# UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS DA TERRA E DO AMBIENTE – PPGM**


# MODELAGEM DA POTENCIALIDADE HÍDRICA E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI, ESTADO DE SERGIPE: UM ESTUDO COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS


## DANIELA DANTAS DE MENEZES RIBEIRO



**FEIRA DE SANTANA - BAHIA**

**2011**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS DA TERRA E DO AMBIENTE – PPGM

# MODELAGEM DA POTENCIALIDADE HÍDRICA E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI, ESTADO DE SERGIPE: UM ESTUDO COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS

**DANIELA DANTAS DE MENEZES RIBEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha.
Co–Orientador: Dr. Antonio Jorge Vasconcellos Garcia

**FEIRA DE SANTANA – BAHIA**

**2011**

Ficha catalografica: Biblioteca Central Julieta Carteado

Ribeiro, Daniela Dantas de Menezes

R368m Modelagem da potencialidade hidrica e vulnerabilidade a contaminaçao das aguas subterraneas da sub-bacia do rio Siriri, Estado de Sergipe: um estudo com base em geotecnologias / Daniela Dantas de Menezes Ribeiro, 2011.

133f. : il.

Orientador: Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha

Dissertação (Mestrado Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente) – Universidade Estadual de Feira de Santana, 2011.

1. Águas subterrâneas. 2. Geotecnologias. 3. Processo Analítico Hierárquico (AHP). 4. GOD. I. Rocha, Washington de Jesus Sant'Anna, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Titulo.

CDU : 556.3

**MODELAGEM DA POTENCIALIDADE HÍDRICA E VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI, ESTADO DE SERGIPE: UM ESTUDO COM BASE EM GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Data de aprovação:

BANCA EXAMINADORA:

_____

Dr. Washington de Jesus Sant'Anna da Franca Rocha (UEFS) – Orientador

_____

Drª. Aracy Losano Fontes (UFS) – Examinadora Externa

_____

Dr. Ardemírio de Barros Silva (UEFS) - Examinador Interno

**Agradecimentos**

Aos meus pais pela compreensão, apoio, paciência e ajuda financeira.

A minha querida avó Isabel (in memorian) e meu avô José, por incentivar os meus estudos.

Às irmãs, sobrinha, tias, tios, primas e primos, por compreenderem os momentos de ausência.

A minha tia Gracianne, pelo apoio em Feira de Santana-BA.

Ao meu orientador, Dr. Washington Franca Rocha, pela adoção da orientação e causa, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Ao co-orientador, Dr. Antonio Jorge Vasconcellos Garcia, pelo apoio e colaboração.

A todos aqueles que compõem o PPGM, professores, secretários e outros, pelo apoio e conhecimentos.

Aos colegas do curso de Geologia da Universidade Federal de Sergipe, em especial, à Flávia, Wendel e Liana, que, de alguma forma, colaboraram para a realização do estudo.

Aos colegas do mestrado, pelos conhecimentos transmitidos e por termos andado juntos nesta longa caminhada.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que esqueci, não deixarei de agradecer, pois, de qualquer forma, contribuíram para esta conquista.

# RESUMO

A presente pesquisa tem por objetivo produzir os modelos de potencialidade hídrica e vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, utilizando procedimentos em Geotecnologias. A modelagem espacial de águas subterrâneas inclui etapas que permitem uma aproximação adequada do ambiente real, em subsuperfície. Na pesquisa, estas etapas consistem no levantamento de dados e informações existentes, coleta de novos dados e processamento, interpretação, integração e modelagem. Imagens do satélite LandSat-TM e o modelo digital de terreno foram utilizados, com o objetivo de complementar a informação geológica contida nos mapas pré-existentes, extraindo os lineamentos estruturais, importantes na transmissibilidade entre a superfície e a subsuperfície. Para a criação do modelo de potencialidade hídrica, foram considerados procedimentos de modelagem baseada no conhecimento, que utilizam dados selecionados a partir de conhecimento empírico, para caracterizar as evidências ou fatores que influenciam o fenômeno estudado. Os fatores ou critérios utilizados foram: precipitação, uso e cobertura do solo, tipo do solo, declividade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos e permeabilidade das rochas. O método AHP (Processo Analítico Hierárquico) auxiliou na integração desses fatores, e na avaliação dos parâmetros e pesos atribuídos, e teve o objetivo de assegurar o desenvolvimento de critérios, subcritérios e pesos importantes, para a geração do modelo de potencialidade. Assim, a análise dos fatores foi realizada, atribuindo pesos às suas respectivas classes, bem como a cada um dos fatores, de acordo com as regras de decisão definidas previamente, no contexto do objetivo a ser alcançado. A modelagem da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação foi realizada pelo método “GOD”, devido à sua simplicidade e fácil implementação. Os procedimentos cartográficos para a elaboração do mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas envolveram operações de álgebra de mapas, aplicada aos seguintes temas: mapa geológico e mapa de variação do nível estático dos poços. Além da vulnerabilidade, foi aplicada a metodologia POSH de classificação de atividades potencialmente contaminantes, para a elaboração do mapa de perigo de contaminação, a partir dos usos dos solos da área de estudo. A modelagem em ambiente de Sistema de Informações Geográficas permitiu a

definição de cinco classes de potencial hídrico das águas subterrâneas: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Os aquíferos Sapucari e Barreiras destacam-se com as maiores vazões. A avaliação geral e a criação do modelo de vulnerabilidade consistiram na definição de cinco classes: desprezível, baixa, média, alta e extrema. Os aquíferos formados pelos sedimentos de praia e aluvião e o Barreiras são os mais vulneráveis à contaminação, com classes de extrema e alta vulnerabilidade, o que implica a necessidade de estudos de qualidade da água e o planejamento de uso e ocupação do solo. Ao relacionar os mapas de vulnerabilidade e perigo de contaminação, observa-se a presença de atividades com elevado potencial de contaminação em áreas de vulnerabilidade alta e extrema.

Palavras-chave: Águas subterrâneas; AHP; Geotecnologias; GOD; Modelo.

# ABSTRACT

The present research aims to produce models of potentiality and vulnerability to contamination groundwater of sub-basin of the river Siriri using procedures in Geotecnologies. The spatial modeling of groundwater includes steps that allow an adequate approximation of the real environment in sub-surface. In the research these steps consist in collect existing data and information, collection of new data and processing, interpretation, integration and modeling. Images from the Landsat-TM satellite and digital terrain model were used in order to complement the geological information contained in the pre-existing maps, extracting the structural lineaments, important in the transmissibility between the surface and sub-surface. To create the model of groundwater potentiality were considered modeling procedures based on knowledge that uses selected data from empirical knowledge or evidence to characterize the factors that influence the phenomenon. The factors or criteria used were: rainfall , use and land cover, soil type, slope, drainage density, lineament density and permeability of rocks. The AHP (Analytic Hierarchy Process) assisted in the integration of these factors, in evaluation of parameters and weights assigned, aiming to ensure the development of criteria, sub-criteria and weights of importance to generate the model of groundwater potentiality. Thus, the analysis of the factors was realized in order to assign weights to their respective classes, as well as to each factor, according to the decision rules previously defined in the context of the objective to be achieved. The modeling in environment of Geographic Information System allowed the definition of five classes of potential: very low, low, moderate, high and very high. The modeling of groundwater vulnerability to contamination was performed by the method "GOD" because of its simplicity and ease implementation. The cartographic procedures for preparation of the groundwater vulnerability map, involved maps algebra operations applied to the following themes: geological map and map of static level wells variation. The general assessment and the model creation consisted in definition of five classes of vulnerabilities: negligible, low, medium, high and extreme. Besides vulnerability, was applied the methodology POSH of classification potentially contaminating activities for the preparation of the statement of danger contamination from the land uses of study area. The modeling in environment of Geographic Information

System allowed the definition of five classes of groundwater potential: very low, low, moderate, high and very high. The aquifers Sapucari and Barreiras stands out with biggest flows. The general assessment and creation of model of vulnerability consisted in the definition of five classes: negligible, low, medium, high and extreme. The aquifers formed by the beach sediments and the alluvial and Barreiras are the most vulnerable to contamination, with classes of extremely and high vulnerability, which implies the need for studies of water quality and planning of land use. By linking the maps of vulnerability and danger of contamination, it is observed the presence of activities with high potential for contamination in areas of high and extreme vulnerability.

Keywords: Groundwater; AHP; Geotecnologies; GOD; Model.

## Estrutura da Dissertação

A dissertação é formada por cinco capítulos, sendo que os capítulos 3 e 4 foram redigidos com formatação de artigos científicos. Logo, serão observadas nesses, repetições de alguns itens presentes no referencial teórico.

Inicialmente é apresentado um capítulo introdutório que versa sobre os objetivos da pesquisa e os condicionantes geoambientais da área de estudo que são: os componentes geológicos, hidrogelógicos e geomorfológicos; o clima e solos; a vegetação e o uso do solo.

Em seguida, apresenta-se o referencial teórico relativo à gestão dos recursos hídricos no Estado de Sergipe, com destaque para a sub-bacia do rio Siriri, os diferentes conceitos e classificação do meio aquífero, o Sistema de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto, como também as diferentes metodologias para a modelagem da vulnerabilidade, perigo de contaminação e potencial hídrico das águas subterrâneas e suas aplicações, com base em SIG e Sensoriamento Remoto.

Já o capítulo 3 revela os diferentes critérios para a definição do modelo (mapa) de potencial hídrico das águas subterrâneas, a partir de procedimentos em ambiente SIG e técnicas de Sensoriamento Remoto, assim como, os processamentos gerados e a importância de cada critério para a ocorrência da água subterrânea.

O capítulo seguinte apresenta os métodos utilizados e a modelagem realizada para a construção do mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Além disso, revela as atividades potencialmente contaminantes, a partir da aplicação da metodologia POSH de classificação de fontes potenciais de contaminação, utilizando imagens de satélite, mapa de uso do solo e visitas no campo.

