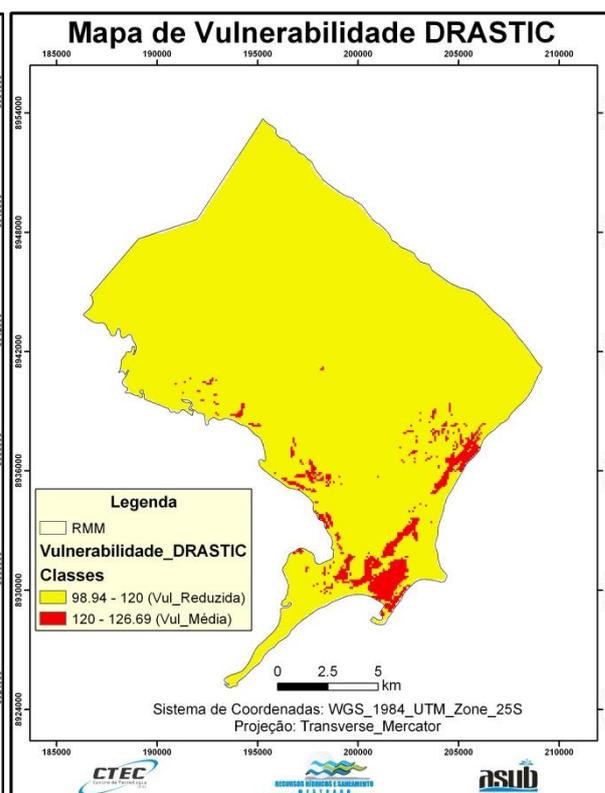
A seguir são apresentados os mapas (Figuras 35 e 36) de vulnerabilidade do índice DRASTIC. Os valores encontrados estão de acordo com as classes propostas pelo método, no entanto, foram detectadas apenas as classes de vulnerabilidade Média e Reduzida.

Figura 35 – Mapa de vulnerabilidade final.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 36 – Classes da vulnerabilidade.



Fonte: Autor, 2013.

Os valores encontrados para a área de estudo variaram de 98,94 (valor mínimo) a 126,69 (valor máximo) abrangendo um total de duas classes de vulnerabilidade. A classe de vulnerabilidade Reduzida (Baixa) possui cerca de 96% da área de estudo enquanto que os 4% restante pertencem à classe de vulnerabilidade Média (Moderada).

A maior parte da área de estudo apresenta índice de vulnerabilidade Baixa, exceto na região sul e sudoeste (partes dos bairros de Jaraguá, Poço, Pajuçara, Centro, Ponta da Terra, Jacintinho, Jacarecica, Chã da Jaqueira, Bebedouro e Fernão Velho), que possui classe Moderada. Há menor proporção de índice de vulnerabilidade média em bairros circunvizinhos como Prado, Vergel do Lago, Mutange, Levada, Jardim Petrópolis e Clima Bom.

Levando em consideração que o método DRASTIC possui sete parâmetros, apenas o S (Solos) e o T (Topografia) não possuíam dados pontuais, já que tratavam-se de mapas temáticos. Os demais itens do método como: D (Nível Estático); R (Recarga); A (Meio Aquífero); I (Meio Insaturado); e C (Condutividade Hidráulica) foram interpolados para obtenção de resposta em toda a área de estudo, já que os dados são pontuais.

5.2 Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (GOD)

A partir da análise dos dados, foram atribuídos índices para os parâmetros grau de confinamento do aquífero (livre, confinado, semi-confinado) (**G**), litologia da zona vadosa (**O**) e para a profundidade do lençol freático (**D**). De posse desses índices, foi interpolado para a área de estudo, a fim de obter valores para toda a área de estudo. Em seguida foram multiplicados os parâmetros para obtenção do mapa final de vulnerabilidade GOD.

Este método não utiliza pesos para os parâmetros utilizados, mas apenas índices que variam de 0 a 1, onde o maior valor corresponde a maior vulnerabilidade. A estrutura simples e pragmática deste método, baseado no sistema empírico, foi aplicado por apresentar uma rápida avaliação da vulnerabilidade de um aquífero à poluição.

Através da análise dos perfis litológicos da área de estudo, apenas 87 poços de um total de 418 poços analisados tiveram todos os seus parâmetros identificados. Os 331 poços restantes tiveram o parâmetro de grau de confinamento, não identificados com total confiabilidade da informação, sendo excluídos da análise. Os relatórios dos perfis dos poços não identificaram este parâmetro devido a difícil identificação das camadas confinantes e/ou fraturadas do aquífero que determinariam se o aquífero seria livre, confinado ou semi-confinado. Por não obter respostas confiáveis para o modelo, quanto às análises do parâmetro (**G**), o parâmetro (**O**) que tem relação direta, foi excluído da análise. A base de dados de análise do parâmetro (**D**) é igual para os três métodos presentes nessa pesquisa.

5.2.1 Grau de Confinamento do Aquífero (G)

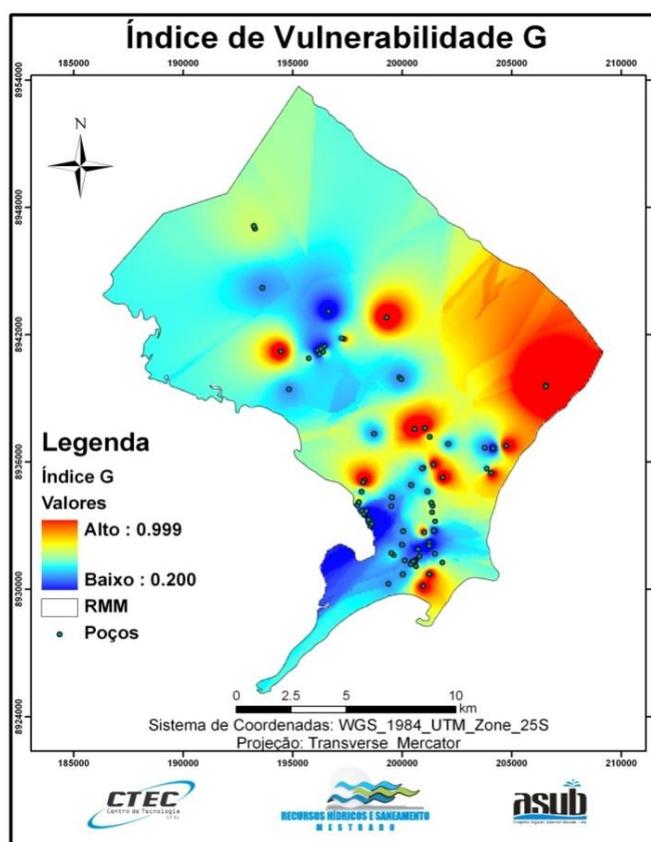
A determinação do confinamento dos aquíferos da região de estudo se deu através da leitura e interpretação dos perfis de poços adquiridos junto aos órgãos ambientais gestores dos recursos hídricos subterrâneos (SEMARH, SIAGAS e CASAL). Dos 417 poços analisados, apenas em 87 estava descrito tal parâmetro, deixando um elevado grau de incerteza quanto ao nível de percolação das águas subterrâneas nos aquíferos da região. A tabela 18 apresenta o comportamento dos aquíferos da região quanto ao seu confinamento.

TABELA 18 - Síntese do grau de confinamento, seus índices e porcentagens

Graus de Confinamento	Índices	Nº de Poços	%
Livre	1	19	21.84
Não Confinado Coberto	0.6	12	13.79
Semi Confinado	0.4	31	35.63
Confinado	0.2	25	28.74

Fonte: Autor, 2013.

A maior quantidade dos poços analisados nesse parâmetro, apresentou grau de confinamento do aquífero semi-confinado, recebeu índice 0,4 perfazendo um total de 31 poços, ou seja, cerca de 36% do total analisado. Entretanto, 12 poços apresentaram-se de forma não confinada coberta sendo atribuído índice 0,6 (cerca de 14%). A interpolação desses índices pode ser observada na Figura 37.

Figura 37 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro G.

Fonte: Autor, 2013.

A região avermelhada, leste da Figura 37 (bairros do Benedito Bentes, Jacarecica, Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce) corresponde a maior concentração de aquíferos livres, ou seja, recebem índice 1. Os bairros de Jaraguá e Poço (área sul do mapa), além da Serraria, Jardim Petrópolis, Barro Duro, Clima Bom, Santos Dumont, Cidade Universitária, Chã de

Jaqueira, Chã de Bebedouro e Bebedouro região central e oeste do mapa, apresentam as características de aquífero confinado a semi-confinado de acordo com o tipo de argila e espessura da camada.

A área em azul escuro localizado entre os bairros de Pontal da Barra, Trapiche, Prado, Ponta Grossa, Vergel do Lago, Levada, Centro, Farol, Jacintinho, Mangabeiras, Pinheiro e Mutange apresenta uma bateria de poços com características de confinamento e/ou semi-confinamento, recebendo índices que variam de 0,2 até 0,4. Além destes, a região de confluência entre os bairros do São Jorge e Jacarecica, além do Santos Dumont, Tabuleiro dos Martins e Cidade Universitária apresenta os mesmos índices.

5.2.2 Litologia da Zona Vadosa (O)

Foram interpretados os perfis litológicos dos 87 poços tubulares presentes na área de estudo, localizadas acima do nível freático. De modo geral, as camadas (estratos litológicos) apresentaram predominância dos materiais descritos na Tabela 19 recebendo os respectivos índices.

TABELA 19 – Materiais litológicos com seus respectivos índices atribuídos

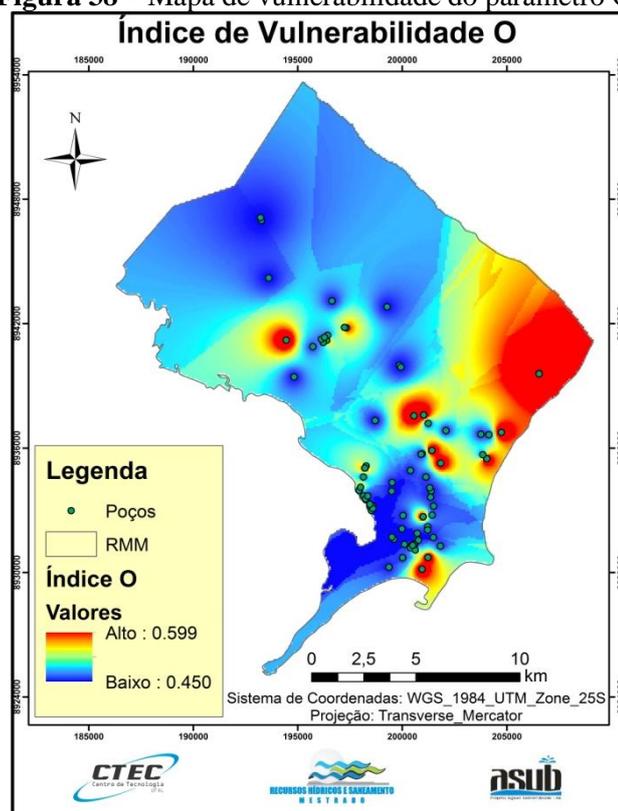
Camadas Litológicas dos Poços Tubulares			
Material	Índice	Nº de Poços	%
Areia, Cascalho e Pedregulho	0,60	17	19.54
Areia com Argila, Argila, Calcário e (Folhelho)	0,45	70	80.46

Fonte: Autor, 2013.

Como só foi possível identificar o grau de confinamento do aquífero em 87 poços tubulares, optou-se por interpretar a litologia da zona vadosa apenas desses poços, para que não houvesse discrepância de análises. Entretanto, poder-se-ia analisar os 417 poços cadastrados nesse estudo e que foram utilizados nas demais metodologias.

A maioria dos poços apresentou composições diversas nos estratos litológicos, mas sempre a base de areia, areia argilosa, argila e algumas intercalações de calcário, folhelho e siltito (verde). Nas regiões litorâneas observou-se a presença de cascalhos, pedregulhos, areias média a grossa, argila cinza a escura/preta (vales fluviais geralmente e próximo a manguezais) com lentes de turfa e calcário (recifes e conchas marinhas). A Figura 38 apresenta os índices atribuídos ao parâmetro O do método GOD.

Figura 38 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro O.



Fonte: Autor, 2013.

A ausência de poços tubulares na região norte e noroeste da Figura 38 além de alguns poços isolados dificultam o processo de análise do parâmetro Litologia da Zona Vadosa (O). Entretanto, apresentam semelhanças com o parâmetro Insaturado (I) do método DRASTC, validando tal análise com redução de poços.

As grandes manchas avermelhadas foram interpoladas com até dois poços tubulares, daí a atribuição de um mesmo índice para grandes extensões de terra. Tal fato pode ser evidenciado na região leste da Figura 38 onde apenas um poço foi utilizado para interpolação. Dessa forma, se esse poço atribui índices alto ou baixo para um determinado parâmetro do método utilizado na determinação da vulnerabilidade do aquífero, este influenciará quase que integralmente as áreas circunvizinhas, podendo ou não ser representativo da área de estudo.

Dessa forma os únicos poços localizados na parte alta do mapa influenciou diretamente na atribuição de índices baixos (0,45), a base de areia, intercaladas de argila e folhelhos. A região em azul escuro entre os bairros do Trapiche, Vergel do Lago, Ponta Grossa, Levada, Bom Parto, Farol, Mutange e Pinheiro apresentam grandes concentrações de areia argilosa e argila cinza, além de intercalações de argila (plástica) preta com lente de turfa, calcário, cascalho (conchas) e folhelhos esverdeados, que juntamente com as argilas de tom

cinza a verde escuro juntamente com os calcários caracterizam a mudança da unidade litoestratigráfica, apresentam os menores índices na região estudada.

5.2.3 Profundidade do Lençol Freático (D)

As análises dos 111 poços para atribuição do índice de profundidade do nível estático pode ser observado na Tabela 20.

TABELA 20 – Profundidades dos níveis estáticos dos poços com seus respectivos índices

Profundidade do Lençol Freático			
Níveis Estáticos	Índice	Nº de Poços	%
> 50 m	0,60	39	35.14
20 m e 50 m	0,70	53	47.75
5,0 m e 20 m	0,80	13	11.71
< 5,0 m	0,90	6	5.41

Fonte: Autor, 2013.

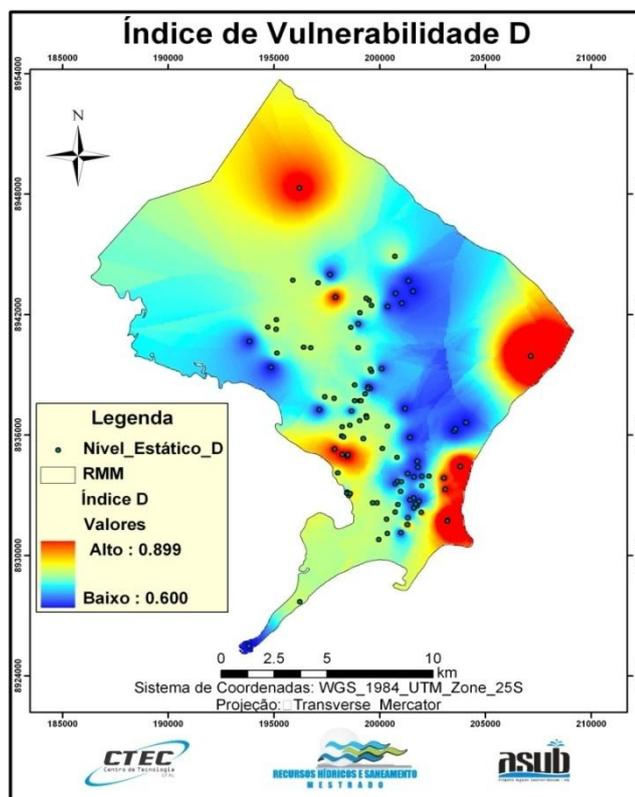
A grande concentração dos níveis estáticos na área de estudo apresenta-se entre as profundidades de 20 m a 50 m recebendo índice 0,7 (53 poços). Vale salientar que quanto maior à distância percorrida pelo contaminante até atingir o lençol freático mais propício à biodegradação este será. Como afirma Cunha (2009), locais com níveis freáticos mais profundos contribuem no processo de eliminação de certos agentes patogênicos devido a um maior tempo de permanência na zona vadosa.