Por fim, buscou-se tecer conclusões e recomendações a respeito da vulnerabilidade e potencialidade dos recursos hídricos subterrâneos da sub-bacia do rio Siriri, voltadas não somente para atender os objetivos acadêmicos, mas, sobretudo, para auxiliar no desenvolvimento de uma gestão de recursos hídricos sustentável.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.Mapa de localização da sub-bacia do rio Siriri com destaque para os municípios presentes na área ..... 21
Figura 1.2.Mapa geológico simplificado da área de estudo ..... 24
Figura 1.3.Afloramento da Formação Barreiras, no município de Divina Pastora ..... 26
Figura 1.4.Afloramentos do Membro Angico da Formação Riachuelo ..... 26
Figura 1.5.Afloramento do Membro Angico da Formação Riachuelo, no campo de petróleo do município de Riachuelo ..... 27
Figura 1.6.Afloramento de brecha calcária, em margem de rodovia, no município de Laranjeiras..... 27
Figura 1.7.Pastagem no município de Nossa Senhora das Dores ..... 30
Figura 1.8.Mapa de uso do solo da sub-bacia do rio Siriri ..... 31
Figura 1.9.Cultivo da cana-de-açúcar no município de Capela ..... 32
Figura 1.10.Cultivo do Milho no município de Nossa Sra das Dores..... 32
Figura 2.1.Artigos plásticos presentes em riacho próximo a nascente do rio Siriri 40
Figura 2.2.Distribuição de água doce nos principais reservatórios da Terra..... 42
Figura 2.3.Tipos de Aquíferos ..... 43
Figura 2.4.Estrutura de decisão hierárquica em três níveis ..... 53
Figura 2.5.Sistema GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero ..... 62
Figura 3.1.Fluxograma Metodológico ..... 66
Figura 3.2.Lineamentos identificados no relevo sombreado com diagrama de frequência acumulada ..... 70
Figura 3.3.Lineamentos identificados nas imagens Landsat com diagrama de frequência acumulada ..... 70
Figura 3.4.Mapa final dos lineamentos identificados no relevo sombreado e nas imagens Landsat com diagrama de frequência acumulada ..... 71
Figura 3.5.Estrutura de decisão hierárquica em três níveis ..... 72

Figura 3.6.Modelagem Cartográfica para elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri..... 80
Figura 3.7.Mapa de cargas para as classes de permeabilidade ..... 84
Figura 3.8.Mapa de cargas para declividade ..... 85
Figura 3.9.Mapa de cargas para os tipos de solo..... 86
Figura 3.10.Mapa de cargas para o uso do solo ..... 87
Figura 3.11.Mapa de cargas para a densidade de drenagem..... 88
Figura 3.12.Mapa de cargas para a precipitação média anual..... 89
Figura 3.13.Mapa de cargas para a densidade de lineamentos..... 90
Figura 3.14.Mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas ..... 94
Figura 4.1.Sistema GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas .....101
Figura 4.2.Modelo para a produção de mapa de vulnerabilidade utilizando o sistema GOD .....102
Figura 4.3.Modelagem cartográfica da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas .....106
Figura 4.4.Mapas de índices GOD de avaliação de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.....108
Figura 4.5.Mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação a partir do método GOD .....109
Figura 4.6. Atividades com carga potencial de contaminação.....113
Figura 4.7. Cruzamento dos mapas das atividades com potencial de contaminação e a vulnerabilidade das águas subterrâneas.....114

# LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1.Unidades geológicas e caracterização dos aquíferos presentes na sub-bacia do rio Siriri..... 25
Quadro 2.1.Distribuição vertical da água no subsolo ..... 41
Quadro 2.2.Principais métodos de interpolação e suas descrições ..... 46
Quadro 2.3.Escala Fundamental de Satty..... 55
Quadro 2.4. Fatores DRASTIC e seus pesos..... 58
Quadro 2.5.Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade a contaminação de aquíferos ..... 59
Quadro 2.6.Parâmetros considerados no método GOD..... 60
Quadro 2.7.Definição das classes de vulnerabilidade do aquíferos..... 63
Quadro 3.1.Escala Fundamental de Satty..... 73
Quadro 3.2.Cargas para uso e cobertura do solo ..... 75
Quadro 3.3.Cargas dos tipos de solo ..... 76
Quadro 3.4.Cargas para os atributos litológicos definidores de propriedades aquiferas (aplicados a área de estudo) e fatores adicionais passiveis de modificação de propriedades ..... 78
Quadro 4.1.Parâmetros considerados no método GOD..... 99
Quadro 4.2.Definição das classes de vulnerabilidade do aquífero..... 101
Quadro 4.3.Correlação das atividades e potencial de geração de carga contaminante ..... 103

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Matriz de comparação dos critérios ..... 54
Tabela 3.1.Matriz de comparação dos critérios ..... 73
Tabela 3.2. Cargas de Precipitação ..... 74
Tabela 3.3.Faixas e cargas para declividade ..... 76
Tabela 3.4.Cargas para densidade de drenagem ..... 77
Tabela 3.5.Cargas para densidade de lineamentos ..... 79
Tabela 3.6 Matriz de comparação entre os critérios ..... 92
Tabela 3.7.Pesos dos parâmetros utilizados na elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas ..... 92
Tabela 4.1.Valores indicativos da vulnerabilidade de aquíferos a contaminação ..... 107
Tabela 4.2.Classes de vulnerabilidade e suas respectivas áreas de abrangência ..... 110

# LISTA DE SIGLAS

ANA- Agência Nacional de Águas

AHP- Processo Analítico Hierárquico

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CPRM- Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais

CR- Razão de Consistência

DNPM- Departamento Nacional de Pesquisas Minerais-DNPM

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LANDSAT-TM - Land Remote Sensing Satellite- Thematic Mapper

MDT- Modelo Digital do Terreno

MMA- Ministério do Meio Ambiente

OMS- Organização Mundial de Saúde

PDI- Processamento Digital de Imagens

PETROBRAS- Petróleo Brasileiro S.A

SIG- Sistema de Informações Geográficas

SAD 69- South American 69

SEMARH- Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SPOT- Satellite pour l'Observation de la Terre

SRTM- Shuttle Radar Topographic Mission

NASA- National Aeronautics and Space Administration

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO** ..... 19
**1.1 Localização da Área de Estudo** ..... 20
**1.2 Condicionantes Geoambientais** ..... 22
***1.2.1 Componentes Geológicos, Hidrogeológicos e Geomorfológicos*** ..... 22
***1.2.2 Clima e Solos*** ..... 29
***1.2.3 Vegetação e Uso do Solo*** ..... 30

**2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA** ..... 33
**2.1 Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos** ..... 33
***2.1.1 Principais Funções da Água Subterrânea*** ..... 34
***2.1.2 Base Legal e Institucional (Federal)*** ..... 35
**2.1.2.1 Programa Nacional de Águas Subterrâneas** ..... 37
***2.1.3 Base Legal e Institucional (Estado de Sergipe)*** ..... 38
**2.2 Recursos Hídricos Subterrâneos** ..... 41
***2.2.1 Conceitos do Meio Aquífero*** ..... 41
***2.2.2 Classificação dos Aquíferos quanto à Pressão*** ..... 43
***2.2.3 Classificação quanto a sua Constituição Litológica*** ..... 44
**2.3 Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto** ..... 45
***2.3.1 Modelagem em Sistema de Informações Geográficas*** ..... 48
**2.3.1.1 Aplicações em Estudos Hidrogeológicos** ..... 50
**2.4 Método Analítico Hierárquico (AHP)** ..... 52
**2.5 Vulnerabilidade e Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas** ..... 55
**2.5.1 Métodos de Cartografia de Vulnerabilidade** ..... 56
***2.5.2 Fontes Potenciais de Contaminação de Águas Subterrâneas*** ..... 60
**2.6 Metodologia GOD** ..... 61

**3 MODELAGEM DA POTENCIALIDADE HÍDRICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI** ..... 64
**3.1 Introdução** ..... 64
**3.2 Materiais e Método** ..... 65
***3.2.1 Procedimentos Metodológicos*** ..... 65

**3.2.1.1 Elaboração do Mapa de Densidade de Lineamentos** ..... 67
**3.2.1.2 Método Analítico Hierárquico**..... 69
**3.2.1.3 Critérios para a Elaboração do Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas** ..... 73
***3.2.2 Procedimentos Cartográficos***..... 74
**3.2.2.1 Mapa de Precipitação**..... 74
**3.2.2.2 Mapa de Uso e Cobertura do Solo** ..... 74
**3.2.2.3 Mapa de Tipo de Solo**..... 75
**3.2.2.4 Mapa de Declividade** ..... 76
**3.2.2.5 Mapa de Densidade de Drenagem** ..... 76
**3.2.2.6 Mapa Geológico**..... 77
**3.2.2.7 Mapa de Densidade de Lineamentos**..... 79
**3.2.2.8 Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas**..... 79
**3.4 Resultados e Discussão**..... 81
***3.4.1 Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas*** ..... 91

**4 MODELAGEM DA VULNERABILIDADE E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS** ..... 95
**4.1 Introdução** ..... 95
**4.2 Vulnerabilidade e Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas** 96
**4.2.1 *Fontes Potenciais de Contaminação de Água Subterrânea***..... 97
***4.2.2 Metodologias de Cartografia de Vulnerabilidade***..... 98
**4.3 Materiais e Método**..... 99
***4.3.1 Procedimentos Metodológicos (Método)***..... 99
**4.3.1.1 Método GOD** ..... 99
**4.3.1.2 Método POSH** ..... 102
***4.3.2 Modelagem da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas*** ..... 104
**4.3.2.1 Coleta de Informações sobre os Aspectos Hidrogeológicos**..... 104
**4.3.2.2 Procedimentos Cartográficos** ..... 104
4.3.2.2.1Mapa Geológico ..... 104
4.3.2.2.2 Mapa de Variação do Nível Estático dos Poços..... 105
4.4.2.2.3 Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas (Método GOD)..... 105

**4.4 Resultados e Discussão** ..... 106
**4.4.1 Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas** ..... 111
**5 CONCLUSÕES** ..... 115
**6 BIBLIOGRAFIA** ..... 118
**ANEXOS** ..... 126

# 1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea corresponde a toda água que ocorre no subsolo terrestre, ocupando os poros e vazios entre os grãos das rochas sedimentares e fraturas de rochas maciças, sendo armazenadas em reservatórios denominados aquíferos. Estes correspondem às formações geológicas que são capazes de armazenar e transmitir volumes significativos de água subterrânea passível de ser explorada pela sociedade.

Como a água subterrânea não pode ser detectada diretamente na superfície terrestre, a não ser quando o nível freático aflora, uma variedade de técnicas tem sido utilizada para extrair informações relacionadas à sua ocorrência e potencial.

A água subterrânea consiste em uma importante reserva hídrica. Associada a este importante reservatório, existe uma variedade de usos para as águas dos aquíferos presentes na sub-bacia do rio Siriri, destacando-se o abastecimento doméstico, irrigação e industrial. Neste ultimo, a indústria do petróleo está substancialmente inserida.

A crescente exploração da água subterrânea é decorrente da expansão econômica, da concentração demográfica e das suas vantagens de utilização com relação às águas superficiais. Seu uso é relativamente mais barato, uma vez que as obras de captação são menos onerosas e não exigem desapropriação de grandes áreas, como na construção de barragens, como também, a sua boa qualidade natural, em grande parte de suas ocorrências, é resultante da ação filtrante do material sobrejacente. Assim, estudos relacionados aos aspectos hidrogeológicos das bacias hidrográficas são ideais para a caracterização, avaliação e planejamento do uso da água subterrânea.

A utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG), na modelagem da potencialidade hídrica, gera elementos para a análise e apoio ao processo de tomada de decisão com relação à exploração e proteção das águas subterrâneas. Associado ao estudo hidrogeológico, auxilia no gerenciamento das águas subterrâneas, uma vez que permite prever os riscos de contaminação a partir da espacialização de áreas potenciais a contaminação. Dentro de sua ampla gama de aplicações, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) é utilizado como ferramenta para o tratamento de dados e geração de modelos.

A bacia hidrográfica é reconhecida como a unidade fundamental de planejamento e gestão, uma vez que possibilita a análise integrativa dos aspectos naturais, sociais e econômicos.

Assim, a delimitação da sub-bacia do rio Siriri, utilizada nesta pesquisa, segue aquela estabelecida pela SEPLANTEC/SRH (2004), como uma das unidades de planejamento de recursos hídricos do Estado de Sergipe.

O estudo teve como objetivo realizar a modelagem da potencialidade hídrica e vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri utilizando Geotecnologias como ferramenta de integração.

Em torno da temática os principais objetivos específicos podem ser expressos como: definir um modelo de potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, a partir de um método de análise multicriterial; aplicar um método específico, internacionalmente aceito e utilizado na estimativa da vulnerabilidade das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri; determinar áreas susceptíveis à contaminação das águas subterrâneas na sub-bacia do rio Siriri; identificar atividades com potencial de gerar carga contaminante nas águas subterrâneas; gerar dados como os mapas de potencialidade hídrica, vulnerabilidade e perigo de contaminação das águas subterrâneas, que possam servir de suporte para a realização de estudos posteriores direcionados à gestão sustentável de recursos hídricos.

## 1.1 Localização da Área de Estudo

A sub-bacia do Rio Siriri pertence à bacia hidrográfica do Rio Japaratuba e corresponde a um de seus três eixos principais de drenagem, com uma área de 416 $km^2$. Abrange dez municípios (Figura 1.1): Siriri, Capela, Divina Pastora, Rosário do Catete, Maruim, General Maynard, Nossa Senhora das Dores, Carmópolis, Santo Amaro das Brotas e Pirambu.

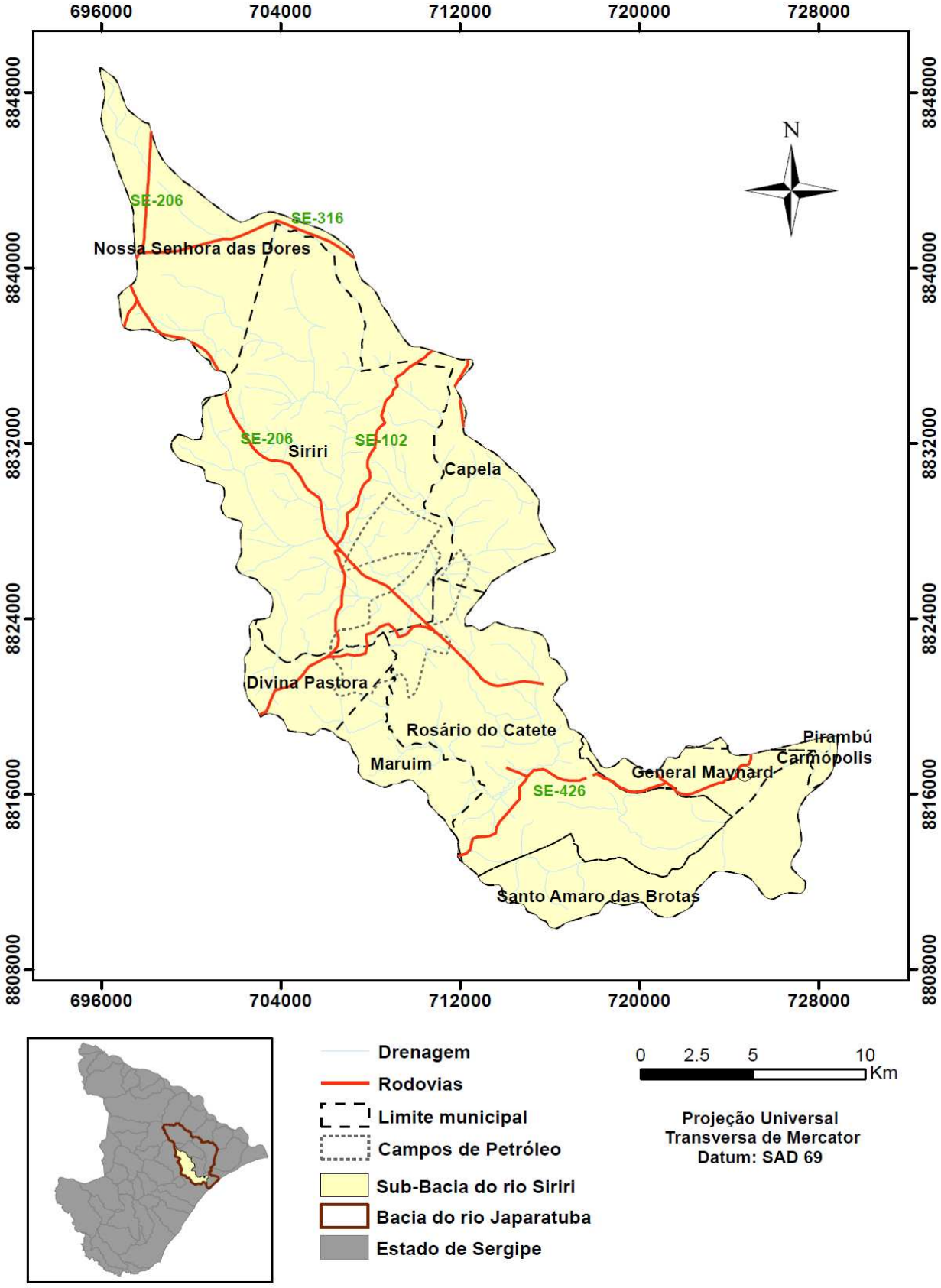



Figura 1.1. Mapa de localização da sub-bacia do rio Siriri, com destaque para os municípios presentes na área (modificado de SEPLANTEC/SRH, 2004).

## 1.2 Condicionantes Geoambientais

O rio Siriri, afluente pela margem direita do rio Japaratuba, tem suas nascentes em altitudes pouco superiores a 230 metros, no município de Nossa Senhora das Dores.

A sub-bacia do rio Siriri destaca-se economicamente pela exploração do seu potencial mineral como o petróleo, gás natural, potássio, calcário, sal-gema, dentre outros. Há também a presença de pastagens, cultivo de cana-de-açúcar e milho. Nesta sub-bacia estão inseridos dois campos de petróleo: o campo de Siririzinho, nos municípios de Siriri, Divina Pastora, Rosário do Catete e Capela e o campo de Castanhal no município de Siriri.

### *1.2.1 Componentes Geológicos, Hidrogeológicos e Geomorfológicos*

A sub-bacia do rio Siriri está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas e da Faixa de Dobramentos Sergipana, separadas pela falha de Propriá, de orientação geral NE-SW. Trata-se de uma falha normal, onde o bloco baixo contém os depósitos sedimentares da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, ainda preservados parcialmente ao nível erosivo das formações Riachuelo e Cotinguiba, enquanto no bloco alto estão os depósitos continentais da formação Barreiras diretamente sobre as rochas do embasamento, o que se justifica pela alta erodibilidade certamente sofrida pelo bloco elevado da falha. A presença de rochas ígneas e metamórficas do embasamento Pré-Cambriano estão representadas pela unidade geológica Cornubianito Traipu (Figura 1.2).

O intervalo estratigráfico na Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas envolve o Grupo Sergipe (formações Cotinguiba e Riachuelo). A formação Cotinguiba do Cretáceo Inferior, caracteriza-se pela presença de carbonatos, com ocorrências locais na base, sobretudo de arenitos. Aflora, com o Membro Sapucari (Kcsp), de forma descontínua.

A Formação Riachuelo do Cretáceo Inferior está constituída por uma sequência sedimentar com predominância de clásticos na base e carbonatos no topo. A litologia permite individualizar na sub-bacia, por ordem de deposição, os Membros Taquari, Maruim e Angico.

Por se tratar de uma zona de contato entre rochas pré-cambrianas e sedimentares, de idades Mesozóica e Cenozóica, possibilita o estudo simultâneo do modelado em domínios litológicos de características diferenciadas, representadas pelas unidades morfoestruturais Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas e Faixa de Dobramentos Sergipana.

A área de estudo insere-se em dois domínios hidrogeológicos: o poroso e o fraturado-cárstico. O poroso forma aquíferos intergranulares de porosidade primária. Já o fraturado-cárstico, apresenta porosidade secundária e recebe esta denominação devido às feições de dissolução cárstica, associadas à presença de fraturas nas rochas calcárias. O primeiro corresponde às rochas da Bacia Sedimentar de Sergipe, à Formação Barreiras e aos sedimentos de praia e aluvião. O segundo inclui as Formações Riachuelo e Cotinguiba (Grupo Sergipe), que são constituídas basicamente por rochas calcárias e, apresentam um comportamento hidrogeológico distinto dos demais sedimentos, daí a sua inclusão no domínio fraturado-cárstico (ANA, 2005a). Ambos os aquíferos possuem um bom potencial hídrico. O quadro 1.1 apresenta a caracterização dos aquíferos presentes na sub-bacia do rio Siriri.