Os poços com profundidades do lençol freático superiores a 50 m, que receberam índice 0.6 encontram-se situados na região dos tabuleiros costeiros (bairros do Benedito Bentes, Tabuleiro, Clima Bom, Santos Dumont, Cidade Universitária, Serraria, Barro Duro, São Jorge, Santa Amélia e Jacintinho) já que as áreas mais próximas aos vales fluviais, as regiões costeiras e lagunar apresentam menores profundidades e um contato mais próximo com as águas superficiais, já que alimentam esses cursos d'água (rios efluentes).

Os níveis estáticos abaixo dos 5 m encontram-se nos bairros da Ponta Verde, Jatiúca, Cruz das Almas, Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce. Esses valores são propícios, uma vez que estão próximos ao mar.

A distribuição dos poços analisados, juntamente com os resultados da interpolação realizada dos índices atribuídos ao parâmetro nível estático, pode ser observada na Figura 39.

Figura 39 – Mapa de vulnerabilidade do parâmetro D.



Fonte: Autor, 2013.

Os pontos em vermelho nos bairros de Bebedouro, Chã de Bebedouro, Chã de Jaqueira, Cidade Universitária e a área agrícola a norte da Figura 39 apresentam índices 0,8, ou seja, distância do nível estático dos poços analisados, variando de 5 a 20 metros de profundidade.

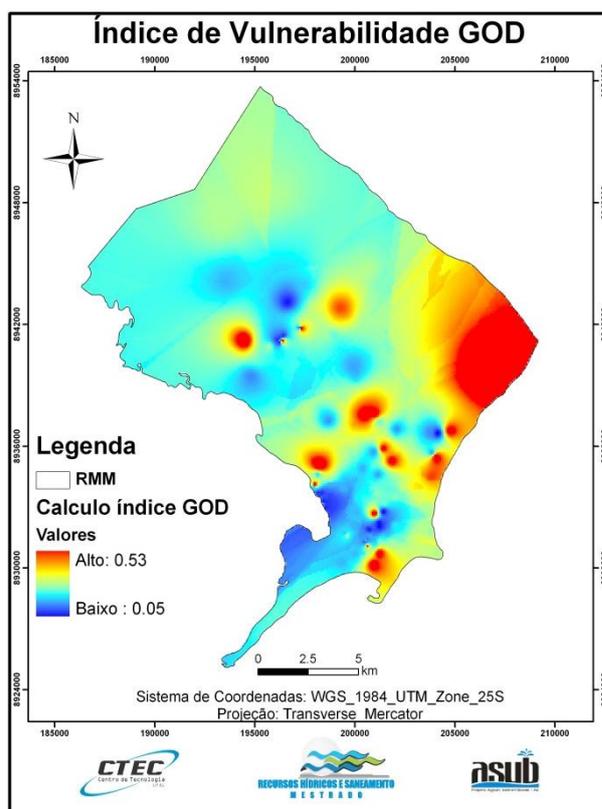
As grandes manchas em azul escuro correspondem às maiores profundidades do lençol freático, seguidos do azul claro e amarelo (zonas de transição das menores para as maiores profundidades dos níveis estáticos).

Sabe-se que o nível freático (estático) varia em função da intensidade da exploração do aquífero e da variação climática e geológica. Dessa forma, esse parâmetro deve ser monitorado frequentemente já que a vulnerabilidade do aquífero está intimamente associada à distância do nível d'água que auxilia no tempo de penetração da água ou de um possível contaminante alcançar a água subterrânea.

5.2.3 Mapa de Vulnerabilidade GOD

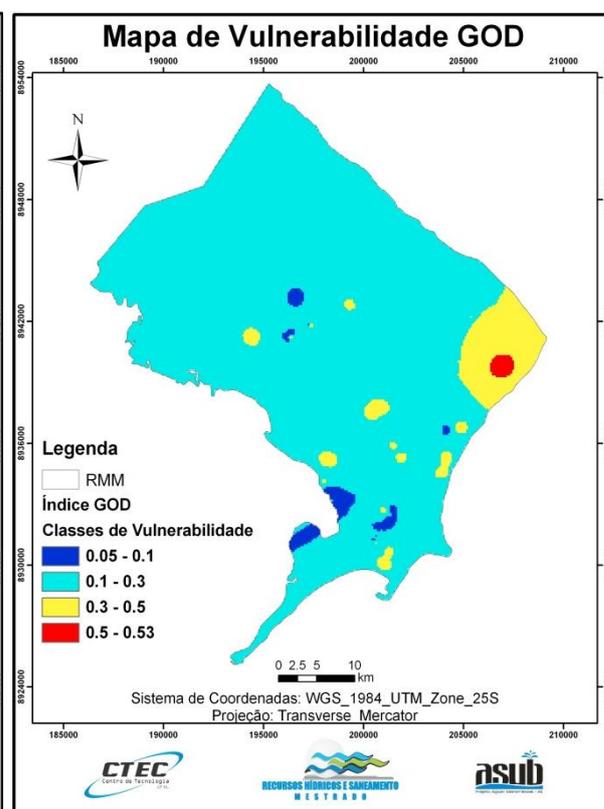
Após a multiplicação dos três parâmetros descritos anteriormente entre si, temos o índice de vulnerabilidade GOD da área de estudo (Figuras 40 e 41).

Figura 40 – Mapa de vulnerabilidade GOD.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 41 – Classes de vulnerabilidade GOD.



Fonte: Autor, 2013.

A variação dos valores de vulnerabilidade da metodologia GOD foi de aproximadamente 0,05 a 0,53 atingindo um total de 4 das cinco classes propostas na metodologia GOD.

Na Figura 40 observa-se um degradê de cores que variam do azul escuro (lugares menos vulneráveis) ao vermelho (áreas mais vulneráveis à contaminação do aquífero na área de estudo), passando pelo azul claro, amarelo e laranja (vulneráveis intermediárias).

As áreas com índice de vulnerabilidade Desprezível (azul escuro) encontram-se na transição dos bairros de Ponta Grossa e Vergel, Jacintinho e Mangabeiras, São Jorge e Jacarecica, Bom Parto, Farol, Pinheiro e Mutange, além de manchas pontuais nos bairros do Tabuleiro dos Martins e Cidade Universitária. Tal fato pode ser comprovado quando analisado a bateria dos perfis dos poços da região que apresenta para o parâmetro (G) aquífero confinado, com camadas litológicas à base de argila e para o Parâmetro (D) nível estático acima de 10 metros de profundidade chegando a atingir cerca de 30m.

Por sua vez, a figura 41 apresenta as vulnerabilidades em 4 cores, sendo a predominante a cor azul claro. A maior vulnerabilidade encontrada (cor vermelha) está presente na área leste do mapa, justamente a área de transição entre os bairros de Guaxuma,

Garça Torta e Riacho Doce. A atribuição desses índices deve-se, ao nível estático menor que 5 metros, sua base litoestratigráfica é composta por sedimentos arenosos e arenos quartzosos (Sedimentos de Praia e Aluvião - Quaternário) e possuir grau de confinamento do aquífero livre, obtendo os maiores valores para o índice de vulnerabilidade GOD na área de estudo.

Como zona de transição da vulnerabilidade tem-se, uma vulnerabilidade moderada com índices variando de 0,3 a 0,5 estando representada pela com amarela, localizada em maior proporção nos bairro de Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce, ou seja, circundando a mancha vermelha de vulnerabilidade alta. A seguir é apresentado o Quadro 4 com a síntese das informações do mapa de vulnerabilidade GOD.

Quadro 4 - Resumo do mapa de vulnerabilidade GOD.

ÍNDICE DE VULNERABILIDADE GOD				
Desprezível 0 - 0.1	Baixa 0.1 - 0.3	Moderada 0.3 - 0.5	Alta 0.5 - 0.7	Área km² e %
4,3 km ²	252,49 km ²	18,85 km ²	1,08 km ²	276,73
1,55 %	91,24 %	6,81 %	0,39 %	100%

Fonte: Autor, 2013.

Com a multiplicação dos três parâmetros (G x O x D), para determinação do índice de vulnerabilidade GOD, conclui-se que apesar de existirem áreas com baixa profundidade do lençol freático, como toda a margem fluvial e marítima, o índice de vulnerabilidade predominante foi o Baixo, chegando a atingir 91,24% da área de pesquisa.

A pequena quantidade de dados e sendo estes não uniformes (não espacializados uniformemente) na área de trabalho, ocasionaram uma subestimação da vulnerabilidade (índices muito homogêneos devido à ausência de dados na interpolação, fazendo com que obtivesse respostas menos confiáveis) que refletiu numa Baixa Vulnerabilidade em cerca de 90% da área de estudo.

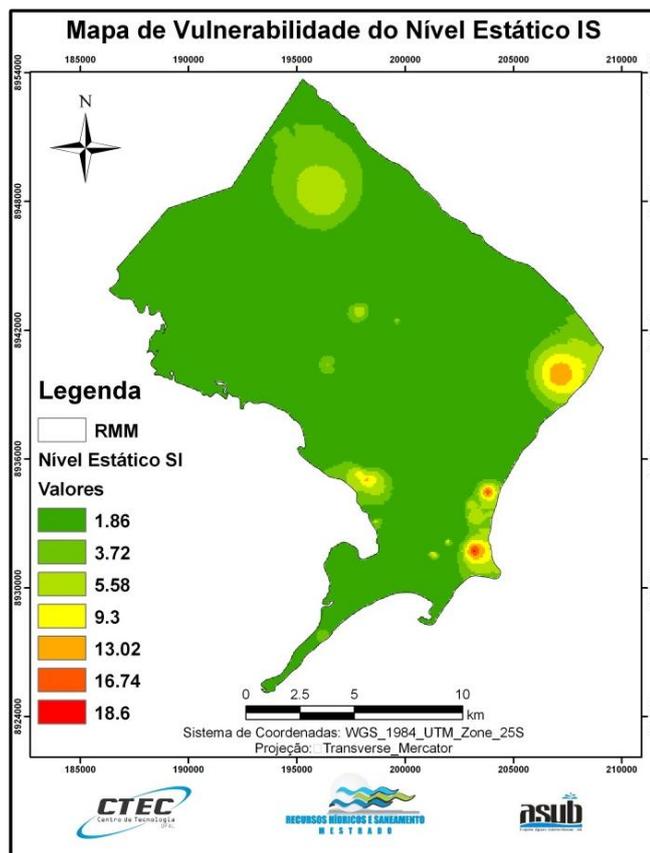
5.3 Análise da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (IS)

O índice IS analisa os parâmetros: profundidade do aquífero, recarga, meio aquífero, topografia e uso e ocupação do solo. Este último parâmetro está relacionado ao perigo ou risco causado pelas atividades antropogênicas, ou seja, não são analisadas as características intrínsecas do aquífero, mas a influência que as atividades antrópicas podem proporcionar as águas subterrâneas.

5.3.1 Nível Estático (D)

O cadastramento dos poços localizados na área de estudo permitiu a realização do levantamento dos níveis estáticos da área de estudo. De posse desses dados foram atribuídos índices e multiplicados por seus respectivos pesos, conforme pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 – Mapa de vulnerabilidade de Nível Estático (NE) do método IS.



Fonte: Autor, 2013.

A profundidade do lençol freático identificado nos poços localizados entre os bairros da Ponta Verde a Cruz das Almas, da Guaxuma ao Riacho Doce, de Bebedouro a Chã de Jaqueira além da área agrícola na parte norte do mapa influenciaram diretamente na variação da vulnerabilidade no parâmetro Nível Estático.

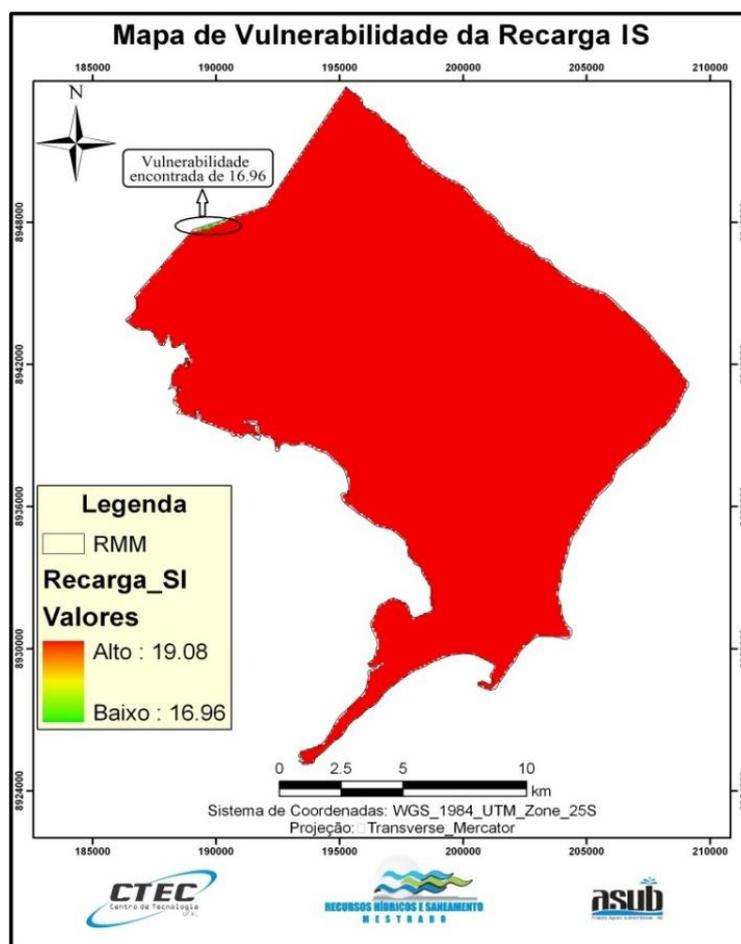
A maior parte da área de estudo (cor verde escuro) apresentou os menores índices (1,86) de vulnerabilidade presentes. Vale salientar que, quanto menor o índice atribuído a um parâmetro, menor será a influencia deste parâmetro na determinação da vulnerabilidade à contaminação.

5.3.2 Recarga (R)

A recarga é a quantidade de água que penetra o solo até atingir o lençol freático. Segundo Nobre (2006) a recarga ocorre por meios naturais (chuva) e artificiais (áreas irrigadas e áreas urbanas como vazamentos de redes de abastecimentos e infiltrações de águas servidas). O mapa de recarga final levou em consideração esses fatores, bem como áreas agrícolas.

Como esse parâmetro é baseado na recarga desenvolvida para a metodologia DRASTIC, alterando-se apenas as notas e seus respectivos pesos, os resultados visuais do mapa são bastante semelhantes. Na Figura 43 é apresentado o mapa final de vulnerabilidade de recarga para a área de estudo.

Figura 43 – Mapa de vulnerabilidade da recarga (IS).



Fonte: Autor, 2013.

Cerca de 99% da área de estudo apresentou recarga acima de 254 mm/ano, refletindo num mapa de vulnerabilidade quase que uniforme para a área de estudo. Após a aplicação das notas correspondentes à recarga e sua respectiva ponderação, o valor mínimo encontrado foi

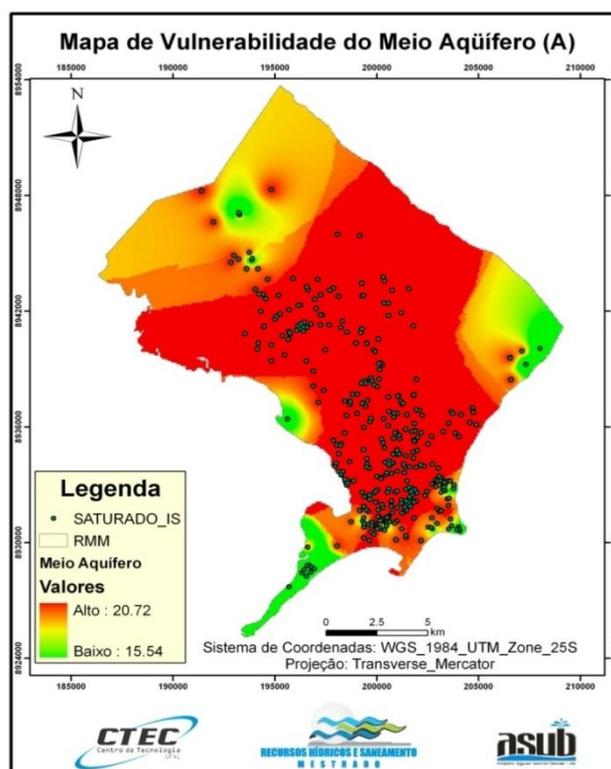
16,96 enquanto que o valor máximo determinado foi 19,08. O valor mínimo pode ser encontrado em pequena porção extrema no noroeste da área de estudo.