Os membros Angico e Maruim da Formação Riachuelo, o Membro Sapucari da Formação Cotinguiba e a Formação Barreiras, todas eles apresentam boas condições de armazenamento e transmissão de água subterrânea, podendo ser considerados aquíferos. Em termos de produção, a amostragem realizada por Feitosa et al. (1998) revela que o aquífero Sapucari, apresenta vazão média por metro perfurado de 0,66 $m^3$/h (660L/h). Logo em seguida, vem o Barreiras com 0,39 $m^3$/h (390L/h) e o Maruim/Aguilhada com 0,34$m^3$/h(340L/h). Quanto ao aquífero Angico, o autor ressalta que este possui aspectos quantitativos menos favoráveis, com uma vazão média de 0,14 $m^3$/h (140L/h) por metro perfurado. O membro Taquari da Formação Riachuelo e o Cornubianito Traipu não apresentam informações sobre a ocorrência de água subterrânea, devido a suas características litológicas representativas de rochas com permeabilidade/porosidade praticamente nulas.

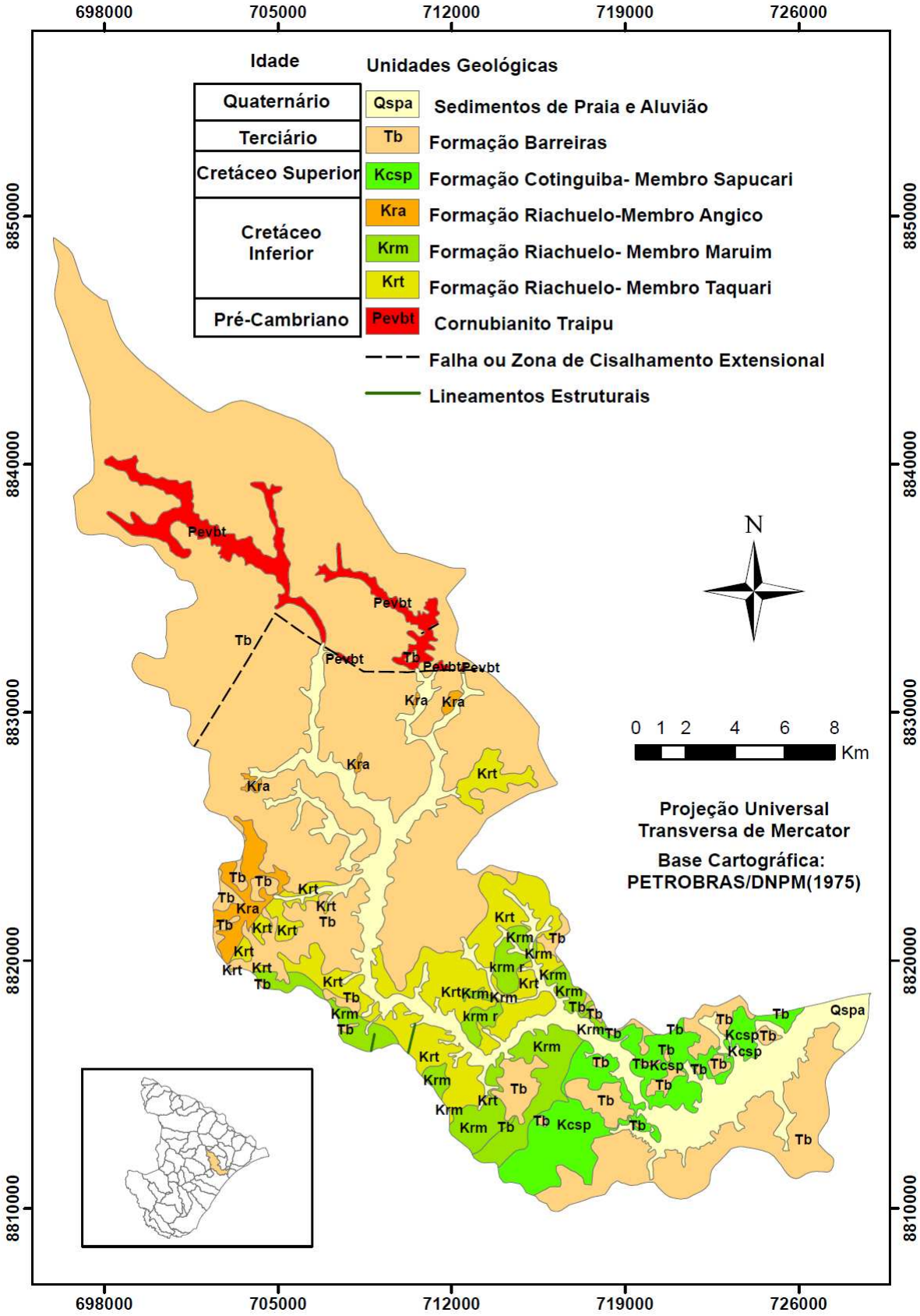



Figura 1.2. Mapa geológico simplificado da área de estudo (adaptado das Cartas Geológicas da Bacia Sergipe/Alagoas, DNPM/PETROBRAS, 1975).

Quadro 1.1. Unidades geológicas e caracterização dos aquíferos presentes na sub-bacia do rio Siriri.

| **Unidades Geológicas/Aquíferos** | | **Idade** | **Litotipos** | **Características dos Aquíferos** |
|---|---|---|---|---|
| ***Sedimentos de Praia e Aluvião*** | | Quaternário | Aluviões de origem fluvial constituídos por clásticos, geralmente síltico-argilosos. Sedimentos inconsolidados. | Aquíferos Livre/ Sedimentar-granular |
| ***Formação Barreiras (Aquífero Barreiras)*** | | Terciário | Sedimentos inconsolidados representados por siltes, areias mal selecionadas e argilas. Clásticos continentais finos a grosseiros, de coloração variada e grau de compactação insignificante (Figura 1.3). Arenito caolínico mal consolidado e cascalhos. Na superfície, ocasionais matacões. | Comportamento de meio poroso. Forma aquíferos do tipo livre/ Sedimentar-granular. |
| ***Formação Cotinguiba*** | ***Membro Sapucari (Aquífero Sapucari)*** | Cretáceo Superior | Essencialmente constituído por calcilutito cinzento maciço ou estratificado. | Aquíferos cárstico-fraturado. Forma aquíferos do tipo confinado. |
| ***Formação Riachuelo*** | ***Membro Angico (Aquífero Angico)*** | Cretáceo Inferior | Arenito branco fino a conglomerático (Figuras 1.4 e 1.5 ) | Comportamento de meio poroso. Aquíferos do tipo livre à semiconfinado/ Sedimentar-granular |
| | ***Membro Maruim (Aquífero Maruim e Maruim/Aguilhada)*** | | Calcarenito e calcirrudito oncolítico e oolítico creme, recifes algálicos isolados (Figura 1.6). Em 1994, Feijó inclui no topo deste membro o calcário dolomitizado, antes denominado de Membro Aguilhada. | Comportamento cárstico-fraturado. Forma aquíferos do tipo confinado a semiconfinado/ Sedimentar-granular e Cárstico. |
| | ***Membro Taquari*** | | Alternâncias de calcilutito e folhelhos cinzentos. | ___ |
| ***Cornubianito Traipu*** | | Pré-Cambriano | Biotita, granada, cornubianito cinza-prateado com porfiroblastos de biotita e ou granada. | ___ |

Fonte: Baseado em Feitosa et al., 1998; PETROBRAS/DNPM, 1975; Feijó, 1994.

Figura 1.3. Afloramento da Formação Barreiras, no município de Divina Pastora. Coordenadas (UTM): L- 701774/ N- 8816244.

Figura 1.4. Afloramentos do Membro Angico da Formação Riachuelo, na fazenda Vauzinho, no município de Siriri, formado por arenito silicificado, bastante cimentado. Coordenadas(UTM): L- 708508/ N- 8827028

Figura 1.5. Afloramento do Membro Angico da Formação Riachuelo, no campo de petróleo do município de Riachuelo, é formado por arenitos com seixos angulosos e subangulosos. No topo, observa-se um nível mais argiloso. Coordenadas (UTM): L- 697130/ N- 8814926

Figura 1.6. Afloramento de brecha calcária, em margem de rodovia, no município de Laranjeiras. Observam-se fragmentos de rochas calcárias trabalhadas pertencentes ao Membro Maruim da Formação Riachuelo. Coordenadas(UTM): L- 702483/ N- 8807410.

A sub-bacia do rio Siriri insere-se em três unidades geomorfológicas: os tabuleiros costeiros (predominante), a planície aluvial e a planície costeira.

Os tabuleiros costeiros, modelados nos sedimentos da Formação Barreiras, de idade Plio-Pleistocênica, encontram-se sobrepostos ao embasamento Pré-Cambriano e às unidades geológicas da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas (CARVALHO e FONTES, 2006).

A existência de um nível mais conservado referente à superfície tabular constitui o testemunho de antiga superfície de cimeira preservada por uma fácie litológica mais resistente (arenito grosseiro e conglomerático). O recuo do nível mais conservado cedeu lugar aos níveis mais dissecados, de altitude inferior, pertencentes à superfície dissecada em colinas, de topos convexos e plano, cristas e interflúvios tabulares.

Atualmente a dissecação dos tabuleiros é acentuada pelas condições climáticas subúmidas dominantes e pela ação erosiva dos rios e riachos pertencentes ao sistema hidrográfico do rio Siriri que entalham seus vales.

A superfície tabular está melhor caracterizada nos municípios de Nossa Senhora das Dores e Capela, sendo utilizada com plantações de cana-de-açúcar e pastagem. Nos vales de fundo plano ocorrem às planícies aluviais que bordejam os cursos d' água da sub-bacia e periodicamente são inundados pelas águas de transbordamento.

Na bacia superior o encaixamento do rio Siriri é dificultado pela maior resistência das rochas do embasamento cristalino, topografia predominantemente plana (0 a 4%) e suave ondulada (4 a 12%) e pelas condições climáticas de semi-aridez. As planícies aluviais quando ocorrem, geralmente tem pequena expressão areal. No médio curso ocorre o aumento gradativo da largura da planície aluvial, devido a penetração da drenagem nos sedimentos da superfície dos tabuleiros costeiros.

Na planície costeira encontram-se a planície flúvio-marinha e os terraços marinhos, que refletem as influências dos processos de origem marinha ocorridos no Quaternário.