5.3.3 Meio Aquífero (A)

Uma formação geológica pode ser considerada como meio aquífero quando esta serve como meio de transporte das águas subterrâneas. Dessa forma influenciando na maior ou menor vulnerabilidade.

O material mais presente no parâmetro meio aquífero encontrado na área de estudo foi a areia e cascalho, ou seja, materiais não consolidados de quantidades variáveis além de intercalações de materiais finos (argila). A classificação do meio aquífero se deu a partir dos dados litológicos obtidos dos perfis dos 417 poços cadastrados, Figura 44.

Figura 44 – Mapa de vulnerabilidade do meio aquífero (IS).



Fonte: Autor, 2013.

Esse parâmetro foi interpretado a partir das fichas cadastrais dos poços da área de estudo. No meio saturado obteve-se valor mínimo de 15,54 e máximo 20,72. Quanto maior o valor de cada parâmetro, maior a vulnerabilidade presente. Do mesmo modo que, quanto maior a granulometria dos sedimentos, maiores serão as vulnerabilidades, pois maiores serão as permeabilidades e, portanto, menor capacidade de atenuação do contaminante (SANTOS, 2010).

Toda a região avermelhada apresenta camadas de areia média a grossa, que facilita a penetração de contaminantes, além de intercalações de argila que reduzem a velocidade do fluxo perpendicular. Para *Alleret al.*(1987), quanto maior o tamanho do grão e das fraturas da rocha aquífera, maior a permeabilidade e menor será a capacidade de atenuação do material do aquífero a um contaminante.

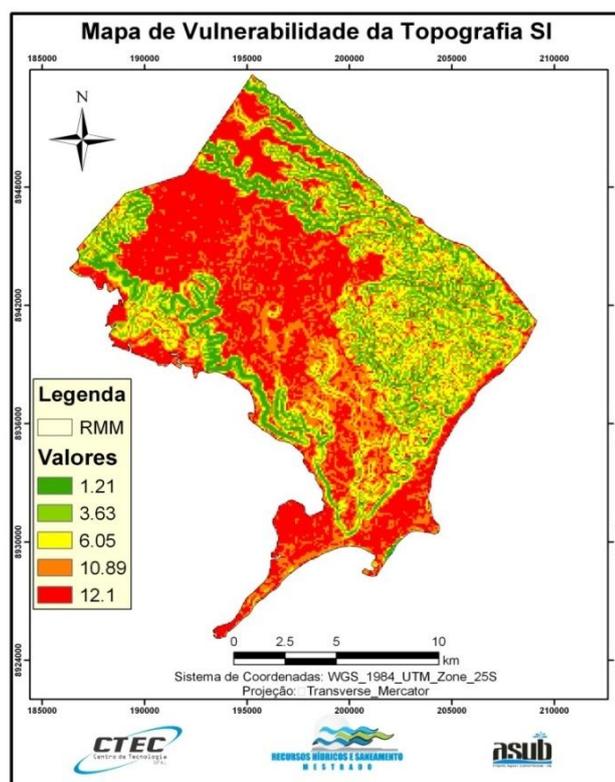
Nesse parâmetro, zona saturada, o extremo leste e sudoeste, além da parte noroeste, de coloração esverdeada, apresentam os menores índices, conforme explicado anteriormente no índice A do método DRASTIC, já que foram utilizados os mesmos dados variando apenas o Peso e o Índice.

5.3.4 Topografia (T)

A topografia entra na análise da vulnerabilidade por ser uma das características de influência da infiltração da precipitação no meio aquífero, ou seja, áreas íngremes possibilitam o maior escoamento das águas, enquanto que áreas planas favorecem a manutenção da água na superfície e consequente percolação.

A Figura 45 apresenta o mapa de declividade, que foi gerado a partir da base SRTM SC-25-V-C da área de estudo. A sua confecção difere do mapa de declividade da metodologia DRASTIC por alterar os pesos atribuídos (fator de ponderação).

Figura 45 – Mapa de vulnerabilidade da topografia (SI).



Fonte: Autor, 2013.

As áreas avermelhadas e alaranjadas presentes na área de estudo, com índices variando de 10,89 a 12,10 são mais propícias à penetração de chuvas e contaminantes lançados na superfície. Entretanto, as áreas em cor verde clara e escuro (valores entre 1,21 e 3,63) representam os menores índices, ou seja, dificultam a penetração de líquidos nas camadas mais profundas do solo, até atingir o aquífero.

5.3.5 Uso e ocupação do solo (LU)

Os potenciais focos de contaminação foram classificados como fontes pontuais e difusas de poluição, através do mapa de uso e ocupação do solo. Sendo atribuídos índices e pesos de acordo com os resíduos produzidos.

Foram levantadas as atividades potencialmente poluidoras, como postos de combustíveis que comercializam gasolina a base de Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno (BTEX), cemitérios que produzem Necrochorume, Enxofre e Potássio, Indústrias diversas (Metais pesados, Hidrocarbonetos aromáticos e Solventes organoclorados) atividades urbanas (Nitratos, Coliformes Totais e *Escherichia coli*, e Cloreto), aterro sanitário e lixão (nitrogênio amoniacal e Chorume) e atividades agrícolas (Borra de enxofre, Potássio, Nitrogênio e Fósforo). Dessa forma os elementos destacados serviram como compostos rastreadores de contaminação das águas subterrâneas.

A maior parte da área de estudo, encontra-se localizada no município de Maceió, com mancha urbana identificada na Figura 46. Apenas 27 % da população de Maceió é atendida por saneamento básico, os 73% da população restante que não é atendida pela estrutura de saneamento, rejeita seus resíduos (excretos) em fossas sépticas, poços absorventes/fossa sumidouros e corpos d'água *in natura*, que são fontes de nitrato para o ambiente subterrâneo. Para Nobre et al. (2008) as fontes de nitrato (NO_3^-) em águas subterrâneas derivam tanto do uso de fossas sépticas em áreas urbanas como de fertilizantes em áreas agrícolas.

A cobertura parcial das estruturas de saneamento básico na área de estudo afeta a população negativamente, pois, abre espaço para doenças relacionadas à presença de coliformes fecais (bactérias do grupo coliformes) oriundos de fezes introduzidas no ambiente natural (água e solo). A junção dessas características promove a presença do nitrato na área de estudo. Dessa forma, o saneamento básico é fundamental para a prevenção de doenças.

As fontes difusas determinadas neste estudo foram às áreas urbanas (fossas sépticas em larga escala) e as áreas agrícolas (agrotóxicos e fertilizantes). Essas fontes foram classificadas de acordo com o maior ou menor grau de periculosidade de contaminação das

águas subterrâneas de acordo com a metodologia IS, que atribuí índices diferenciados para cada uso do solo.

Os diversos usos do solo na área de trabalho foram identificados, localizados e aplicados seus respectivos índices e posteriormente multiplicados por seus pesos, conforme pode ser observado na Tabela 21.

TABELA 21 – Aplicação dos Índices e Pesos do método IS na região de trabalho

Classe de Usos do Solo	Índices	Pesos	IS
Pastagem em área úmida	50	0.222	11.1
Solo exposto	50	0.222	11.1
Remanescente de mata atlântica	0	0.222	0
Área urbana	75	0.222	16.65
Cana-de-açúcar	50	0.222	11.1
Corpos D'Água	50	0.222	11.1
Porto	75	0.222	16.65
Aeroporto	75	0.222	16.65
CBTU	75	0.222	16.65
Antigo Lixão e Aterro Sanitário de Maceió	100	0.222	22.2
Cemitérios	75	0.222	16.65
Estruturas de Saneamento	75	0.222	16.65
Indústrias	75	0.222	16.65
Lagoas de Drenagem e de Saneamento	75	0.222	16.65
Postos de Gasolina	75	0.222	16.65

Fonte: Autor, 2013.

O método IS aplicado visa identificar as áreas influenciadas pela ação antrópica e atribuir índices, dos menos impactantes aos mais impactantes ao aquífero. Dessa forma, as áreas naturais como os remanescentes de mata atlântica recebem índice 0 por não impactar o meio ambiente e o lixão recebe índice máximo 100, já que propicia o contato direto dos rejeitos humanos (resíduos) com o solo exposto.

Todos os usos descritos na Tabela 21 foram identificados na área de trabalho, gerando polígonos representativos (Buffer), a partir das atividades descritas e realizadas no ambiente de trabalho, já que foram localizadas através de pontos no *Google Earthe* ou verificadas *in loco*. Tal ação foi necessária por não existir um padrão nas dimensões dos empreendimentos, como por exemplo, os postos de gasolina e cemitérios. Sabe-se da perda e do ganho de espaço em diversos empreendimentos, entretanto, objetivou-se padronizar a informação para facilitar o cálculo no *software* de geoprocessamento.

As áreas agrícolas, que proporcionam a presença do nitrato, solo exposto e corpos d'água receberam índice 50, ou seja, oferecem metade do risco de um lixão a céu aberto, onde

o chorume pode penetrar (percolar) as camadas do solo mais profundas de forma livre até atingir o lençol freático (aquífero).

O parâmetro usos do solo do método (IS) atribui índices ao risco observado nas diversas atividades presentes na área de estudo, ou seja, a depender dos materiais utilizados na geração de emprego e renda, tem-se noção do impacto que estas proporcionam ao aquífero.

As Figuras 46 e 47 apresentam, respectivamente, o mapa de uso e ocupação do solo, e o mapa de vulnerabilidade correspondente a este parâmetro.

Figura 46 – Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo alterado.

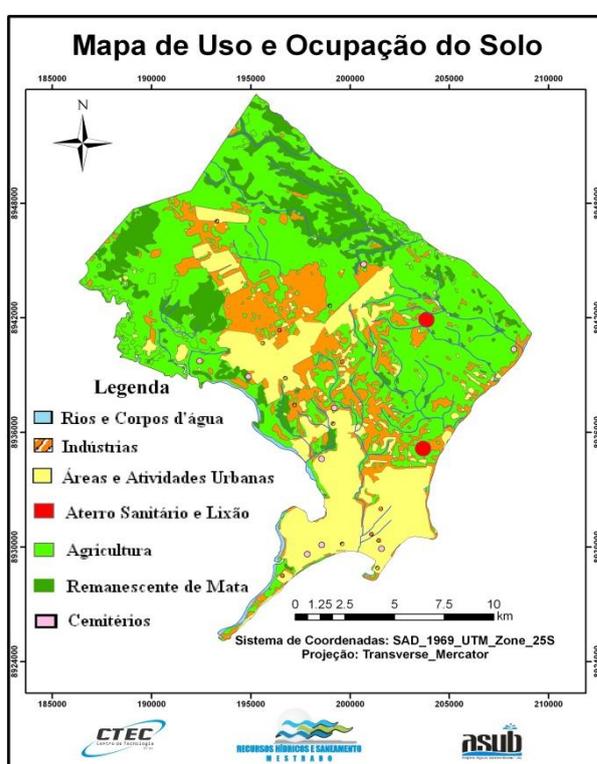
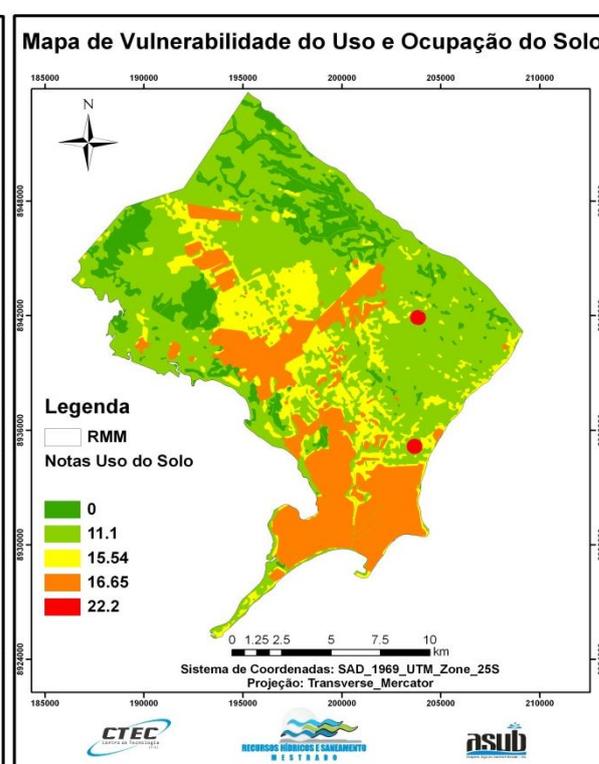


Figura 47 – Mapa de vulnerabilidade do uso e ocupação do solo (IS).



Fonte: Adaptado da Embrapa (2008) *apud* Autor, 2013.

Fonte: Autor, 2013.

Após identificar as áreas com as diversas atividades antrópicas desempenhadas (Figura 46), foram atribuídos os seus respectivos índices e pesos, conforme pode ser observado na Figura 47. As duas áreas circulares em vermelho, nesta figura, correspondem ao antigo lixão de Maceió e o novo aterro sanitário. Como esses empreendimentos trabalham com diversos componentes que podem contaminar o aquífero em curto espaço de tempo, estes receberam os maiores índices, propostos pelo método IS.

As áreas em cor laranja, Figura 47, corresponde a intensa urbanização, já as áreas verde claro e escuro corresponde a agricultura da cana de açúcar e remanescente de mata atlântica, ou seja, as demais atividades presentes na mancha urbana (Residências, Escolas,

Lojas, Aeroporto, Porto, Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU), Cemitérios, Estruturas de Saneamento, Indústrias, Lagoas de Drenagem, Lagoas de Saneamento e Postos de Gasolina) receberam os mesmos índices (75), conforme metodologia proposta.

As áreas remanescentes de vegetação natural, cor verde escura, não apresentaram risco de contaminação do aquífero. Como o parâmetro (LU) visa atribuir índices pelos diversos usos do solo, então as atividades presentes na mancha urbana da cidade apresentou altos índices de vulnerabilidade (cores vermelha, laranja e amarela).

Vale salientar que as áreas industriais, portuárias e de aterro sanitário e lixão, não estão dispostos na Tabela 22, entretanto receberam notas de acordo com a metodologia IS. Outro fator importante de análise são as dimensões da área ocupada com cana de açúcar, pouco explorado em estudos de vulnerabilidade de aquífero na região, em função da pouca informação disponível.

TABELA 22 – Áreas (km²) dos usos e ocupações do solo da área de estudo

Uso e Ocupação do Solo	
Classe	Área em km²
Água	1,997
Nuvem e Sombra de nuvem	4,123
Pastagem em área úmida	5,397
Remanescente de mata atlântica	32,968
Solo exposto	43,229
Área urbana	56,334
Cana-de-açúcar	132,587
Área Total	276,636

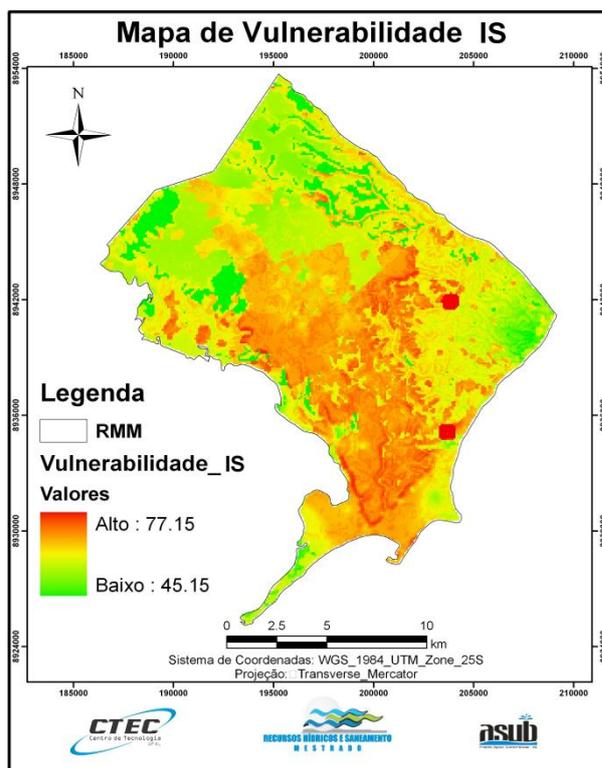
Fonte: Autor, 2013.