### *1.2.2 Clima e Solos*

De acordo com a classificação climática proposta por Leite (1976) para o Estado de Sergipe, a sub-bacia do rio Siriri apresenta dois tipos de clima:

- Megatérmico Subúmido (C1A'a'): apresenta moderado excedentes hídricos de inverno com estação seca bem definida e deficiência hídrica de verão significativa. Abrange os municípios de Siriri, Capela, Divina Pastora, Maruim, Rosário do Catete, General Maynard e Santo Amaro das Brotas.
- Megatérmico Subúmido Seco (CA'a'): a semi-aridez evidencia-se nos reduzidos ou nulos excendentes hídricos de inverno. Ocorre nos municípios de Nossa Senhora das Dores, Siriri e Capela. Nesta faixa climática ocorrem, sobretudo, cursos d'água intermitentes e, a própria geologia, referida à rochas cristalinas e cristalofilianas, controla o potencial hidrológico, caracterizando-a como zona que já apresenta problemas na quantidade e qualidade dos recursos hídricos.

O estudo da distribuição estacional das chuvas na sub-bacia, utilizando as médias mensais dos postos pluviométricos de Nossa Senhora das Dores, Siriri e Capela, indica que ela está totalmente sob a influência das chuvas de outono-inverno (abril e maio) consideradas como sendo de caráter frontológico, aparecendo o máximo pluvial no mês de maio.

Os solos presentes na sub-bacia, segundo a classificação da Embrapa (1999), são o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (LVAd), o Vertissolo (V), o Luvissolo Crômico Eutrófico (TC) e os Neossolos Quartzarênico Hidromórficos (RQg) e Flúvico Eutrófico e Distrófico (RYve/RYbd).

O Argissolo é o solo de maior importância dos tabuleiros costeiros, e abrange altitudes variáveis. A presença de rochas calcárias na Bacia Sedimentar de Sergipe favorece a ocorrência de solos mais férteis e com maior potencial de utilização, para a cultura da cana-de-açúcar, culturas de subsistência, fruticultura e pecuária (SEMARH/PROJETEC/ TECHNE, 2010a). Pastagens e cultivos permanentes são os usos predominantes do Argissolo. O Luvissolo também é utilizado para o desenvolvimento da pecuária, das culturas de subsistência e cultivos da cana-de-açúcar.

Nas baixas colinas dos tabuleiros, o solo é, em geral, de textura argilosa, destacando-se o Vertissolo com alta fertilidade, no qual se desenvolve a

agropecuária e a plantação de cana-de-açúcar, como atividade mais representativa nesse tipo de solo. No Latossolo, também se destaca a ocorrência de plantação de cana-de-açúcar. Os Neossolos Quartzarênicos são muito arenosos e, portanto, apresentam baixo potencial de uso agrícola.

### *1.2.3 Vegetação e Uso do Solo*

Na área de estudo ocorrem as seguintes coberturas vegetais: vegetação de capoeira, campos de restinga, mata, mata ciliar e mangue.

São as pastagens (Figura 1.7) que predominam nos diferentes usos dos solos ( Figura 1.8) da sub-bacia, devido à pobreza do solo. As áreas cultivadas ocupam o segundo lugar no uso da terra da sub-bacia do rio Siriri, destacando-se os cultivos de cana-de-açúcar (Figura 1.9) e milho (Figura 1.10). Já as matas ocupam uma parcela reduzida da área da sub-bacia, em função do intenso desmatamento. No que diz respeito às atividades de exploração mineral, destaca-se a do petróleo.

Figura 1.7. Pastagem no município de Nossa Senhora das Dores.

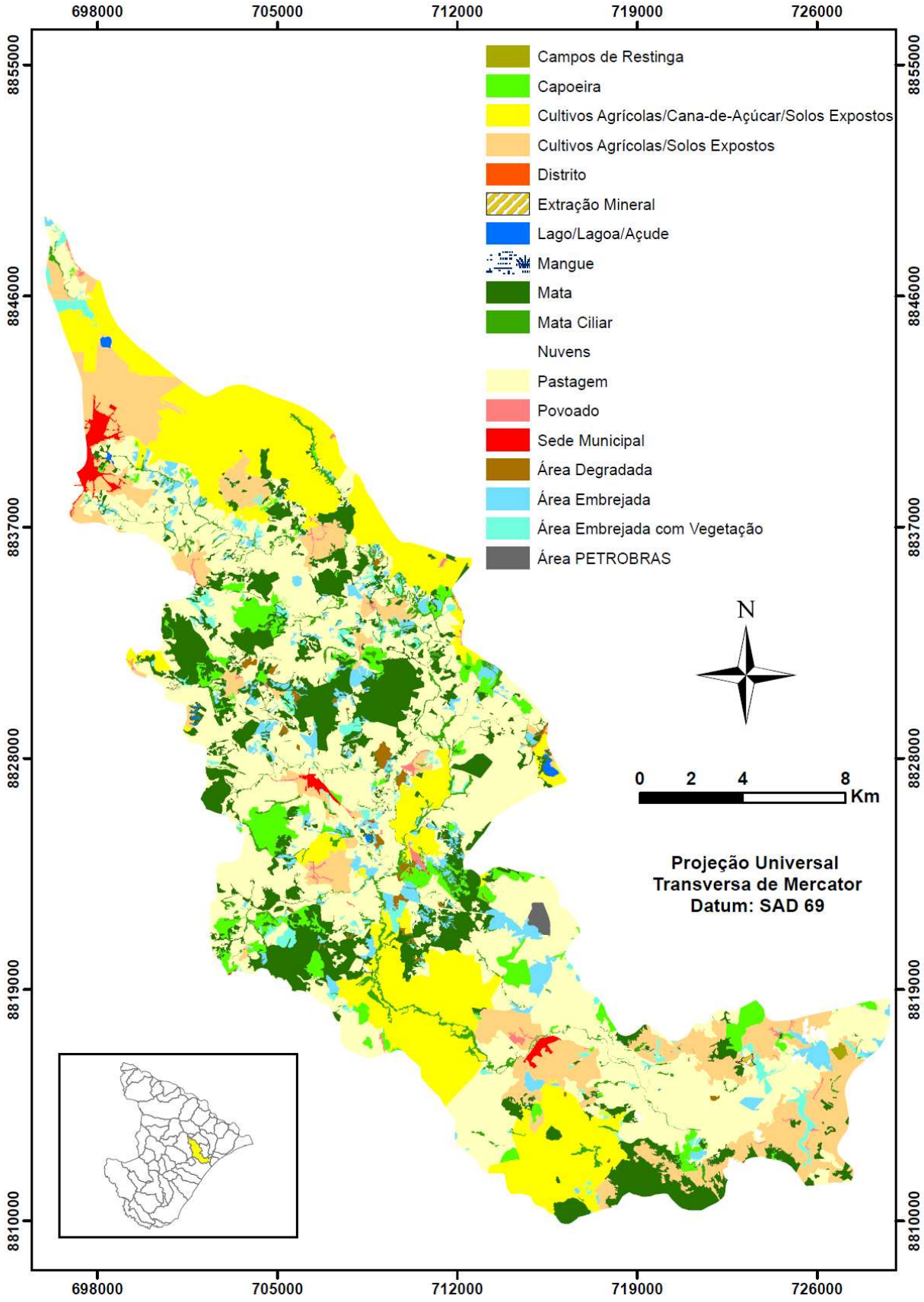



Figura 1.8. Mapa de uso do solo da sub-bacia do rio Siriri (Adaptado de Rocha et al., 2009).

Figura 1.9. Cultivo da cana-de-açúcar no município de Capela.

Figura 1.10. Cultivo do Milho no município de  Nossa Sra das Dores.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLOGIA

## 2.1 Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos

A gestão de recursos hídricos corresponde à forma pela qual se objetiva equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, bem como do seu uso adequado, visando à otimização dos recursos em benefício da sociedade (SETTI et al., 2001). Envolve atividades e ações que objetivem a oferta, a otimização do uso e soluções para os problemas associados ao abastecimento por água subterrânea.

A crescente demanda de água para o consumo humano, industrial e agrícola gera consequências, como a exploração excessiva e a contaminação dos mananciais hídricos subterrâneos, que se opõem à gestão sustentável do recurso natural.

Custódio (1995, in COSTA, 2008, p. 733) define a gestão de aquíferos como:

> [...] o conjunto de guias, normas, leis regulamentos e atuações destinadas a sustentar, conservar, proteger, restaurar e regenerar os aquíferos. Faz referência à quantidade e qualidade da água captável do aquífero, que se deve fazer de forma compatível com a demanda a servir, com outras demandas existentes, com o meio ambiente e com a ordenação e uso do território.

O conhecimento sobre a disponibilidade e a qualidade das águas subterrrâneas, como também a dinâmica de uso e ocupação do solo são essenciais para o estabelecimento de um sistema de gestão que permita o uso racional desse recurso hídrico, garantindo a sustentabilidade presente e futura dos sistemas aquíferos.

A disponibilidade hídrica e a produtividade dos poços são essencialmente os principais fatores determinantes na exploração dos aquíferos. Logo, a questão da qualidade das águas subterrâneas tornou-se importante para o gerenciamento dos recursos hídricos, devido ao crescimento descontrolado da perfuração dos poços tubulares e às atividades antrópicas potencialmente contaminantes (ANA, 2005b).

A sustentabilidade das águas subterrâneas forma-se a partir da gestão do conhecimento sobre este recurso natural, da sua proteção e aproveitamento.

A gestão dos recursos hídricos compreende três etapas básicas de trabalho (COSTA, 2008, p. 734):

- Reconhecimento ou avaliação: refere-se à fase inicial, em que é realizada a primeira quantificação e qualificação dos recursos de águas subterrâneas potenciais e disponíveis.
- Desenvolvimento (Planejamento, Projeto e Construção): trata da fase intermediária. Abrange desde estudos inicias para planejamento regional e local até os detalhes de projetos e construção dos aproveitamentos.
- Exploração (Operação, Manutenção e Controle): corresponde à fase final, que inclui atividades seguidas de operação, manutenção e controle de projetos e obras, envolvendo reformulações de planos e programas a serem executados ou em execução.

### *2.1.1 Principais Funções da Água Subterrânea*

A água subterrânea consiste num recurso natural de destaque, devido à sua importância social, econômica e ambiental. Essa forma uma importante reserva de água doce. Clearly (1989, p. 3) afirma que,

> Se excluirmos as calotas polares e as geleiras [...], a água subterrânea contribui com mais de 95% para toda a água doce disponível no planeta. Já no Brasil, a água subterrânea está estimada em mais de 95% da água doce disponível.