O dimensionamento das áreas descritas na Tabela 22 foi extraído do mapa de uso e ocupação do solo da Embrapa (2008).

5.4 Resultado do índice de vulnerabilidade IS

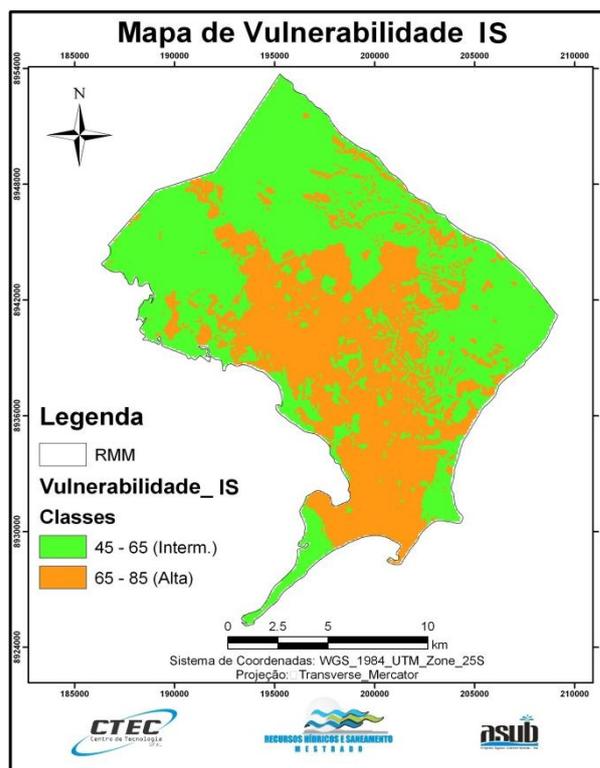
Os quatro mapas (D, R, A e T) já estavam preparados pelo método DRASTIC. O mapa LU foi adaptado à partir do mapa de uso e ocupação do solo da Embrapa (2005). De posse desses 5 mapas temáticos, foram atribuídos seus respectivos índices e pesos e, posteriormente, foram multiplicados entre si para obtenção das vulnerabilidades e suas respectivas classes. As Figuras 48 e 49 apresentam os mapas de vulnerabilidade IS.

Figura 48– Mapa final da vulnerabilidade (IS).



Fonte: Autor, 2013.

Figura 49 – Classes da vulnerabilidade (IS).



Fonte: Autor, 2013.

O índice de vulnerabilidade IS variou de aproximadamente 45,15 a 77,15, Figura 48. As áreas avermelhadas, com intercalações de laranja e amarelo representam as mais vulneráveis na área de estudo. Entretanto, as áreas em tom de verde representam as de menor vulnerabilidade, sendo representadas em maior proporção pelas áreas de vegetação de mata atlântica remanescente e áreas agrícolas (cana de açúcar).

Quanto ao número de classes de vulnerabilidade encontrado, percebe-se uma homogeneidade, já que foi detectada apenas duas, a Intermediária (cor verde) e a Alta (cor laranja). Percebe-se, com isso, que o parâmetro uso e ocupação do solo (LU) teve uma contribuição significativa na determinação da vulnerabilidade IS, já que 4 dos 5 parâmetros desse método advêm do DRASTIC, que não apresentou respostas semelhantes quanto às dimensões ocupadas pela vulnerabilidade Alta, conforme pode ser observado na Tabela 23.

TABELA 23 – Classes de vulnerabilidade IS com suas áreas de abrangência

Classes	Área(km ²)	Porcentagem %
Intermediária	155.78	57.52
Alta	115.04	42.48

Fonte: Autor, 2013.

Para o método IS cerca de 40% da área de estudo encontra-se com vulnerabilidade alta, ocorrendo com maior ênfase na mancha urbana da área de estudo, seguida dos solos expostos e agricultura da cana de açúcar. O restante da área possui vulnerabilidade intermediária.

5.5 Análises dos resultados dos métodos DRASTIC, GOD e IS

A criação de mapas temáticos auxilia no processo de verificação das correlações existentes ou não dos dados catalogados e interpretados, ou seja, através do diagnóstico dos dados, pode-se analisar e identificar as possíveis correlações ou discrepâncias das informações existentes, além de verificar o processo de atribuição de índices e pesos que influenciam diretamente nas respostas obtidas.

Os métodos de análise da vulnerabilidade de aquíferos DRASTIC, GOD e IS utilizam alguns parâmetros diferentes com índices e pesos distintos entre si. Com isso, cada método atribui maior peso de análise aos parâmetros de acordo com a metodologia.

A diferença de parâmetros do método DRASTIC (7) para o método GOD (3), pode não favorecer nos resultados obtidos, já que, a dificuldade de obtenção dos mesmos (muitos de forma pontual) demanda muito trabalho e gera, normalmente, incertezas, sendo muitas vezes pouco eficientes, quando verificado os mapas finais de ambos os métodos.

A simplicidade da metodologia GOD, que utiliza três parâmetros (características naturais do aquífero), pode não trazer definições de vulnerabilidade claras para toda a área de estudo, já que, não utiliza características hidrogeológicas da zona satura (litologia e condutividade hidráulica) que auxilia no transporte de contaminantes no aquífero.

Parâmetros como recarga e topografia, que auxilia no nível estático, oriundas do meio natural e a exploração e o uso do solo provenientes da ação antrópica, não são abordadas pela metodologia GOD. Tais parâmetros podem favorecer a determinação da vulnerabilidade.

O método IS além de considerar as características naturais do aquífero, avalia o risco inerente às atividades desenvolvidas sobre a superfície terrestre, além das extrações de recursos naturais.

O Índice de Suscetibilidade tem como parâmetro diferencial o uso e ocupação do solo (LU) que busca retratar com maior fidelidade a vulnerabilidade natural do meio aquífero à ação antrópica. A determinação de áreas propícias à contaminação por diversos poluentes presentes no ambiente podem ser confirmadas através da análise físico-química e bacteriológica das águas subterrâneas que podem determinar os níveis de concentração permitidos para o consumo humano.

Como os três métodos de determinação da vulnerabilidade aplicados DRASTIC, GOD e IS, possuem a maior parte dos parâmetros iguais, variando apenas o índice e o peso adotado. Sentiu-se a necessidade de se padronizar o nível de respostas obtidas.

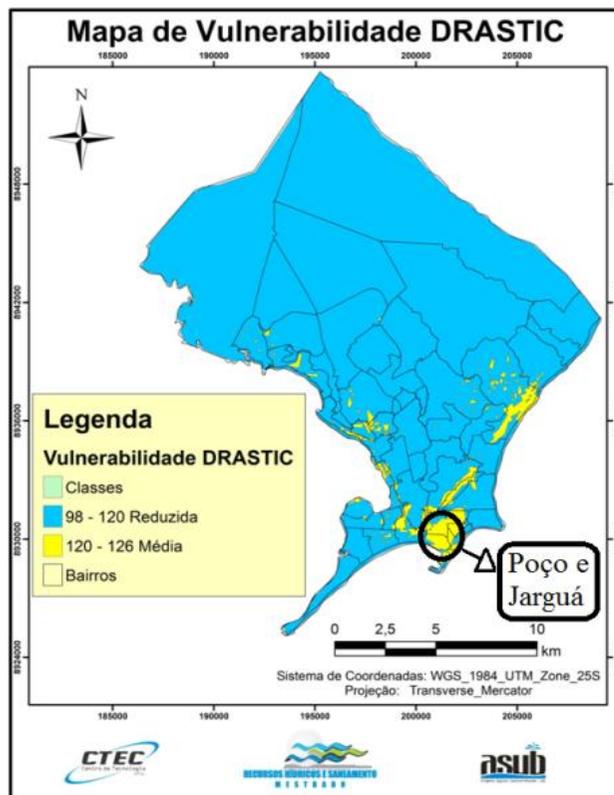
A tentativa de padronização das classes de vulnerabilidade através das cores, que atuam como marco referencial de análise, originou-se através da gama de parâmetros comuns entre os Métodos. Dos sete (7) parâmetros do método DRASTIC, o GOD possui três (3) e o IS quatro (4). Como os métodos alteram apenas a forma de análise dos parâmetros, ou seja, atribuição de índices (c) e pesos (p) foi possível realizar a verificação das vulnerabilidades nos três métodos.

Vale ressaltar que não houve nenhum método de regressão dos valores de vulnerabilidade encontrados nos métodos DRASTIC, GOD e IS, para ratificar a viabilidade metodológica aplicada, ou seja, esse sistema de análise surge de forma inovadora para comparar o resultado de todos os métodos aplicados, juntamente com as classes de vulnerabilidade apresentadas.

Além disso, busca evidenciar o maior grau de vulnerabilidade detectado na junção dos métodos aplicados. Dessa forma, facilitando no processo de conservação e planejamento do uso e ocupação do solo das áreas afetadas.

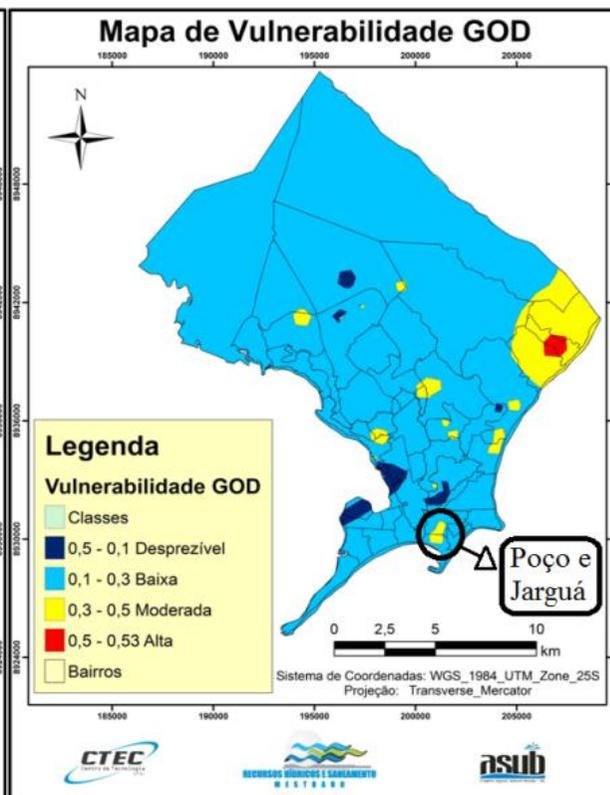
As Figuras 50, 51 e 52, respectivamente, apresentam os mapas finais de vulnerabilidade dos métodos DRASTIC, GOD e IS. Para a realização de uma análise superficial a partir das classes de vulnerabilidade encontradas nos mapas, com a aplicação dos métodos, foram padronizadas cores para as respectivas classes de vulnerabilidade, buscando identificar as áreas com vulnerabilidades comuns.

Figura 50 – Mapa de Vulnerabilidade DRASTIC.



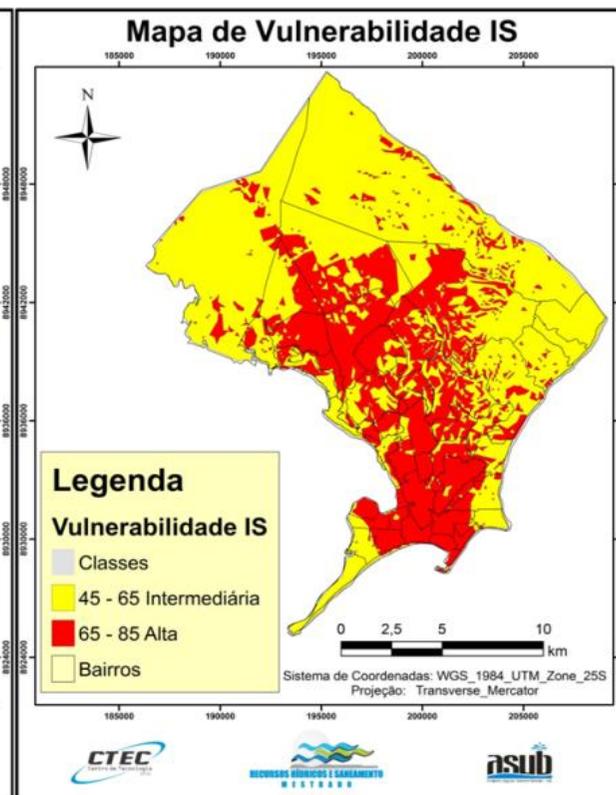
Fonte: Autor, 2013.

Figura 51– Mapa de Vulnerabilidade GOD.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 52 – Mapa de Vulnerabilidade IS.



Fonte: Autor, 2013.

O método GOD em comparação com o método DRASTIC apresenta concordância de respostas, na área de maior concentração de dados, ou seja, área litorânea e urbanizada. Entretanto, quando comparamos os métodos DRASTIC e GOD com o IS, estes apresentam poucas semelhanças, já que nos dois primeiros, a maior parte da área encontra-se com vulnerabilidade Baixa, isso decorre do tipo de parâmetros analisados.

O método DRASTIC de vulnerabilidade apresentou os valores mais homogêneos de vulnerabilidade, dentre os estudados neste trabalho. Vale salientar que esta metodologia possui o maior número de parâmetros, e estes com grau acentuado de aquisição, ou seja, de maior dificuldade já que não estão disponíveis em órgãos ambientais nem sites especializados necessitando de catálogo de dados e tratamento da informação de acordo com a necessidade de utilização. Os mapas de Recarga, Solo e Topografia gerados passaram por análises mais detalhadas já que não estavam disponíveis em locais especializados. Os dados de Nível estático, Meio Aquífero, Zona Insaturada e Condutividade Hidráulica foram extraídos facilmente dos perfis litológicos dos poços perfurados.

Por sua vez, o método GOD apresenta uma distribuição das classes de vulnerabilidade mais heterogênea (4 classes), os métodos DRASTIC e IS apresentaram duas classes cada, sendo que a primeira distribuída entre a reduzida e média e a segunda entre a moderada e alta.

A região sul (confluência dos bairros de Jaraguá e Poço) dos mapas de vulnerabilidade obtiveram classes média e moderada para os métodos DRASTIC e GOD, Figuras 50 e 51 e índice alto para o método IS, Figura 52. Essa variação encontrada entre os dois primeiros métodos deve-se ao parâmetro de uso e ocupação do solo, incluso no método IS, no qual atribuiu altos índices (c) e pesos (p).

O método IS apresentou a maior concentração de terras com vulnerabilidade de aquíferos alta, contrapondo-se às duas outras metodologias que compõem este trabalho. Deve-se evitar, de acordo com o IS, utilizar as áreas em vermelho. Podendo-se utilizar mediante um estudo mais detalhado na área de interesse. Esse índice de vulnerabilidade alta, deve-se à presença de aterro sanitário e lixão, além de áreas residenciais, indústrias, cemitérios e postos de gasolina que apresentam risco elevado de contaminação do aquífero em caso de despejo de produtos ou descartes (resíduos).

Os postos de combustíveis apresentam-se como uma fonte potencial de contaminação quando da eminência de vazamentos acidentais ou propositais de combustíveis e de seus respectivos tanques de armazenamento subterrâneo.

O lixão na área de estudo, em processo de decomposição gera chorume, que lixiviado para rios ou percolados para água subterrânea afeta substancialmente a qualidade das águas subterrâneas. Apesar de desativado, o lixão continua seu processo de decomposição.

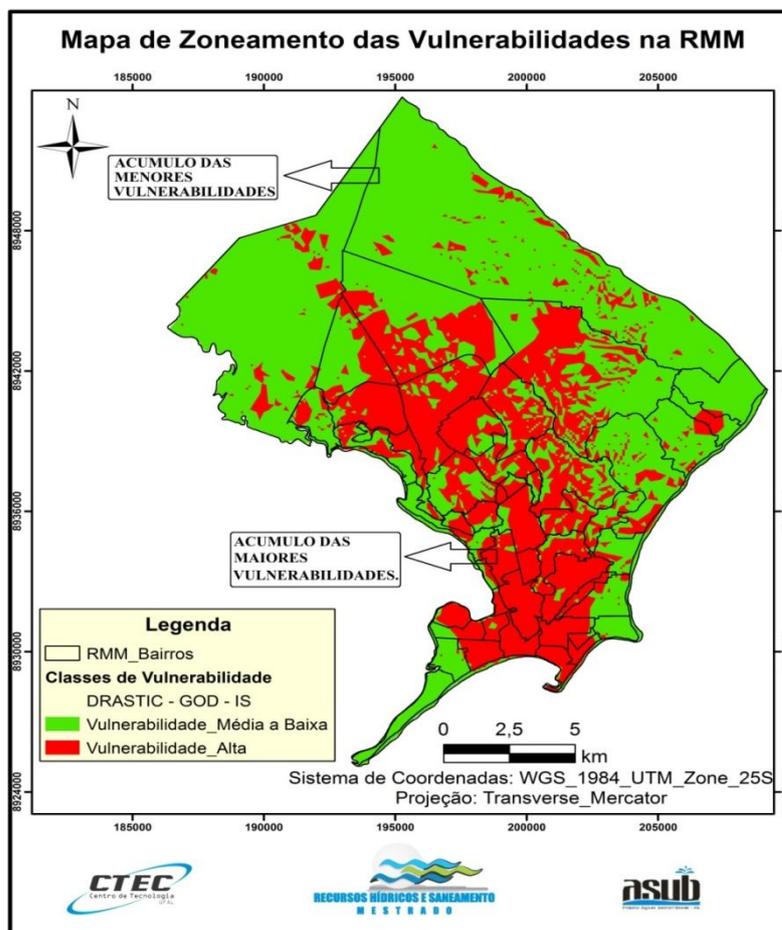
Para Pavão (2004) todo cemitério é um risco potencial para o meio ambiente, mas só é um risco efetivo quando não estão implantados adequadamente, é preciso avaliar as condições básicas geológicas (tipo de solo) e hidrogeológica (profundidade no nível do aquífero freático). Na área de estudo foram catalogados 9 cemitérios, dos quais 4 encontram-se nos sedimentos de praia e aluvião, grau de confinamento do aquífero livre e níveis estáticos em geral abaixo dos 10m de profundidade.

A determinação desses índices de vulnerabilidade independe da carga poluidora, já que, a análise do tipo de poluente, sua intensidade e persistência no ambiente caracterizam o risco de contaminação de uma área à contaminação.

Partindo da análise dos métodos propostos neste trabalho, DRASTIC, GOD e IS, que possuem parâmetros e pesos diferenciados, percebe-se a atuação de índices distintos, refletindo na determinação da vulnerabilidade para a área de estudo. Portanto, a partir de análises de metodologias diferentes para o mesmo fenômeno (vulnerabilidade de aquíferos), pode-se obter respostas diversas. Com isso, torna-se difícil distinguir o melhor método a ser aplicado, variando de acordo com os dados, a disposição para análise e o conceito de vulnerabilidade adotado.

Partindo desse pressuposto, todas as vulnerabilidades adquiridas através dos métodos DRASTIC, GOD e IS foram somadas, considerando os maiores índices num único mapa com o objetivo de identificar as áreas mais sujeitas a antropização e exploração das águas subterrâneas. Com isso, foi elaborada na Figura 53, uma junção das vulnerabilidades mais elevadas oriundas dos três métodos aplicados neste trabalho.

Figura 53 – Zoneamento das vulnerabilidades segundo os métodos DRASTIC, GOD e IS.



Fonte: Autor, 2013.

As áreas em vermelho correspondem aos ambientes mais vulneráveis encontrados nos três métodos aplicados, enquanto que as áreas em verde estão propícias à utilização, desde que hajam verificações quanto a declividades de encostas superiores a 45° de inclinação e ocupação de topos de morro de acordo com o Código Florestal Brasileiro (Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012).

A utilização de áreas propícias à ocupação urbana e industrial, ou seja, com vulnerabilidade baixa, deve levar em consideração as zonas especiais de preservação e as unidades especiais de preservação descritos no Plano Diretor de Maceió (2005). O artigo 28 do referido Plano Diretor trata da elaboração de mapas de vulnerabilidade de aquíferos como uma diretriz para gestão do território.

O uso e ocupação das áreas de média a baixa vulnerabilidade deverão levar em consideração as áreas de restingas e mangues, além da reserva florestal do IBAMA, do Parque Municipal de Maceió, da ponta de restinga do Pontal da Barra e da Área de Proteção Ambiental do Catolé e Fernão Velho.

5.6 Mapeamento dos dados pretéritos de qualidade de água

De modo natural o nitrato apresenta teores relativamente baixos nas águas subterrâneas, uma vez que mecanismos bioquímicos o consomem para gerar proteínas para nutrir as plantas. No processo de percolação o nitrato pode ser consumido no processo de desnitrificação, que é sua conversão, abaixo da camada anaeróbia do solo, em nitrogênio gasoso ficando indisponível na atmosfera.

Apesar da Portaria 2914 do Ministério da Saúde indicar valores máximos de nitrato de 10 mg/L em águas próprias para consumo humano, Barbosa (2005), afirma que teores acima de 3 mg/L podem ser indicativos de contaminação da água subterrânea por atividade humana por meio de esgotos, fossas sépticas, depósitos de lixo, cemitérios, adubos nitrogenados e resíduos de animais, etc. Dados pontuais de nitrato catalogados em estudos pretéritos na área de estudo atingiram 124,7 mg/L de N em novembro de 2010 (SILVA, 2012), indicando estágio avançado de contaminação das águas subterrâneas. Tal situação torna-se agravante pelo fato do ponto de avaliação está inserida numa área de vulnerabilidade que varia de Média a Alta de acordo com a metodologia IS aplicada. Este método verifica além da vulnerabilidade o risco de contaminação.

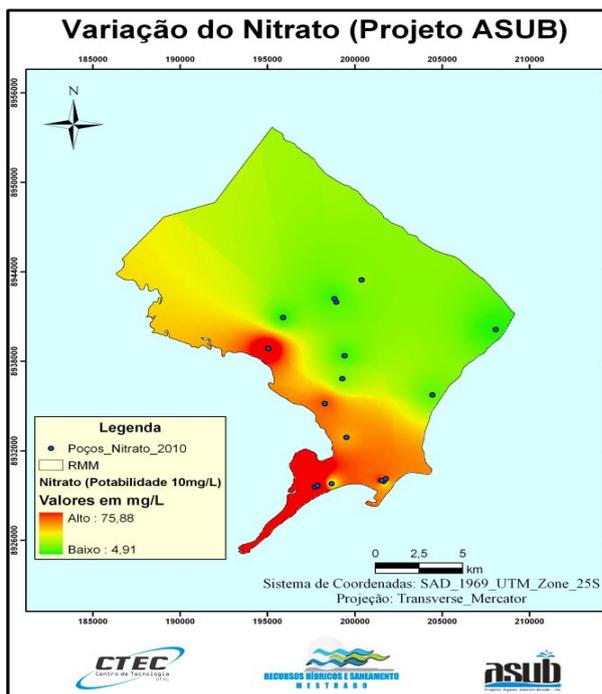
Foram catalogados dados de qualidade de água, em 17 locais distintos, referente ao parâmetro Nitrato no ano de 2010 pelo Projeto ASUB. Sendo estes publicados na dissertação de Silva (2012) e nos artigos de Silva (2009; 2010), além de Fazzio (2009; 2010^a; 2010^b).

As análises de Nitrato (mg N-NO₃⁻/L) foram realizadas através do método de Mackereth et al. (1978). Foram realizadas amostras em 10 meses subsequentes (Fevereiro a Novembro de 2010), sendo suas médias interpoladas para identificação na área de estudo.

O ponto 2 de coleta localizado no Lava-jato “Lava Já”, coordenadas 201527 E 8930005 S, tiveram apenas 6 meses analisados, entretanto, optou-se por incluir seus dados devido o alto nível de nitrato encontrado chegando a 485,2 mg/L e tendo como média geral 50,2 mg/L de N. Entretanto, o maior valor de nitrato encontrado foi em outro lava jato localizado no bairro do Trapiche da Barra (198661E, 8929798 S) com concentração de 671,9 mg/L de N, mas sua média foi bem inferior, 16,4 mg/L de N.

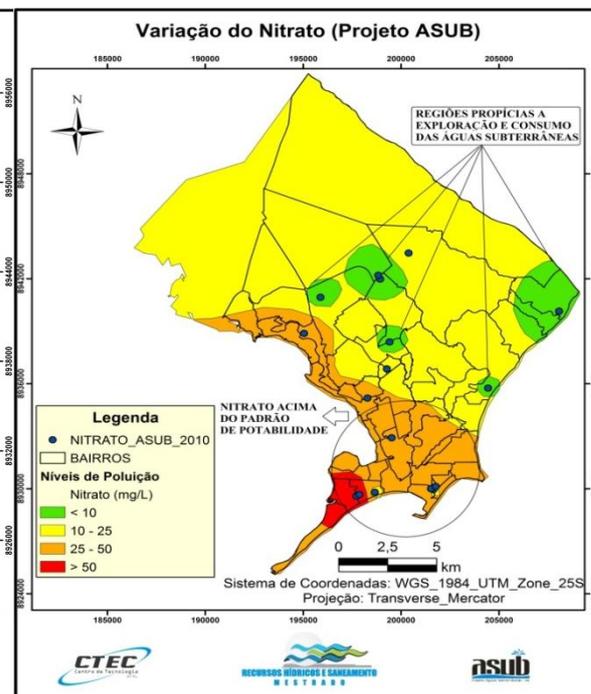
A localização dos principais contaminantes presentes na área de estudo visam validar a vulnerabilidade da área de estudo após a aplicação das metodologias DRASTIC, GOS e IS. As Figuras 54 e 55 apresentam de forma sucinta a localização das análises pretéritas do poluente Nitrato, oriundos principalmente de esgoto sanitário, fossas sépticas e fertilizantes agrícolas nitrogenados.

Figura 54 – Variabilidade de Nitrato.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 55 – Classes de Nitrato para potabilidade.



Fonte: Autor, 2013.

A região com as maiores concentrações de nitrato foram catalogadas em regiões cemiteriais e densamente povoadas, ratificando o que foi descrito anteriormente que, áreas com teores elevados de nitrato resultou da ação humana e de necrochorume, decomposição de efluentes humanos, que auxilia nesse processo.

Apenas 6 pontos de coleta tiveram médias padrão de potabilidade obedecido, ou seja, inferior a 10 mg/L de nitrato. Vale ressaltar que são valores médios, portanto foram observados valores acima do permitido para consumo humano, exceto o ponto de coleta 1, localizado no cemitério Nossa Senhora Mãe do Povo no bairro de Jaraguá, cuja média foi de 2,6 mg/L de N e valor máximo encontrado de 6,1 mg/L de N.

O levantamento dos dados foi realizado tanto na área de formação geológica dos Sedimentos de Praia e Aluvião, como da formação Barreiras, entretanto as camadas de argila presente na segunda formação pode inibir o maior alcance do contaminante, o que não ocorre na primeira formação, que pode deixar o poluente atingir facilmente o lençol freático.

A lixiviação do nitrogênio amoniacal para o lençol freático representa um grave problema de contaminação, conforme afirma Foster & Hirata (1988). Entretanto, o processo de desnitrificação auxilia na diluição do contaminante juntamente com o fluxo subterrâneo regional, como explica Hirata (2000). Dessa forma, o processo de recarga do aquífero deve

permanecer o mais natural possível, uma vez que a impermeabilização reduz a entrada da água no solo, reduzindo o nível do lençol freático e a amplia os níveis dos poluentes.

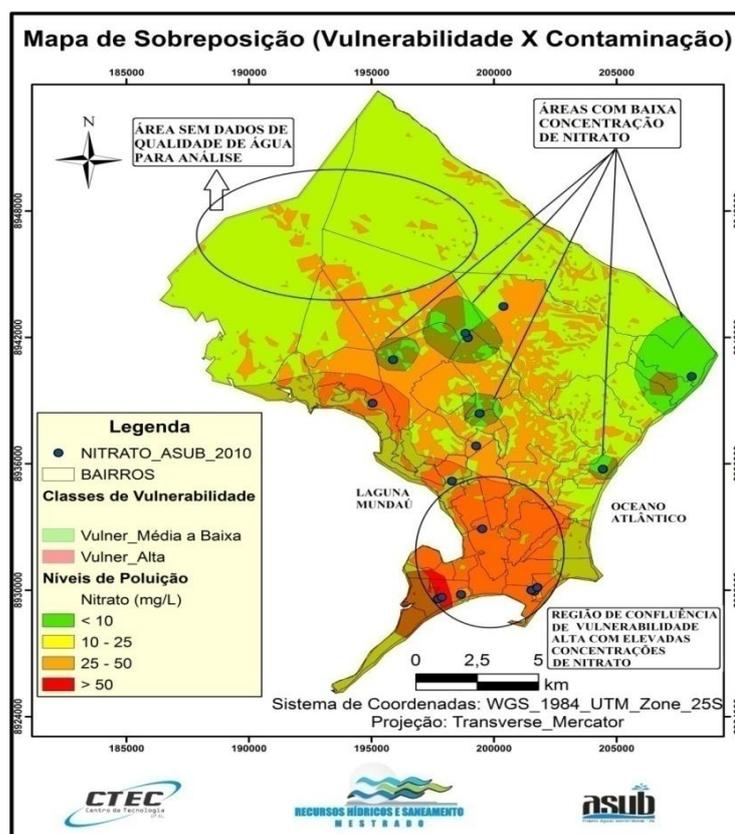
As manchas esverdeadas na Figura 55 correspondem às concentrações médias de nitrato que atingiram valores permissíveis a utilização humana, ou seja, abaixo de 10 mg/L de N. Essas constatações são de fundamental importância para o prolongamento da utilização das águas subterrâneas.

Excetuando-se as regiões esverdeadas, todas as demais áreas apresentaram índices superiores a 10 mg/L de N, sendo imprópria para o consumo humano, conforme a Portaria 2914 do Ministério da Saúde. Entretanto, ocorreu uma centralização dos dados de nitrato na parte central, sul e leste da área de estudo.

As áreas norte e oeste da área de estudo não apresentaram amostras de qualidade de água para o parâmetro nitrato. Dessa forma, impossibilitando uma análise mais criteriosa das condições da água para o consumo humano.

Com a interpolação e análise dos dados de nitrato para o ano de 2010 do Projeto ASUB e da geração do mapa de áreas propícias à ocupação humana, foi possível sobrepor estas informações e verificar os locais com maior incidência de vulnerabilidade e de contaminação, conforme pode ser observado na Figura 56.

Figura 56 – Mapa de sobreposição de contaminação por nitrato e vulnerabilidade.



Fonte: Autor, 2013.

Em 11 locais distintos de análise, as médias de concentração de nitrato apresentaram valores acima do padrão de potabilidade permissível para consumo humano que é de 10 mg/L. Vale salientar que a maior parte da área de estudo apresenta urbanização intensa ou agriculturas permanentes que agem diretamente na qualidade da água. As diversas camadas de argilas presente na região dos tabuleiros costeiros e a distância elevada até atingir o lençol freático funcionam como agentes protetores do lençol freático, já que dissipa ou reduz a concentração de nitrato no subsolo.

A região sul do mapa, principalmente os bairros do Prado e Ponta Grossa, apresentaram as maiores concentrações de Nitrato, acima de 50 mg/L, e vulnerabilidade Alta. Entretanto, no sentido sul, do bairro da Jatiúca até o Pontal da Barra, e os demais bairros que margeiam a laguna Mundaú até o bairro de Rio Novo, todos apresentam valores altos de nitrato, acima de 25 mg/L. Contudo, os bairros de Jatiúca, Ponta Verde, Bebedouro, Fernão Velho e Rio Novo apresentaram grandes áreas com vulnerabilidade Média a Baixa nos três métodos analisados.