No Brasil, as águas subterrâneas são intensamente exploradas e utilizadas para diversos fins, como no abastecimento humano, irrigação, indústria e lazer. A gestão dos recursos hídricos subterrâneos se dá a partir da administração desses recursos com aspectos de quantidade e qualidade. O primeiro está associado à proteção contra a exploração excessiva dos aquíferos; o segundo é contra a contaminação antrópica (HIRATA, 1993).

Assim, na gestão integrada de recursos hídricos, os aquíferos poderão desempenhar diversas funções em determinadas áreas (Adaptado de REBOUÇAS, 2006, p.18).

- **Função Produtiva**

Trata-se da função mais tradicional responsável pelo abastecimento humano, industrial e irrigação. Neste caso, o estudo hidrogeológico dá ênfase especial a sua zona saturada, devido à sua disponibilidade hídrica (REBOUÇAS, 2006, p. 18). No país, cerca de 15,6% dos domicílios utilizam exclusivamente a água subterrânea como forma de abastecimento (IBGE, 2002). Apesar do uso do manancial subterrâneo ser complementar ao superficial em várias regiões, em outras áreas do país a água subterrânea representa a principal fonte hídrica de abastecimento humano.

- **Função Ambiental**

No entendimento de Rebouças (2006), esta função resulta da percepção do problema ambiental como uma questão abrangente. Diante desta nova perspectiva, consideramos que a hidrogeologia, antes voltada apenas para o estudo da zona saturada, passa a abranger a zona não saturada, solo e zona intermediária, na questão da vulnerabilidade, que trata da sensibilidade de determinado meio frente aos impactos naturais e antrópicos, ou de ação dos agentes poluidores, que já degradam outros ambientes naturais, como os rios e lagos.

- **Função Estratégica**

Consiste na utilização complementar do manancial subterrâneo para o abastecimento em situações de escassez periódica de água, devido a acidentes ou fortes demandas.

### *2.1.2 Base Legal e Institucional (Federal)*

A primeira lei a tratar das águas no Brasil foi o Decreto Lei n° 22.643/34, denominado Código das Águas. No referido Código, a água subterrânea era considerada um bem privado.

Com a Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988) realizou-se modificações no Código das Águas, estabelecendo a extinção do domínio privado da

água. Assim, todos os corpos d'água passaram a ser um bem natural de domínio público.

A Lei Federal n° 9433/97(BRASIL, 1997) instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tendo os seguintes fundamentos básicos: a água corresponde a um bem de domínio público, finito e vulnerável; proporcionar o uso múltiplo da água; em situações de escassez, o uso prioritário é o consumo humano; a gestão de recursos hídricos deve ser descentralizada, contando com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades; a adoção da bacia hidrográfica, como unidade de planejamento. Ela apresenta os seguintes objetivos: assegurar a atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados; o reconhecimento do valor econômico da água, a fim de seu uso racional e integrado.

Já a Lei Federal n° 9433, de 1997, também estabeleceu cinco instrumentos essenciais à boa gestão do uso da água: o Plano Nacional de Recursos Hídricos; a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos; a Cobrança pelo Uso da Água; o Enquadramento dos Corpos D'água em Classes de Uso; o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Dentre os instrumentos citados a outorga e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos possuem significativa importância na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que requer para suas aplicações, estudos de caracterização do sistema aquífero, como também da susceptibilidade deste à contaminação.

A outorga de direito de uso de recursos hídricos consiste num instrumento pelo qual o usuário recebe autorização, concessão ou permissão para utilizar a água, e a cobrança pelo uso da água cria condições de equilíbrio entre as forças da oferta e da demanda (SETTI et al., 2001). Assim, esses instrumentos são importantes para o controle do uso dos recursos hídricos, uma vez que promovem o uso disciplinar da água por seus usuários. Porém, a aplicação eficaz desses instrumentos depende de uma fiscalização eficiente.

Conforme a Lei n°9433, de 1997, estão sujeitos à outorga os seguintes usos de recursos hídricos: derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público ou insumo de processo produtivo; extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo; lançamento em corpo de água, de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição,

transporte ou disposição final; aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

A referida Lei também estabeleceu uma base institucional, baseada na criação dos seguintes organismos: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos; os Comitês de Bacias Hidrográficas; as Agências de Água; as Organizações Civis de Recursos Hídricos.

#### 2.1.2.1 Programa Nacional de Águas Subterrâneas

O Programa Nacional de Águas Subterrâneas (MMA, 2009) corresponde ao Programa VIII do terceiro componente denominado de Programas Regionais de Recursos Hídricos do Plano Nacional de Recursos Hídricos. Tal Programa encontra-se dividido em três subprogramas:

- Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico;
- Desenvolvimento dos Aspectos Institucionais e Legais;
- Capacitação, Comunicação e Mobilização Social.

De fato, dentro do Programa Nacional de Águas Subterrâneas, há um outro denominado de Programa de Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico, que pretende implantar um sistema de gestão integrada entre as águas subterrâneas e superficiais, já que a gestão é voltada atualmente para as águas superficiais devido à visibilidade e disponibilidade de dados e estudos destes mananciais.

As ações previstas, neste programa, são propostas para aquíferos de abrangência transfronteiriça, interestadual e local, em escala regional e local, sendo descritas das seguintes formas (MMA, 2009):

***a) Estudos e projetos para aquíferos de abrangência transfronteiriça e interestadual***: tem como objetivo principal promover a caracterização básica dos sistemas aquíferos transfronteiriços e interestaduais, incluindo: qualidade das águas, balanço hídrico regional, parâmetros hidrogeológicos, definição de reservas, área de recarga e descarga, vulnerabilidade natural e risco de poluição e contaminação, visando subsidiar a gestão integrada das águas.

***b) Estudos e Projetos Locais:*** corresponde aos estudos realizados em áreas restritas de um aquífero regional ou local, que se inserem em determinada bacia

hidrográfica ou limites geográficos estaduais ou municipais. Apresenta, como objetivo principal, o conhecimento hidrogeológico local, levando em consideração as políticas municipais de uso e ocupação do solo.

Possui, como atividades previstas de importância, a realização de estudos hidrogeológicos que incluam a vulnerabilidade natural e o risco de contaminação, em especial nas áreas urbanas onde a água subterrânea é fonte importante para o abastecimento público, incentivar estudos para a delimitação de áreas de uso restritivo das águas subterrâneas, elaborar mapas de exploração dos aquíferos, visando subsidiar a outorga das águas subterrâneas e promover ações para estabelecer perímetros de proteção dos poços.

***c)Monitoramento QualiQuantitativo das Águas Subterrâneas:*** corresponde a um instrumento de suporte às estratégias, às ações preventivas e às políticas de uso, proteção e conservação do recurso hídrico subterrâneo. Trata-se de um dos componentes da gestão e tem, como objetivo principal, ampliar a base de conhecimento hidrogeológico dos aquíferos, acompanhando as alterações espaciais e temporais na qualidade e na quantidade das águas subterrâneas, para fins de gestão integrada de recursos hídricos.

### *2.1.3 Base Legal e Institucional (Estado de Sergipe)*

No estado de Sergipe, a Lei Estadual Nº 3.870/97 (Sergipe, 1997) dispõe sobre a política Estadual de Recursos Hídricos, criando o Fundo Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Apresenta, como diretrizes básicas de ação: a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade; a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental e a articulação da gestão dos recursos hídricos com a do uso do solo. Estabelece, como instrumentos, além daqueles presentes na política nacional de recursos hídricos, os seguintes: o Plano Estadual de Recursos Hídricos; o Fundo Estadual de Recursos Hídricos; o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos.

Sergipe possui seis comitês de bacias hidrográficas, que são: as bacias dos rios São Francisco, Vaza Barris, Real, Japaratuba, Sergipe e Piauí.

Conforme a Lei Estadual Nº 3.870/97, o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos é formado pela coleta, tratamento, armazenamento e

recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão. Dentre os objetivos deste sistema, pode-se destacar: coordenar a gestão integrada das águas; planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos. Este sistema encontra-se bem estruturado, com base cartográfica atualizada e a criação do atlas digital de recursos hídricos (SEMARH/PROJETEC/ TECHNE, 2010b).

No que diz respeito à outorga e cobrança, a Lei Estadual Nº 3.870/97 segue o que estabelece a Lei Federal n° 9433/97. Esta últim a dispõe que a outorga tem, como finalidade, assegurar o controle qualitativo e quantitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

Tal outorga iniciou-se no ano de 2000, sendo concedidas, até o momento, um total de 410 pelo respectivo Estado, dentre superficiais e subterrâneas, que são consideradas, nesse universo, as alterações, renovações e novas emissões (SEMARH/PROJETEC/ TECHNE, 2010b).

Com relação à cobrança, a Lei Estadual Nº 3.870/97 prevê a aplicação dos valores arrecadados pela cobrança do uso do recurso hídrico prioritariamente na bacia hidrográfica em que foram gerados, que serão utilizados para financiamentos em estudos, programas, projetos e obras incluídos nos Planos de Recursos Hídricos e a possibilidade de aplicação, a fundo perdido, em projetos e obras que alterem, beneficiando a coletividade, a qualidade, a quantidade e o regime de vazão de um corpo de água. No Estado de Sergipe, ainda não foram realizados estudos de cobrança pelo uso dos recursos hídricos subterrâneos.

Portanto, nesse Estado, o processo de outorga ou concessão do direito de uso dos recursos hídricos encontra-se ainda em desenvolvimento. É o que indica a base de dados do Atlas Digital de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe (SERGIPE, 2004), o qual apresenta um plano de informação referente às outorgas de recursos hídricos superficiais e subterrâneos concedidas pelo Estado, como também a Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Sergipe (SEMARH, 2010) possui um banco de dados atualizado com as outorgas concedidas na bacia hidrográfica do rio Japaratuba.

Quanto à área correspondente à sub-bacia do rio Siriri, esta possui outorga de utilização dos recursos hídricos subterrâneos em 35 poços de captação de água subterrânea. As planilhas de outorgas apresentam informações como: localização geográfica do poço, número do processo, data da outorga, vazão da outorga ($m^3/h$),

volume da outorga ($m^3$/mês), o tipo de manancial, finalidade da outorga, requerente e finalidade (SERGIPE, 2004; SEMARH, 2010).