Na parte baixa da cidade, apenas os bairros de Jacarecica e Riacho Doce apresentaram média de Nitrato abaixo do permissível, com 9,15 mg/L e 5,57 mg/L respectivamente. Esses valores influenciaram diretamente para a confecção da mancha em azul, que determina a possibilidade de utilização das águas subterrâneas nas áreas de entorno. Esse fato torna-se ainda mais evidente e agravante quando observamos a ausência de outros postos de coleta e análise de água para comparar os dados e validar as respostas encontradas.

Foram observadas faixas de variação de nitrato abaixo do permissível (10 mg/L de N), cor azul, nos entroncamentos dos bairros de Jacarecica e São Jorge, Serraria, Jardim Petrópolis e Antares, Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce e Antares, Benedito Bentes, Cidade Universitária e Tabuleiro dos Martins. Estes dois últimos bairros apresentam postos de coleta de água, sendo detectadas duas manchas com valores permissíveis para consumo humano.

A região mais urbanizada de Maceió apresentou as maiores concentrações de nitrato, e as maiores vulnerabilidades.

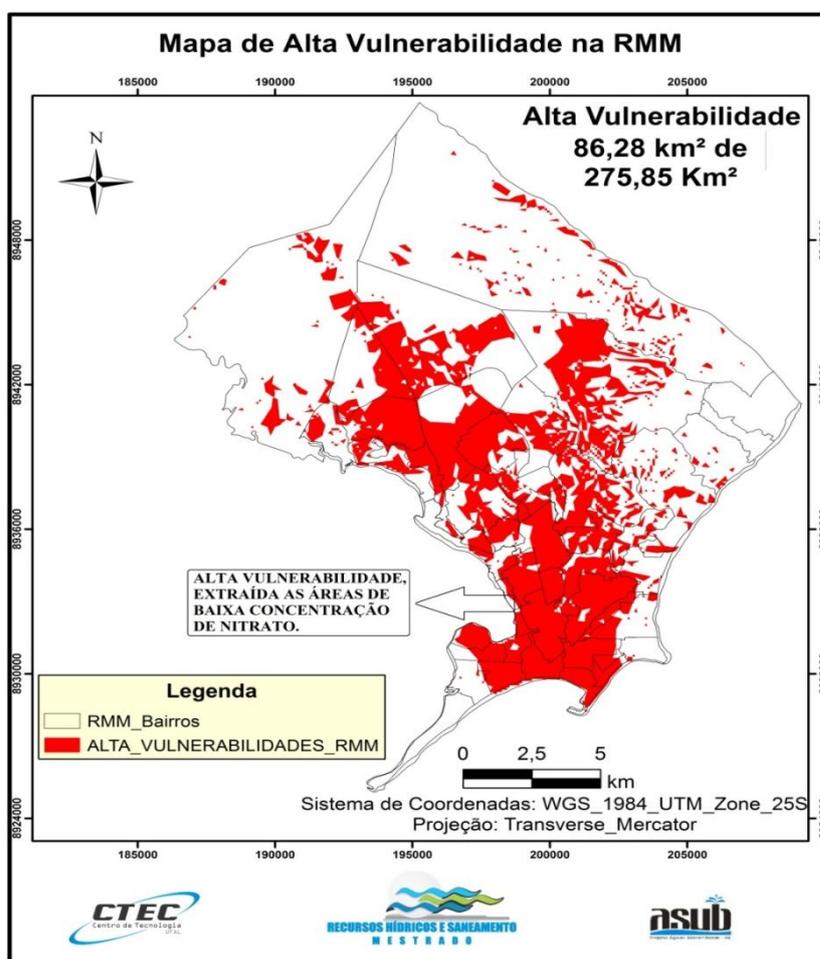
Como observado anteriormente, a ausência de dados na região norte e noroeste do mapa (área predominantemente ocupada por remanescente de mata atlântica e agricultura da cana de açúcar) dificulta o processo de interpolação e confiabilidade da informação extraída. Dessa forma, há a necessidade de integrar uma maior rede de dados, que detalhe melhor as características intrínsecas do aquífero e a qualidade da água presente nos aquíferos, para uma

melhor interpretação dos processos hidrogeológicos existentes, que auxiliará num melhor zoneamento de utilização da área estudada.

A ressalva existe quando da observação da ausência de dados em cerca de 50% da área de estudo (área norte e oeste do mapa), entretanto isso não descredencia as respostas encontradas nas áreas com presença de dados.

De posse dos mapas de Vulnerabilidade, que apresentou os maiores índices nos três métodos aplicados, DRASTIC, GOD e IS e de níveis de Contaminação por Nitrato, foi elaborado o mapa que representa as áreas menos propícias a utilização humana, Figura 57.

Figura 57 – Áreas de Alta Vulnerabilidade, menos propícias a utilização humana.



Fonte: Autor, 2013

O mapa de altas vulnerabilidades é a subtração dos mapas de zoneamento das maiores vulnerabilidades, Figura 53, menos o mapa de variação do nitrato, Figura 55. Dessa forma, foi excluído todas as áreas com vulnerabilidades abaixo da classe média, encontradas nos três métodos aplicados, além das áreas que apresentaram até 10 mg/l de nitrato.

Assim as áreas em vermelho são mais vulneráveis a contaminação dos aquíferos sendo alertadas sobre sua ocupação. Já as áreas brancas estão liberadas para seu uso e ocupação.

5.7 Considerações Finais

A subdivisão do trabalho em etapas (revisão de literatura, trabalhos de campo e de gabinete e integração dos dados) foi de suma importância para o desenvolvimento das atividades, permitindo a culminância das atividades propostas, ou seja, geração de mapas temáticos de vulnerabilidade de aquíferos na região Metropolitana de Maceió.

A aplicação de técnicas para determinação da vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos e criação de mapas temáticos que auxiliem no processo de uso e ocupação do solo da área de estudo apresenta-se defasada devido à carência de dados e os mesmos ainda não se encontram acessíveis *in loco* ou na *internet*, ou seja, grande parte dos estudos específicos são realizados por empresas públicas não sendo disponibilizados em órgãos ambientais e *sites* oficiais dos órgãos gestores do meio ambiente como ocorre em alguns países da Europa e América do Norte.

O difícil acesso a dados, sejam estes tabelados ou digitais, dificulta a avaliação e determinação da vulnerabilidade natural dos aquíferos na área de estudo que está localizada na Região Metropolitana de Maceió. Além disso, torna a operação de integração e sobreposição de mapas temáticos mais demorada e complexa.

Fundamentado no objetivo principal da pesquisa, pode-se constatar que foi possível elaborar mapas temáticos de vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos na região Metropolitana de Maceió. Associado ao mapa de vulnerabilidade pode-se verificar o risco implícito, já que as atividades humanas foram mapeadas e classificadas, gerando Pesos e Índices que subsidiaram a detecção de áreas mais propícias a utilização humana.

Os métodos DRASTIC, GOD e IS foram utilizados para determinação da vulnerabilidade dos aquíferos na Região Metropolitana de Maceió. A validação dos mapas de vulnerabilidade deu-se através da confecção do mapa de contaminação das águas subterrâneas por nitrato, que é um indicador de poluição difusa, já que pode ser oriundo na região de estudo, de esgoto doméstico sem tratamento, despejo industriais, excrementos de animais e fertilizantes agrícolas.

Os três métodos aplicados apresentaram respostas diferentes, decorrentes das propostas metodológicas e conseqüentemente dos diferentes índices e pesos atribuídos. Cada método possui um foco de análise distinto, daí tais divergências. Enquanto o método DASTIC prima mais pelos parâmetros Nível Estático e Impacto da Zona não Saturada o método IS vislumbra no parâmetro Uso e Ocupação do Solo (risco de contaminação) seu ponto forte de

análise. O método GOD por sua vez não utiliza pesos, com isso, os três parâmetros apresentam igual grau de importância no processo de análise.

Além do foco da análise e interpretação dos parâmetros que compõem os métodos de vulnerabilidade aplicada ser diferentes, a ausência ou escassez de dados na parte norte e nordeste além de oeste e noroeste da área de estudo, áreas estas que apresentam grandes concentrações de agricultura e floresta remanescente, influenciaram negativamente nas respostas obtidas, já que, podem não ter representado fidedignamente o que está acontecendo *in loco*. Estas áreas apresentaram apenas classes de vulnerabilidade Reduzida e Baixa, ao serem analisadas pelos métodos DRASTIC e GOD, sendo um indicador de superestimação da ausência dos dados.

6 CONCLUSÃO

A aplicação de três métodos distintos DRASTIC, GOD e IS tem um caráter inovador, visto que, os dois primeiros métodos tratam apenas das características intrínsecas ao aquífero, enquanto o IS atribui índices e pesos nas atividades antrópicas, caracterizando além do conceito de vulnerabilidade o de risco e contaminação dos recursos hídricos.

O método DRASTIC obteve apenas duas classes de vulnerabilidade, a Reduzida e a Média. A primeira ocupa 96,3 % da área de estudo enquanto que a segunda ocupa 3,7 %. Apesar da reduzida área, a vulnerabilidade Média corresponde a áreas urbanizadas do litoral e da região lagunar dos bairros de Guaxuma, Jacarecica, Ponta Verde, Pajuçara, Jaraguá, Poço, Centro, Mangabeiras, Jacintinho, Farol, Levada, Mutange, Bebedouro, Fernão Velho, além da parte alta da cidade como Chã de Bebedouro, Chã da Jaqueira, Petrópolis, Clima Bom e Serraria.

O método GOD apresentou cerca de 91 % de sua área vulnerabilidade baixa, porém obteve um total de quatro classes de vulnerabilidade, ou seja, duas a mais que o método DRASTIC. A classe Desprezível esteve presente em cerca de 1,55 % da área de estudo, sendo localizada nos bairros do Jacintinho, Ponta Grossa, Vergel do Lago, o entroncamento entre os bairros do Bom Parto, Farol, Pinheiro e Mutange, além de pontos localizados nos bairros do São Jorge, Tabuleiro dos Martins e Cidade Universitária.

A vulnerabilidade Moderada no método GOD ocupou, aproximadamente, 6,81 % da área de estudo, tendo sua maior porção entre os bairros de Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce, além de Poço e Jaraguá, Jacarecica e Cruz das Almas, Serraria e Ouro Preto, Chã de Jaqueira, Chã de Bebedouro e Bebedouro e Clima Bom, Santos Dumont e pequenas áreas no Barro Duro e Cidade Universitária. A vulnerabilidade Alta, por sua vez, ocupou o centro dos bairros de Guaxuma, Garça Torta e Riacho Doce ocupando uma área de 1,08 km² ou 0,30 % da área total.

Quanto ao método IS, este praticamente utiliza os mesmos dados dos demais métodos, acrescidos de informações sobre o uso e ocupação do solo. Este, porém, indicou que, em grande parte da área de estudo a vulnerabilidade é Alta. Isto é, proveniente da atribuição de maior Peso às áreas observadas com maior foco de contaminação em potencial, seja pontual e/ou difusa, oriundas das atividades antrópicas.

O método IS permitiu a identificação de algumas fontes potenciais de poluição pontual e difusa (Lixão e Aterro Sanitário, Postos de Combustíveis, Cemitérios, Indústrias, Porto, Aeroporto, urbanização e etc.), atribuindo índices que identificassem seus possíveis impactos

às águas subterrâneas. Esses empreendimentos precisam ser monitorados sistematicamente para melhor compreender sua ação no meio aquífero.

O método IS apresentou apenas duas classes de vulnerabilidade, a Intermediária com 155,80 km² e a classe Alta com 115,04 km². Essas classes correspondem respectivamente a 57,52 % e 42,48 % da área de estudo. Enquanto a primeira classe encontra-se localizada na área de restinga dos bairros do Trapiche e do Pontal da Barra além da Jatiúca, Ponta Verde, Garça Torta e Riacho Doce, Bebedouro e todas as demais áreas com presença ínfima ou ausência de dados, a classe de vulnerabilidade Alta concentra-se na grande mancha urbana de Maceió, refletindo a importância adotada pelo parâmetro de Uso e Ocupação do Solo (LU).

As áreas que apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade nos três métodos aplicados têm como agravante comum a sua localização, ou seja, estão localizadas em áreas urbanizadas ou de especulação e expansão imobiliária. Dessa forma, recomenda-se a observação e/ou utilização destes resultados no planejamento de uso futuro destas áreas.

A área correspondente aos Sedimentos de Praia e Aluvião, onde predominam os sedimentos arenosos, cascalhos e siltes, requerem estudos mais detalhados e possíveis medidas compensatórias no caso de implantação ou adensamento de atividades potencialmente poluidoras, já que apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade à poluição nos três métodos aplicados.

O levantamento das fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas, juntamente com o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero, permitiu a confecção do mapa de risco à poluição do solo e da água. Essa resposta subsidia um melhor gerenciamento dos recursos hídricos na área estudada. O levantamento das análises físico-química das águas subterrâneas teve como objetivo, validar as respostas dos índices de vulnerabilidades DRASTIC, GOD e IS.

As amostras de água subterrânea apresentaram índices de potabilidade aceitável para o consumo humano, que é de até 10 mg/L de N, em 52,12 % das análises catalogadas. Já as amostras em que o nível de potabilidade para o parâmetro nitrato se excedeu foi de 79 ou 47,88 %. Estes dados preocupam, quanto à introdução deste poluente, que se dá através dos despejos *in natura* dos efluentes domésticos e águas residuárias que infiltram no solo percolando até o lençol freático, além de vazamentos da rede coletora de esgoto e de fertilizantes agrícolas. Enquanto que, as lentes de argila retardam a percolação das águas precipitadas, sendo responsáveis também por atenuar a ação dos contaminantes nas águas subterrâneas da área de estudo.

As áreas com restrição de uso das águas subterrâneas ficam localizadas na parte baixa da cidade predominantemente, dos bairros de Jatiúca até o Pontal da Barra, além dos bairros que margeiam a orla lagunar, até atingir o bairro de Rio Novo. Na parte alta da cidade os bairros do Jacintinho, Farol, Feitosa, Pinheiro, Pitanguinha, Gruta de Lourdes, Chã de Jaqueira e Petrópolis também merecem atenção já que apresentam elevadas concentrações de nitrato e vulnerabilidade variando de média a alta.

A utilização de técnicas de geoprocessamento para determinação da vulnerabilidade de aquíferos foi de fundamental importância, uma vez que, possibilitou a utilização de outras metodologias e a comparação de resultados. Além disso, contribuiu para uma melhor identificação de áreas que necessitam de um melhor gerenciamento quanto ao uso do solo e utilização das águas subterrâneas.

Com isso, estudar a vulnerabilidade natural dos aquíferos na Região Metropolitana de Maceió mostrou-se válido, uma vez que se trata de análises qualitativas de baixo custo operacional, de cunho preventivo e orientativo que subsidia as tomadas de decisões no planejamento de uso e ocupação do solo, além de conservação dos aquíferos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Reduzir a área de análise, devido à ínfima quantidade de poços perfurados na região noroeste da RMM.

- Realizar preenchimento de falhas nas séries anuais de precipitação com mais de um mês de ausência de dados, já que, foram excluídos do processo de análise atual. Dessa forma, ampliará a série de anos hidrológicos analisados em todos os postos dentro da RMM.

- Utilizar imagens de satélite com resolução espacial superior a SRTM, que é de 90 metros, com capacidade de geração de Modelos Digitais de Elevação e Topografia, sem perda significativa na qualidade geométrica. Além de gerar um mapa atualizado de uso e ocupação do solo da área de estudo.

- Aplicar fidedignamente os índices do método DRASTIC para os parâmetros: Material do Aquífero (A); e Influência na Zona não Saturada (I), para as lentes de argila e camadas de areia, na zona costeira e lagunar, buscando verificar possíveis alterações nos níveis de respostas obtidas.

- Catalogar novos dados de nitrato para validação dos mapas de vulnerabilidade.

- Buscar novas formas de validação dos mapas de vulnerabilidade.

- Incluir o parâmetro Intrusão Salina na determinação da vulnerabilidade.

- Quantificar as cargas poluidoras (Pluma de Contaminantes) que chegam aos aquíferos, através das fossas sépticas e sumidouros.

- Correlacionar a Pluma de Contaminantes com as áreas mais vulneráveis.

- Utilizar dados de amônia como parâmetro para quantificar o grau de contaminação da água por ações antrópicas.

- Adquirir mapas das áreas de conservação ou protegidas legalmente, inseridas na área de estudo, para verificação criteriosa no processo de análise.

REFERÊNCIAS

- ALAGOAS. Relatório Final do Estudo para Subsidiar a Cobrança pelo Uso da Água Subterrânea na Região Metropolitana de Maceió. Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais – SEMARHN / GAMA. Maceió, 2006.
- ALAGOAS. Secretaria Coordenadora de Infra-estrutura e Serviços; Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais; COHIDRO: Consultoria, estudos projetos. Relatório Síntese do Plano Diretor da Região Hidrográfica do Pratagy. Maceió, 2005.
- ALAGOAS. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Alagoas – PERH.Consórcio IBI/ENGESOFT. Relatório RT-02 - Consolidação da Base Técnica do PERH, v.1. Fortaleza, Ceará, 398 p. 2010.
- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J., HACKETT, G. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. **US Environmental Protection Agency**. Ada, Oklahoma. EPA/600/2-87-036.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Cadernos de Recursos Hídricos: Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil**. Brasília, 2005.
- _____. Atlas Brasil: **abastecimento urbano de água**: resultados por estado / Agência Nacional de Águas; Engecorps / Cobrape. – Brasília: ANA: Engecorps/Cobrape, 2010.
- _____. Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió. Vol IV - Avaliação da Recarga Natural, Reservas e Potencialidades dos Aquíferos; Exutórios Naturais, Balanço Hidrogeológico e Análise Econômica da Água Subterrânea; Plano de Gestão e Seleção de Pontos para Implantação de Sensores Telemétricos. Brasília: ANA, SIP, 2011a.
- _____. Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió. **Geologia, Hidrogeologia e Hidroquímica**. Vol II -Brasília: ANA, SIP, 2011b.
- ANTONAKOS, A.K.; LAMBRAKIS, N.J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, v.333, p. 288 – 304, 2007. Disponível em<<http://www.elsevier.com/locate/jhydrol>>. Acesso em: Mar.2012.
- ARTUSO, E.; OLIVEIRA, M.M.; LOBO FERREIRA, J.P.C. – Avaliação da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas no setor de Évora do Sistema Aquífero de Évora – Montemor – Cuba. In: **Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento**. Editora Universitária da UFPE, v.4, p. 277 – 331, 2004.
- ASUB –Projeto: Instrumentos de gestão para as águas subterrâneas na região hidrográfica do rio Pratagy Alagoas. Maceió, 2011.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n. 4, p. 85-103. 2004.

AUZANI, Gislaine Mocelin. **Uso da terra e caracterização hidropedológica na região de Vila Kramer, São Francisco de Assis – RS.** 2010. 129 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. Porto-Alegre: ABRH, 2005. 266 p.

BARBOSA, Cátia Fernandes. **Hidrogeoquímica e a contaminação por nitrato em água subterrânea no bairro Piranema, Seropédica-RJ.** 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado em Administração e Política de Recursos Minerais) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

BARROSO, C.M.R. **Caracterização do sistema aquífero Barreiras/Marituba na área de Maceió-AL.** 2001. 134 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

BÓS, Sidiane Manfron. Importância do estudo da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas. **Periódico Eletrônico.** Fórum Ambiental da Alta Paulista. ISSN 1980 – 0827. Volume III, 2007.

_____. **Mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas do município de Sananduva – RS.** 2008. 95f. Dissertação (Mestrado em Infra-estrutura e Meio Ambiente) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

BOSCATTO, Flavio.; PROCHNOW, Ronan Max.; e OLIVEIRA, Francisco Henrique de. A Utilização do Sistema de Informações Geográfica – SIG como apoio ao planejamento legal da malacocultura. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 23, Rio de Janeiro. **Anais...**, p. 1678-1686, 2007.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. **Revista Brasileira de Geofísica.** v.26(1), p. 61-68, 2008. ISSN 0102-261X. Disponível em: <<http://www.scielo.br/rbg>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 mai 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm> Acesso em: jun.2012.

_____. Estatuto da cidade: Lei n. 10.257, de 10 julho de 2001, e legislação correlata. – 2. ed. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2009. 69 p. – (Série legislação; n. 35) ISBN 978-85-736-5032-7. Disponível em: <<http://bd.camara.gov.br>>. Acesso em: jun.2012.

_____. Fundação Nacional de Saúde. Cemitérios como fonte potencial de contaminação das águas subterrâneas. Região de Cuiabá e Várzea Grande – MT – Brasília: Funasa, 2007. 118 p.: il. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/cemitFonte.pdf> . Acesso em: jun.2012.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 1469, de 29/12/2000. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo

humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 de janeiro de 2004.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25/03/2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 25 março de 2004.

_____. (2008). Resolução CONAMA nº 396 de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 64-68. 03 de abril de 2008. Publicação DOU nº 66, de 07/04/2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em Jun.2012.

_____. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2011. Disponível em: <http://bvsmis.saude.gov.br/bvsmis/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html> . Acesso em: Jun.2012.

CÂMARA, G. Anatomia de sistemas de informações geográficas: visão atual e perspectivas de evolução. In: ASSAD, E., SANO, E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 1993.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. A.; MEDEIROS, C. M. B. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. 10ed. Escola de Computação. Campinas. Instituto de Computação - UNICAMP. 1996. 197p.

CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A.M.V. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2001. 2 ed. rev. amp. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. Acesso em: Jun.2012.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY**. 2006. 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CAMPONOGARA, Isabel. SILVA, José Luiz Silvério Da.; FRANTZ, Luis Carlos, BESSOUAT, Claudia; GUIMARAENS, Martin; e GAMAZO, Pablo. Vulnerabilidade Natural do Sistema Aquífero Guarani, em Santana do Livramento, RS, Com Uso de Geotecnologias. **Anais...** Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, XV e Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, I. Gramado (RS), 2007.

CARDOSO, Leila Vanessa Rodrigues Queirós. **Estudo comparativo dos métodos DRASTIC e GOD na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição da bacia hidrográfica do rio Cabril - Vila Real**. 2010.110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.

CARVALHO, Moacyr, de; e DINIZ, Hélio Nóbile. Ponto de vista: Reflexões sobre a compactação de solos agrícolas; suas causas e seus efeitos. **Rev. IG**, São Paulo, 5(112):59-64, 1984.

COMPANHIA DESANEAMENTO DE ALAGOAS (CASAL). **Pedido de outorga do direito de uso das águas dos poços tubulares da CASAL situados na Bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins e na Bacia Hidrográfica do Riacho Catolé**: Município de Maceió – AL. Maceió, 2008a.

_____. **Pedido de outorga do direito de uso das águas dos poços tubulares da CASAL situados nas Bacias Hidrográficas do Riacho Jacarecica, Riacho Doce, Riacho Garça Torta, Rio Meirim e Riacho Águas de Ferro**: Município de Maceió – AL. Maceió, 2008b.

_____. **Pedido de outorga do direito de uso da água dos poços tubulares da CASAL situados na Bacia Hidrográfica do Riacho Reginaldo**: Município de Maceió – AL. Maceió, 2008c.

_____. **Pedido de outorga do direito de uso das águas dos poços tubulares da CASAL situados na Bacia Hidrográfica do Riacho do Silva**: Município de Maceió –AL. Maceió, 2008d.

_____. **Pedido de outorga do direito do uso das águas dos poços tubulares da CASAL situados nas bacias hidrográficas do Canal do Bolão, Canal da Levada, Rio Mundaú e outras bacias**: Município de Maceió – AL. Maceió, 2009.

_____. **Esgoto Sanitário – Capital**. Disponível em <<http://www.casal.al.gov.br/atuacao/esgotamento-capital/>>. Acesso em: Out.2012.

CAVALCANTE, A.T. – 1982. Potencialidade das águas subterrâneas na área de Maceió – Alagoas. **Anais...** 2º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Salvador, 1982.

_____. Projeto de Gerenciamento Integrado das Águas Subterrâneas do Estado de Alagoas – Relatório Final. Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais – SEMARHN. Governo de Alagoas, 2002A.

_____. Projeto de Gerenciamento Integrado das Águas Subterrâneas do Estado de Alagoas – Relatório Diagnóstico. Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais – SEMARHN. Governo de Alagoas, 2002B.

_____. Projeto de Gerenciamento Integrado das Águas Subterrâneas do Estado de Alagoas – Avaliação da Salinização dos Sistemas Aquíferos Costeiros da Região de Maceió. Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais – SEMARHN. Governo de Alagoas, 2004.

_____. Projeto de Gerenciamento Integrado das Águas Subterrâneas do Estado de Alagoas – Monitoramento quantitativo e qualitativo Região Metropolitana de Maceió, 2005.

CHAVES, Luciene Mota de Leão; SCHULER, Azeneth Eufrausino e CHAVES, César Lisboa. Avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero em Bacia de pequeno porte do rio uraim, Paragominas-Pa. **Anais**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, 2007.

CIVITA M. **La carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e pratica.** Pitagora Éditeurs, Bologna, Italie, (1994). 325 p.

COLERIDGE, Samuel Taylor. O ciclo hidrológico e a água subterrânea. In: PRESS, Frank; SIEVER, Raymond; GROTZINGER, John; e THOMAS, Jordan H. **Para Entender a Terra.** 4. ed. Editora Bookman. 2006. ISBN: 8536306114.

CONEJO, João Gilberto Lotufo; COSTA, Marcelo Pires da.; e ZOBY, J. L. G. Panorama do Enquadramento dos Corpos d'água do Brasil, e, Panorama da Qualidade das águas subterrâneas no Brasil. **Caderno de Recursos Hídricos**, 5.124 p. Brasília: ANA, 2007.

CORIDOLA, Romeu.; VIEIRA, Eliane Maria.; ALVES, Maria da Glória.; e ALMEIDA, Frederico Terra de. Uso das Técnicas de Geoprocessamento na Elaboração de Mapa Preliminar de Vulnerabilidade dos Aquíferos do Município de Campos de Goytacazes – RJ. **Anais...** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., Goiânia, Brasil, INPE, p. 2933 – 2940, 2005.

COSTA, W. D. Contaminação e programas de monitoramento de águas subterrâneas. Impactos Ambientais e Águas Subterrâneas no Brasil – Rio de Janeiro, 1997.

COSTA, Jovesí de Almeida; RAMOS, Vanda Ávila. Espaço urbano de Maceió: ambiente físico e organização sócio-econômica. In: ARAUJO, Lindemberg Medeiros (Org). **Geografia: Espaço, Tempo e Planejamento.** Edufal. Maceió, 2004.

CPRH (Companhia Pernambucana de Meio Ambiente). **Diagnóstico Socioambiental do Litoral Norte de Pernambuco.** Recife, 2003. 214p.

CUNHA, Luciano Soares da. **Determinação da vulnerabilidade intrínseca à poluição e transporte de contaminante: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na área do Porto de Pecém, CE.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília / Instituto de geociências. Brasília, 2009.

CNIG – Carta CORINE Land Cover (1985 -1987) [online].1ª Ed. [Lisboa, Portugal]: Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG), 1988. Disponível em<<http://www.cnig.pt>>. Acesso em: dez.2011.

DEMATTE, J.L.I.; MAZZA, J.A.; DEMATTÊ, J.A.M. Caracterização e gênese de uma topossequência latossolo amarelo-podzol originado de material da Formação Barreiras - Estado de Alagoas. **Scientia Agricola.** v. 53 n. 1 Piracicaba, 1996. ISSN 0103-9016.

DESCOVI FILHO, Leonidas Luiz Volcato. **Subsídios para gestão das águas subterrâneas na bacia hidrográfica do rio Santa Maria/RS.** 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DUIJVENBOODEN, W. van and WAEGENINGH, H. G. van. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution. In: **Proceedings and Information** No. 38 of the International Conference Held in the Netherlands, 1987. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands, 1987.

DRUCK, Suzana. A Geoestatística e os Sistemas de Informações Geográficas. **Espaço & Geografia**, Vol. 5, n1. Brasília, DF: EMBRAPA, 2002. p.1-15. ISSN: 1516-9375. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/espacoegeografia/index.php/>>. Acesso em: jun.2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Diagnóstico Ambiental do Município de Maceió – Anexo I-f – Levantamento Semi-detalhado de Solos. *No prelo*. 2005.

_____. Zoneamento Agroecológico de Alagoas. Mapa de Reconhecimento de Solos na escala de 1:100000. Dados Preliminares, 2008.

ENCICLOPÉDIA MUNICÍPIOS DE ALAGOAS. Org. TENÓRIO, Douglas Apratto; LIMA, Rochana Campos de Andrade; PÉRICLES, Cícero. Maceió: Instituto Arnon de Melo, 2006. ISBN 85-99408-02-x.

ESCADA, Denise Cristina dos Santos. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação das Águas Subterrâneas do Município de Cajamar – SP**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2009.

FABIANOVICZ, Rosimeri; & SILVA JUNIOR, Gerson Cardoso. Legislação e políticas de proteção de águas subterrâneas nos cenários nacional e internacional: tendências e resultados práticos. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 26, n. 1, p. 7-16, 2007.

FAZZIO, Araceli Laranjeira; SILVA, Florilda Vieira; XAVIER, Helen Vieira da Silva; FERREIRA, Ivete Vasconcelos Lopes; e FREIRE, Cleuda Custódio. Avaliação da contaminação das águas subterrâneas na cidade de Maceió. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18. **Anais...** Campo Grande, 2009.

FAZZIO, Araceli Laranjeira; SILVA, Florilda Vieira; FREIRE, Cleuda Custódio; e FERREIRA, Ivete Vasconcelos Lopes (A). Qualidade bacteriológica das águas subterrâneas da cidade de Maceió – resultados preliminares. Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES, 10 – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió, 2010.

FAZZIO, Araceli Laranjeira; SILVA, Florilda Vieira; FERREIRA, Ivete Vasconcelos Lopes; FREIRE, Cleuda Custódio; Maryelli Ludmylla Rodrigues da Silva; e Carlos Danillo Cavalcante Sampaio (B). Potenciais fontes de contaminação e qualidade das águas subterrâneas na cidade de Maceió. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16, e Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 17. São Luiz, 2010.

FERREIRA NETO, J.V.; SANTOS, R.J.Q.; WANDERLEY, P.R.B.; WANDERLEY, P.R.M.; CAVALCANTE, A.T. Vulnerabilidade natural das águas subterrâneas em área do Tabuleiro do Martins – Maceió – Alagoas – BR. In: Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 1., e Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11. **Anais...** Fortaleza: ABAS/AHLSUD/IAH, 2000. CD-ROM.

FERREIRA NETO, J.V.; SANTOS, R.J.Q.; CAVALCANTE, A.T. & WANDERLEY, P.R de M. Gerenciamento dos recursos hídricos da Bacia Evaporimétrica do Tabuleiro do Martins-Maceió-AL. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 6. **Anais...** Maceió – AL, 2002.

FERREIRA NETO, J.V.; SANTOS, R.J.Q dos.; LIMA, Rochana Campos de Andrade. Os recursos hídricos da área do Tabuleiro dos Martins – Maceió/AL. In: ARAUJO, Lindemberg Medeiros (Org). **Geografia: Espaço, Tempo e Planejamento**. Edufal. Maceió, 2004.

FLORENCIO, C.P.; LIMA FILHO, F. P.; RIBEIRO FILHO, E. Análise estratigráfica da sub-bacia evaporítica de Maceió. **Revista de Geologia**, 2002, v. 15, p. 09-16.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. Groundwater Pollution Risk Assessment – A Methodology Using Available Data. **Pan American Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS)**, Lima, Peru, 81 p. 1988.

FOSTER, S.; Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes/ Stephen Foster, Ricardo Hirata; tradução de Ricardo Hirata, Sueli Yoshinaga, SeijuHassuda, Mara Iritani. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FOSTER, S., MORRIS, B., CHILTON, J. 1999. Groundwater in urban development – a review of linkages and concerns. In: Ellis J.B. (ed.) Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. **Hydrological Sciences Journal**. v.259, p. 3-12. Disponível em: <http://iahs.info/redbooks/a259/iahs_259_0003.pdf>. Acesso em: ago.2012.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; e PARIS, M. Protección de la calidad del agua subterránea: **Guia para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. GW-MATE. Banco Mundial. Mundi prensa, España, 2003.