O Comitê da bacia hidrográfica do rio Japaratuba, criado por meio da resolução nº 06, de 27 de junho de 2007, tem por finalidade promover o desenvolvimento sustentável da bacia. Suas atribuições de destaque correspondem a: propor ao órgão gestor de recursos hídricos planos e programas para a utilização da água; estabelecer mecanismos de cobrança pelo uso dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica e sugerir ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos os valores a serem cobrados; deliberar sobre os projetos de aproveitamento de recursos hídricos; propor ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos a isenção da obrigatoriedade de outorga de direito de uso dos recursos hídricos para as acumulações, captações e lançamentos de pouca expressão; estabelecer critérios e promover o rateio de custos das obras de uso múltiplo dos recursos hídricos de interesse comum ou coletivo.

O comitê da bacia hidrográfica do rio Japaratuba encontra-se em funcionamento e reconhece que a bacia hidrográfica apresenta problemas ambientais. Neste sentido, promovem atividades e reuniões que tem por objetivo de desenvolver melhorias na gestão de recursos hídricos. Dentre os principais problemas, destacam-se a poluição do manancial por lançamentos de esgotos e artigos de plásticos (Figura 2.1).

Figura 2.1. Artigos plásticos presentes em riacho próximo à nascente do rio Siriri. Coordenadas (UTM): L- 709214/ N- 8834704.

## 2.2 Recursos Hídricos Subterrâneos

### *2.2.1 Conceitos do Meio Aquífero*

A água presente na Terra é proveniente do ciclo hidrológico. Desse modo, ela é precipitada na superfície terrestre e nos oceanos, a qual retorna à atmosfera pelos processos de evaporação, escoamento superficial e fluxo subsuperficial, aos oceanos. Parte da água que precipita infiltra-se pelos espaços presentes no solo e nas rochas. Já a outra parte é absorvida pelas raízes das plantas, que são conduzidas para as folhas e retornam para a atmosfera por meio da transpiração das plantas. Parte da água infiltrada pode ainda retornar à superfície por meio de nascentes, que escoam para os rios e lagos. A parcela da água que não se infiltra escorre pela superfície para áreas rebaixadas e planas, alimentando diretamente rios, lagos e oceanos. No período da infiltração, uma parcela da água fica retida nas regiões próximas à superfície do solo, formando a denominada zona não saturada.

A água subterrânea ocorre abaixo do nível de saturação ou nível freático, presente nas formações geológicas aflorantes e, parcialmente saturadas, e nas formações geológicas profundas totalmente saturadas ( MANOEL FILHO, 2008).

De acordo com Oliveira e Souza (2008, p. 15), após a infiltração no subsolo, a distribuição vertical da água ocorre da seguinte forma (Quadro 2.1):

Quadro 2.1. Distribuição vertical da água no subsolo.

| ZONAS | CARACTERIZAÇÃO |
|---|---|
| **1 Zona de Aeração** | Parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Esta zona pode ser dividida em três: zona de umidade do solo, zona intermediária e franja de capilaridade. |
| **1.1 Zona de Umidade do Solo** | Parte mais superficial da zona de aeração, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. |
| **1.2 Zona Intermediária** | Região situada entre a zona de umidade do solo e a franja capilar. |
| **1.3 Franja de capilaridade** | Região mais próxima ao nível d'água do lençol freático. |
| **2. Zona de Saturação** | Região abaixo do lençol freático, onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. |

Fonte: Modificado de Oliveira e Souza (2008, p. 15)

A água doce apresenta uma importância significativa, no que diz respeito aos seus usos. Com relação à subterrânea, esta contribui para o abastecimento de água potável em todo o Planeta Terra, suprindo populações, indústrias e regiões com atividades agrícolas.

Segundo Rebouças (2006, p.32), do total de água na Terra (1.386km$^3$), 97,5% é constituída de água salgada e 2,5% de água doce. Do total de água doce (2,5%), a distribuição ocorre da seguinte forma (Figura 2.2).

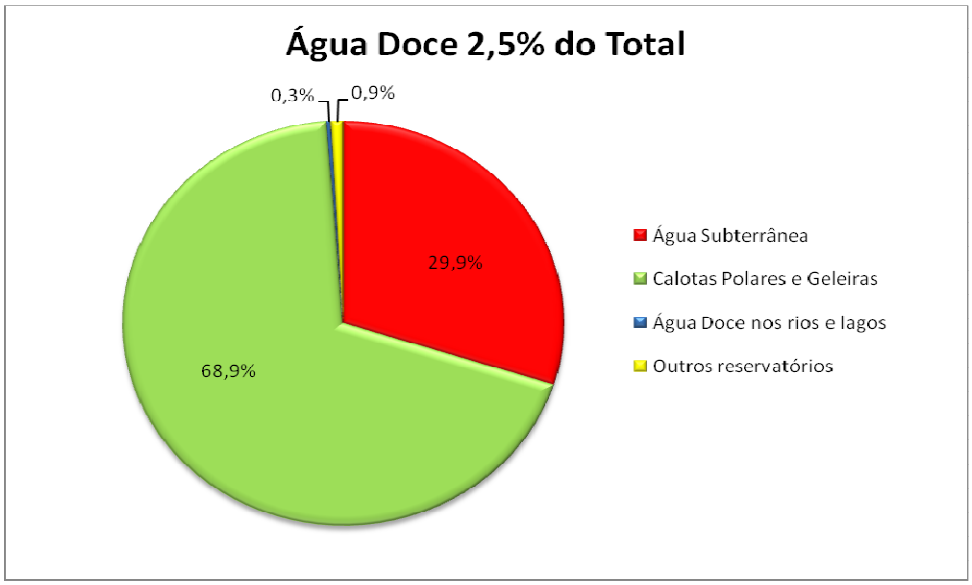



Figura 2.2. Distribuição de água doce nos principais reservatórios da Terra.
Fonte: Adaptado de Rebouças, 2006.

Como já referido, a ocorrência de água subterrânea se dá em formações geológicas denominadas aquíferos, com permeabilidade e porosidade suficientes para armazenar e transmitir quantidades significativas de água.

Assim, nas palavras de Rebouças, Feitosa e Demétrio (2006), “o termo aquífero designa uma camada ou corpo rochoso que apresenta, relativamente, os maiores valores de porosidade específica e permeabilidade na área em questão”. Isso significa que, os espaços vazios-poros e fraturas são suficientemente grandes para armazenar volumes significativos de água.

Manoel Filho (2008), considera o aquífero uma formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior, em condições naturais.

Os aquíferos podem ser classificados quanto à pressão da água e à constituição do material geológico. Quanto à pressão, podem ser livre, confinado,

semiconfinado e suspenso (REBOUÇAS et al., 2006). Quanto à constituição do seu material geológico são classificados em três tipos: poroso ou sedimentar, fraturado ou fissural e cárstico (BORGHETTI, 2004). Estas classificações são descritas a seguir.

### *2.2.2 Classificação dos Aquíferos quanto à Pressão*

*a) Aquífero livre* - corresponde à primeira camada porosa e permeável do perfil geológico da área considerada, onde as águas da sua zona saturada estão sob condições de pressão atmosférica normal, ou seja, livre (aquífero A da Figura 2.3). Quando o nível da água (NA) dos aquíferos livres encontra-se a uma pequena profundidade da ordem de 5-6 metros, denomina-se, geralmente, de freático.

*b) Aquífero Confinado* - trata-se da camada aquífera que se encontra encerrada entre duas relativamente impermeáveis. A pressão, neste aquífero (aquífero B da Figura 2.3), é superior à atmosférica, devido ao peso das camadas sobrejacentes. Assim, quando se atravessa a camada confinante, o nível da água sobe no furo realizado até o ponto em que se estabelece o equilíbrio com a pressão atmosférica da área. Quando este nível de equilíbrio encontra-se acima da superfície topográfica, configura-se a situação de poço jorrante.

*c) Aquífero Semiconfinado* - corresponde a um tipo de aquífero intermediário, com presença de camadas confinantes relativamente permeáveis e pouco espessas.

*d) Aquífero Suspenso* - ocorre quando há uma acumulação de água acima do nível regional do freático. A água deste tipo de aquífero apresenta extensão horizontal limitada (localização 3 da Figura 2.3)

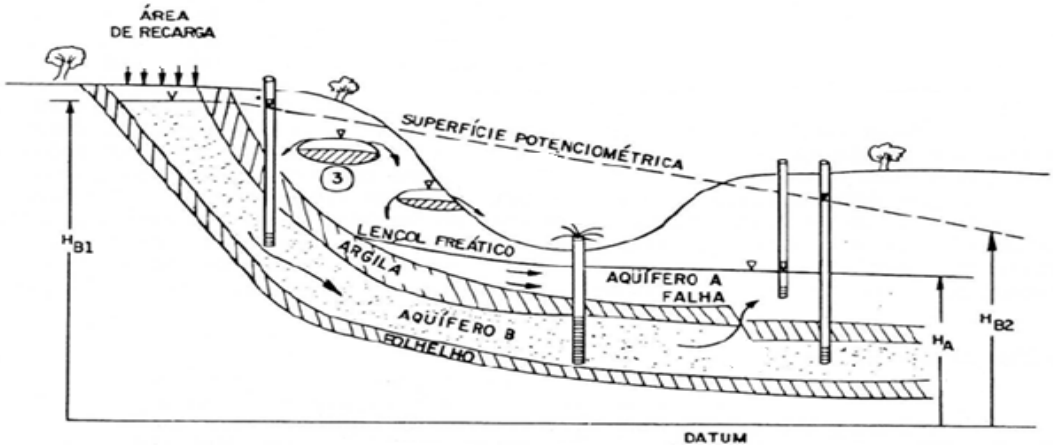



Figura 2.3. Tipos de Aquíferos (Clearly,1989).

### *2.2.3 Classificação quanto a sua Constituição Litológica*

*a) Aquífero Poroso ou Sedimentar* - formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos. Constituem importantes aquíferos, devido ao grande volume de água que armazenam e pela ocorrência em grandes áreas de subsuperfície. Ocorrem em terrenos sedimentares e apresentam porosidade quase sempre homogeneamente distribuída, respeitando, entretanto, as macro-heterogeneidades características dos depósitos sedimentares consolidados ou inconsolidados.

b) *Aquífero fraturado ou fissural* – ocorre preferencialmente em rochas ígneas e metamórficas, podendo, entretanto, ser encontrado em rochas sedimentares extremamente coesas/cimentadas. A capacidade de armazenamento dessas rochas está relacionada à ocorrência de fraturas, originadas por processos tectônicos.

c*) Aquífero Cárstico (Karst)* - associado às rochas calcárias/carbonáticas ou evaporíticas. A capacidade de armazenamento deste tipo de aquífero está relacionada à presença de fraturas e/ou outras descontinuidades (diáclases), resultantes de esforços exercidos sobre as rochas e dos processos de dissolução mais ou menos intensos, capazes de gerar verdadeiros “rios” e “cavernas” subterrâneas, onde a água percola com sua ação solvente e se armazena localmente.