FOSTER SSD. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. **TNO Committee on Hydrological Research Information**, 38, 1987.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. **World Bank, GWMATE**. Washington, 101 p., 2002.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J.; RIBEIRO, L. – Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index. **Lisboa, Geosystem Center IST, Third International Conference on Future Groundwater Resources at Risk**, June, 2001.

GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. **Environmental Geology**. 39 (6): p.549-559, 2000. Disponível em: <<http://orbi.ulg.ac.be/bitstream/>>. Acesso em: jun.2012.

HAMZA, M. H.; MAÂLEJ, A.; AJMI, M.; e ADDED, A. Validity of the vulnerability methods DRASTIC and IS applied by GIS technique to the study of diffuse agricultural pollution in two phreatic aquifers of a semi-arid region (Northeast of Tunisia). **AQUAmundi**, 2010. Am01009: 057 – 064. DOI 10.4409/Am-006-10-0009.

HEATH, R. C. H. (1983) Hidrologia Básica de Água Subterrânea. **United States Geological Survey Water Supply Paper 2220**. Tradução Mário Wrege e Paul Potter. IPH/UFRGS. P84. In: CAMPONOGARA, Isabel et al. Avaliação da vulnerabilidade natural do sistema

aquífero guarani em quaraí-artigas usando sig. Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 15, e Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, 1. São Paulo, 2007.

HIDROWEB – Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas**. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: set.2012.

HIRATA, Ricardo. **Recursos Hídricos**. In: TEIXEIRA, W. ; TOLEDO, M. C. M. ; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

_____. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos. Seminário-Traller, 1. Protección de Acuíferos Frente a La Contaminacion: Metodologia. Toluca, México, jun. 2001.

HIRATA, R., FERRARI, L.C.K.M., FERREIRA, L. PEDE, M. 2002. La explotación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê: crónica de una crisis anunciada. **Boletim Geológico Mínero**. Madrid, Espanha, 2002. v. 113(3) p.273-282.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. Sinopse do Censo Demográfico de 2010, Alagoas. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=27&dados=P16>>. Acesso em: out.2012.

JAKOB, Alberto Augusto Eichman; YOUNG, Andrea Ferraz. Uso de Métodos de Interpolação Espacial de Dados nas Análises Sócio demográficas. Encontro Nacional de Estudos Populacionais, 15. **Anais...** Caxambú: ABEP, 2006.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. 2. ed. Rio Claro, SP, Uduesp, 2003. 253 p.

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. Krigagem Indicativa Aplicada à Elaboração de Mapas Probabilísticos de Riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. **Geomatemática**, Texto Didático 06., p. 19, 2002. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acesso em: 10 fev.2012.

LEITÃO, T. E. ; FERREIRA, J. P. L. OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J. (2003). Poluição de águas subterráneas: Principais Problemas, processo de prevenção e de reabilitação. Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 6., p. 1 – 18, **Anais Eletrônicos...** Cabo Verde, 2003. Disponível em: <<http://www.dha.inec.pt/nas>>. Acesso em: jan.2013.

LIMA, Carlos Eduardo Pacheco. **Produção de mapas de vulnerabilidade de solos e aquíferos à contaminação por metais pesados para o estado de Minas Gerais**. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

LIMA, Maria Lucilene Alves de. **Águas subterráneas potencialmente impactadas por Nitrato (NO₃⁻) na área urbana da cidade de Porto Velho: Um estudo da geografia da saúde**. 2008. 76f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2008.

LIMA, Jamerson Cavalcante de. **Avaliação da concentração de nitrato nas águas subterrâneas no bairro do Farol, em Maceió, Alagoas**. 2011. 96 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

LOBO FERREIRA J.P.C. e OLIVEIRA, M.M. – On experience of Groundwater vulnerability Assessment in Portugal. **International Workshop AVR03**– aquifer Vulnerability and Risk. Salamanca, Mexico, 2003. Disponível em <<http://www.dha.lenec.pt>>. Acesso em set.2008.

MACEIÓ. Plano Diretor de Maceió. Lei Municipal nº 5.486, de 30 de dezembro de 2005. Institui o Plano Diretor do Município de Maceió, estabelece diretrizes gerais de política de desenvolvimento urbano e dá outras providencias. **Câmara Municipal de Maceió**. Maceió, AL, 2005.

_____. Lei Municipal nº 5.593, de 08 de Fevereiro de 2007. Estabelece o zoneamento da cidade de acordo com os parâmetros de macrozoneamento do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (Lei Municipal nº 5.486, de 2005) e dá outras providencias. **Câmara Municipal de Maceió**. Maceió, AL, 2007A.

_____. Estudo Prévio de Impacto Ambiental: Aterro Sanitário de Maceió (Área Selecionada – As 10). Maceió, 2007B.

MARQUES, A. G. e MARQUES, J. A. F. Prática de Fundações no Estado de Alagoas, 2005. Disponível em: <<http://www.cea.al.org.br/images/Cap%20Fundacoes%20Alagoas.pdf>>. Acesso em: Ago/2012. In: MARQUES, J. A. F. **Estudos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, com Bulbos, Instrumentadas em Profundidade, em Terrenos Sedimentares**. 2004.319f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Universidade de São Paulo,São Paulo, 2004.

MARTÍNEZ-BASTIDA, Juan J.; ARAUZO, Mercedes.; e VALLADOLID, Maria. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. **Hydrogeology Journal**, v. 18, p. 681–698, 2010. DOI 10.1007/s10040-009-0549-5.

MEAULO, Fábio José. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro,2004.

MENDOZA, J. A. e BARMEN, G. Assessment of groundwater vulnerability in the Río Artiguas basin, Nicaragua. **Environ. Geol.**, v. 50, p. 569–580, 2006. DOI 10.1007/s00254-006-0233-1.

MENESES, L. F.; SILVA, T. C. da.; GADÊLHA, C. L. M.; FIGUEIREDO, E. C. T. P. de. Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa – PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento. **Rev. Tecnol.**, Fortaleza, v.30, n.1, p. 123-132, 2009.

MOLFI, Paulo Roberto. **A urbanização e os impactos ambientais em Palmas: o caso do Jardim Aurení III**. 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

MONTEIRO, A. B.; CABRAL, J. J. S. P.; BARBOSA, D. L.; FREIRE, P. K. C. Vulnerabilidade e distribuição espacial dos nitratos no Aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão - Recife - Pernambuco. In: **Anais...Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 15.,v.15, p. 23-27, 2003.

MONTEIRO, A. B.; FREIRE, P. K. C.; BARBOSA, G. F.; CABRAL, J. J. S. P.; & SILVA, S. R. DRATIC: vulnerabilidade do aquífero barreiras nos Bairros de Ibura e Jordão – Recife – Pernambuco. **Anais...Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 15. Natal, 2008.

OLIVEIRA, Maria do Rosário. Itinerário geo-historico das paisagens e dos lugares de Maceió. In: ARAUJO, Lindemberg Medeiros (Org). **Geografia: Espaço, Tempo e Planejamento**. Edufal, Maceió, 2004.

NASCIMENTO, S. A. de M.; BARBOSA, J. S. F.; e CRUZ, M. G. M.A. Vulnerabilidade do Aquífero Freático do Alto Cristalino, Salvador, Bahia. **Revista de Geologia**, v. 22, n. 1, p. 75 - 85, 2009. Disponível em: <<http://www.revistadegeologia.ufc.br>>. Acesso em: Abr/2012.

NOBRE, M. de M. M.; NOBRE, R. C. M. Uso sustentável de águas subterrâneas na região metropolitana de Maceió. 1st Joint World Congresson Groundwater e Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 11. **Revista Águas Subterrâneas - ABAS**, São Paulo, 2000. ISSN 2179-9784.

_____. Caracterização Hidrogeológica para o Uso Racional e Proteção dos Mananciais Subterrâneos em Maceió – AL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 6, n. 1, p.7-20, 2001.

NOBRE, R.C.M. 2006. **Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió**. 2012. 296 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NOBRE, R. C. M.; NOBRE, M. de M. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MANSUR W. J. Mapeamento do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas Vulneráveis à Contaminação. RBRH — **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**,v. 13 n.2, p. 101-111, 2008.

OMM – Organização Meteorológica Mundial. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. Geneva. WMO .**Technical document**, n. 341; WCDP, n .10, 1989. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima/OMM_WCDP_N10.pdf>. Acesso em: Abril/2014.

ORTIZ, Jonas Luís. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**.2003. 205 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

PARALTA, E. A.; FRANCES, A. P.; RIBEIRO, L. F. Avaliação do sistema aquífero dos Gabros de Breja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva quadro da água. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SILUSBA), 7. p. 1- 16. **Anais... Évora**, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.9/448>>. Acesso em jul.2012.

PAVÃO, Andrea Dutra Moreira. **Avaliação do índice de vulnerabilidade na bacia hidrográfica do rio Santa Maria – RS.** 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

PEREIRA, Ediléa Dutra. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do aquífero do Reservatório Batata – São Luís – MA.** 2006.133 f.Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

REBOUÇAS, Aldo da C. A inserção da água subterrânea no Sistema Nacional de Gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7 n.4. p. 39-50, 2002.

_____. Águas Subterrâneas.In: REBOUÇAS, A.C., BRAGA, B.,BTUNDISI, J.G. **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação.** 3 ed. rev. e amp. São Paulo: Editora Escrituras, 2006.

RIBEIRO, Daniela Menezes; ROCHA, Washington Franca; GARCIA, Antonio Jorge Vasconcellos. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. **Águas Subterrâneas**, v.25, n.1, p.91-102, 2011.

RIVETTI, Marianna Luna Sousa. **Análise da vulnerabilidade e risco de contaminação dos aquíferos na Região Metropolitana de Maceió.** 2010.87 f.Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

ROCHA, Wilton José Silva da. **Estudo da salinização das águas subterrâneas na região de Maceió a partir da integração de dados hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e geoeletrônicos.** 2005. 203 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

RUSSO, Alexandre de Silvio. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informação geográfica e geoestatística – UGRHI-PCJ.**2009. 85 f.Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de São Paulo,São Paulo, 2009.

SAIDI, S.; BOURI, S.; BEN DHIA, H.Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. **Environ Earth Sci**,v. 59, p. 1579–1588, 2010. DOI 10.1007/s12665-009-0143-0.

SANTOS, Maurício Moreira. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área Selecionada na cidade de Londrina (PR).** 2005. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

SANTOS, Paulo Roberto Penalva dos. **Estudo da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Marizal na Região de Influência do Pólo Industrial de Camaçari (PIC) – Bahia.** 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

SANTOS, R. A.; CRUZ, M. J. M.; NASCIMENTO, S. A. M.. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios pra uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Caderno de Geociências.** nº 7, 2010. Disponível em: <<http://www.cadernosdegeociencias.igeo.ufba.br>>. Acesso em: mar.2012.

SANTOS, R. J. Q. dos; LIMA, R. C. de A.; e FERREIRA NETO, J. V.A geomorfologia do Tabuleiro como consequência do Neotectonismo. In: ARAUJO, Lindemberg Medeiros de (Org). **Geografia Espaço, Tempo e Planejamento**. EDUFAL, Maceió, 2004.

SANTOS, P.R.P.; OLIVEIRA, I.B. – Avaliação do Gerenciamento das Águas Subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Recôncavo Norte, estado da Bahia, utilizando a concessão da outorga de uso como indicador do nível gestão. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 8. **Anais...** São Paulo, 2007.

SÃO PAULO - Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo / Centro de Vigilância Epidemiológica – CVE. Manual das doenças transmitidas por alimentos: Clostridium perfringens/intoxicação alimentar. INFORME-NET DTA, 2002. Disponível em: <ftp://ftp.cve.saude.sp.gov.br/doc_tec/hidrica/clostridium.pdf>. Acesso em: jan.2013.

SEMARH - Secretaria Executiva de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - ALAGOAS. Estudo para Subsidiar a Cobrança pelo Uso da Água Subterrânea na Região Metropolitana de Maceió. Alagoas, 2006.

SILVA, C.C.A. (2004) – Curso de Gestão Ambiental: Gerenciamento de Riscos Ambientais – USP, FSP, FAU, NISA – Barueri/SP – 2004. p 791-803. In: RUSSO, A. de S. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando Sistemas De Informação Geográfica e Geoestatística – geoestatística – UGRHI-PCJ**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, Bruno Tiago Ângelo.; GOMES, Carisia Carvalho. Intrusão marinha em poços de exploração de água subterrânea, na beira-mar de Fortaleza – Ceará. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo, 2007.

SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. de. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **IDESIA**, v. 26, n. 2, p. 75-81. Chile, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v26n2/art10.pdf>>. Acesso em: Dez/2012.

SILVA, F. V.; SILVA, M. M. C. P.; FAZZIO, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; FREIRE, C. C. Avaliação da contaminação das águas subterrâneas na cidade de Maceió por atividade cemiterial: resultados preliminares. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – MS, 18., 2009.

SILVA, F. V.; FAZZIO, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; e FREIRE, C. C. Qualidade das águas subterrâneas em área com atividade cemiterial: estudo de caso em Maceió-AL. Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 10. **Anais...** Maceió, 2010.

SILVA, Florilda Vieira. **Avaliação da contaminação das águas subterrâneas por atividade cemiterial na cidade de Maceió**. 2012. 153 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

SILVA, Robson Willians da Costa.; MALAGUTTI FILHO, Walter. Cemitérios como áreas potencialmente contaminadas. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 9, 2008.

Disponível em <http://www.rbciamb.com.br/images/online/09_artigo_5_artigos_132.pdf>. Acesso em: Dez/2012.

STIGTER, Tibor; VIEIRA, João; e NUNES, Luís. Avaliação da susceptibilidade à contaminação das Águas subterrâneas no apoio à tomada de decisão caso de estudo: Implantação de Campos de Golfe no Concelho de Albufeira (Algarve). Congresso Nacional da Água, 6. **Anais...** Porto, 2002. Disponível em: <<http://w3.ualg.pt/~lnunes/Artigos/golfes.pdf>>. Acesso em: jan.2013.

TAVARES, Jimmy Carter Lima. **Caracterização dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Maceió**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

TAVARES, Paulo Roberto Lacerda; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; COSTA, Celme Torres Ferreira da; SILVEIRA, José das Graças Procópio da; e ALMEIDA JÚNIOR, Francisco Jocélio Bezerra de. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **REM: Revista Escola de Minas Gerais**, v. 62(2), p. 227-236, 2009.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Qualidade da Água Subterrânea – Documento Final. **Prospecção Tecnológica Recursos Hídricos - Anexo II-b**.2003. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/a2b_agua_sub.pdf>. Acesso em: dez.2012.

TREIN, Heinz Alfredo. 2008. **A implicação antrópica na qualidade dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Urussanga – SC**. Tese de Doutorado, UNESP / Rio Claro, 149p.

VAN, Stempoot D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquífer Vulnerability Index (AVI): a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Can Water Res J**.v. 18, p. 25-37, 1993.

VEIGA, M. M.; SILVA, D. M.; VEIGA, L. B. E.; FARIA, M. V. de C. Análise da contaminação dos sistemas hídricos por agrotóxicos numa pequena comunidade rural do Sudeste do Brasil. **Cad. Saúde Pública**, v. 22, p. 2391-2399, 2006.

VIANA, Nirlando de Oliveira. **Vulnerabilidade e risco à poluição do sistema aquífero médio – entre Crato e Missão Velha, bacia do Araripe, Ceará**.2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ZAPOROZEC, A. Groundwater Contamination Inventory: a methodological guide. **IHP-VI series on Groundwater No.2**, UNESCO, Paris, 2002.

WAHNFRIED, Ingo & HIRATA, Ricardo. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.2. p. 15-25,2005.

YAMADA, Thiago. **Ferramentas de geoprocessamento para análise da vulnerabilidade natural das águas sub-superficiais à poluição, área urbana e seu entorno, município de São Carlos - SP**.2007. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.