Além dos aquíferos, outras camadas ou corpos rochosos apresentam funções significativas na dinâmica da água subterrânea, como os *aquicludes* e *aquitardes*. A palavra Aquiclude é definido por Manoel Filho (2008) como uma formação que pode conter água, mas é incapaz de transmiti-la em condições naturais.

Já Rebouças et al. (2006) afirmam que os *aquicludes* são camadas ou corpos de rochas que apresentam porosidade específica e permeabilidade praticamente nula, como as camadas de sedimentos argilosos, folhelhos e rochas compactas muito pouco fraturadas ou carstificadas.

O *aquitarde* corresponde a uma camada ou formação geológica de natureza relativamente impermeável. Rebouças, Feitosa e Demétrio (2006) entendem o *aquitarde,* como camadas ou corpos rochosos que apresentam porosidade específica e permeabilidade relativamente baixa, tais como sedimentos argilosos, sistemas cársticos pouco desenvolvidos, argilas arenosas e areias argilosas.

## 2.3 Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto

A evolução do conceito de SIG está relacionada a diferentes áreas de pesquisa que contribuíram para seu desenvolvimento, como a informática, que trabalha com ferramentas de banco de dados ou programação; e a geociências, que o relaciona a mapas.

Bonham-Carter (1994), por exemplo, afirma que o Sistema de Informações Geográficas é um sistema computacional para gerenciamento de dados espaciais, e o reconhece como ferramenta computacional para manipulação de mapas, imagens digitais e tabelas de dados geocodificados.

Burrough e MacDonnell (2000) consideram o SIG um poderoso conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e exibição de dados espaciais do mundo real para um conjunto de finalidades específicas. Esta definição trata o SIG como uma caixa de ferramentas computacionais.

Silva (2003) afirma que os SIGs são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui o ferramental necessário para realização de análises com dados espaciais, e oferece alternativas para o entendimento da ocupação e utilização do meio físico, compondo o chamado universo da Geotecnologia, ao lado do Processamento Digital de Imagens (PDI) e da Geoestatística. Esta definição envolve, além do ferramental proporcionado pelo SIG, também sua participação num universo maior, o das Geotecnologias.

Assim, tecnologias da Geoinformação podem ser entendidas como o conjunto de procedimentos e técnicas voltadas à coleta, tratamento e análise de dados espaciais com um determinado objetivo.

O Sistema de Informações Geográficas possui funções importantes, como a construção de um banco de dados com informações georreferenciadas necessárias ao desenvolvimento de determinada pesquisa, bem como a representação destas informações a partir de mapas, tabelas e relatórios. As funções de SIG podem ser divididas, basicamente, em consulta, reclassificação, análise de contiguidade, modelos digitais de elevação, operações algébricas não cumulativas e operações cumulativas (SILVA, 2003).

Em termos de álgebra cumulativa, as funções do SIG podem gerar novos mapas a partir de combinações matemáticas, como adição, multiplicação e

subtração. Estes mapas, derivados de operações algébricas cumulativas, são denominados de mapas fundidos.

Dentre as funções básicas dos SIGs, destacam-se a reclassificação e análise de contiguidade. A reclassificação consiste basicamente na produção de informações espaciais de determinado banco de dados por distintos usuários, que têm, como objetivo, utilizar estas informações em seus diferentes interesses.

Segundo Silva (2003, p. 170),

> A análise de contiguidade refere-se aos procedimentos matemáticos envolvendo o atributo de um determinado pixel e os atributos dos pixels imediatamente vizinhos. E, para produzir superfícies contínuas a partir de dados pontuais, determinados tratamentos matemáticos são necessários para a exportação de suas características não espaciais, para além de sua área de abrangência. Para isso, é importante selecionar métodos adequados de interpolação.

Dentre os principais métodos de interpolação (Quadro 2.2), destacam-se: inverso do quadrado da distância, *krigagem*, curvatura mínima, métodos multiquadráticos e triangulação de Delaunay.

Quadro 2.2. Principais métodos de interpolação e suas descrições.

| **Métodos de Interpolação** | **Descrição** |
|---|---|
| Inverso do quadrado da distância | Os dados pontuais são ponderados durante a interpolação de tal forma que a influência de um determinado dado pontual em relação a outro diminui com a distância. |
| *Krigagem* | Basicamente, estima o valor de uma posição pontual conhecida, baseando-se na ponderação de todas as amostras disponíveis. |
| Curvatura mínima | Gera uma superfície, a mais suave possível, e nem sempre seus dados são tomados como verdadeira grandeza. |
| Métodos multiquadráticos | Produzem superfícies bastante suavizadas e correspondem a interpoladores exatos, e normalmente são considerados os melhores métodos de interpolação. |
| Triangulação de Delaunay | Método de interpolação exata, baseia-se em um algoritmo que cria triângulos através da ligação de pontos. |

Fonte: Silva (2003).

A execução da modelagem espacial requer a existência de uma base de dados cartográficos, que nem sempre está disponível, necessitando, muitas vezes,

de uma etapa de aquisição de dados. Desta forma, o Sensoriamento Remoto é, atualmente, uma das principais fontes de dados cartográficos.

O Sensoriamento Remoto consiste num conjunto de ferramentas aplicadas na aquisição de dados e informações sobre a superfície terrestre a determinada distância e sem contato direto com os objetos presentes, nesta superfície.

Para Novo (2008, p. 4),

> O Sensoriamento Remoto é a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outros plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície do planeta Terra a partir do registro e das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas diversas manifestações.

Logo, Jensen (2009), considera o Sensoriamento Remoto a arte ou ciência de obter informações sobre um objeto sem estar em contato físico direto com o mesmo, e pode ser usado para medir e monitorar importantes características biofísicas e atividades humanas na Terra.

A energia eletromagnética emitida, sobretudo pelo sol, interage com os diversos componentes da superfície terrestre, dando origem a fenômenos como reflexão, absorção e transmissão, importantes nos estudos de Sensoriamento Remoto.

As imagens de satélite permitem a análise de áreas extensas e a identificação de características geológicas importantes para o estudo da água subterrânea, como os tipos litológicos e os lineamentos estruturais.

Para Filho e Fonseca (2009, p. 3151),

> A utilização de imagens obtidas por sensores orbitais ópticos tem sido fundamental em estudos que envolvem a identificação de lineamentos estruturais. Com base em dados ópticos, há a possibilidade de associação entre feições do relevo e áreas de sombra, devido ao azimute de iluminação solar e aos demais elementos da cena indicativos de lineamentos estruturais.

A aplicação de técnicas de processamento digital de imagens, o sombreamento do relevo, permite a identificação e extração dos lineamentos estruturais, visando posterior análise em SIG. Além deste, há outros

processamentos que auxiliam no desenvolvimento de estudo espacial de águas subterrâneas, como a filtragem, o realce de contraste e a classificação supervisionada.

O sombreamento é uma das técnicas de representação do relevo, gerada a partir de elementos quantitativos do Modelo Digital do Terreno, como: curvas de nível, pontos cotados etc. A geração do sombreamento considera a existência de uma fonte imaginária de iluminação (iluminação oblíqua) solar, que cria a sombra e fornece um ótimo efeito tridimensional (DECANINI, 2009). Esta técnica auxilia a identificação dos lineamentos estruturais presentes na superfície terrestre durante a fase de interpretação.

### *2.3.1 Modelagem em Sistema de Informações Geográficas*

Uma das aplicações dos SIGs consiste em relacionar dados espaciais de diversas fontes, a fim de descrever e analisar possíveis interações, fazer previsões com modelos e fornecer apoio aos gestores e tomadores de decisões.

Para Christofoletti (1999), a modelagem constitui-se em um importante instrumento para analisar as características e investigar mudanças nos sistemas ambientais. Na construção de modelos, faz-se necessário considerar aspectos envolvidos com as características e funções que, por vezes, se relacionam. Tais aspectos permitem identificar e avaliar a qualidade dos modelos oferecidos, criando, assim, exigências para com o cuidado que se deve aplicar na modelagem.

A modelagem espacial compreende as seguintes etapas básicas:

- Determinar o objetivo da análise, diante da compreensão do fenômeno espacial;
- Identificação dos dados espaciais disponíveis e importantes para o estudo;
- Exploração da análise com apresentação visual dos dados em mapas, para reconhecimento dos diferentes padrões nos fenômenos.

Para a classificação de modelos em Sistema de Informações Geográficas, segundo Bonham-Carter (1994), é importante a distinção entre três tipos de modelos baseados no tipo de relação que representam, como: o teórico, híbrido e empírico. Na classe teórica, o tipo de combinação é sustentado através de princípios físicos/químicos, e utiliza equações de movimento, que é aplicado na determinação de fluxo subterrâneo. A classe híbrida compõe-se de modelos semiempíricos,

utilizados, principalmente na simulação de sedimentação e estabilidade de taludes. Já os modelos empíricos, baseiam-se em combinações estatísticas ou heurísticas, e têm como exemplo, os modelos de previsão de potencial mineral.

Assim, um modelo de SIG pode ser entendido como uma combinação de conjunto de mapas de entrada com a função (***f***) de produzir um mapa de saída (BONHAM-CARTER,1994).

**Mapa de saída= *f* (2 ou mais mapas de entrada)**

A função *f* apresenta diferentes formas. A integração expressa na função é baseada tanto pelo entendimento teórico, como pelos princípios físicos e químicos ou no empirismo, constatados a partir da observação de dados ou em alguma relação da teoria com o empirismo.

Os métodos baseados em modelos empíricos subjetivos utilizam regras e valores de pesos estabelecidos subjetivamente, a partir do conhecimento do processo envolvido, e têm por objetivo, estimar a importância relativa dos mapas de entrada. Dentre esses métodos, podem-se destacar os modelos gerados a partir de Operadores Booleanos, de Índice de Sobreposição e de Lógica Fuzzy.

Quanto ao modelo Booleano este consiste na combinação de diversos mapas binários, em cada posição x, y, para gerar um mapa final, sendo que a classe 1 representa as áreas que satisfazem às condições estabelecidas, e a classe 0 indica o restante das áreas que não satisfazem às condições determinadas, ou seja, a função de pertinência é definida como verdadeira (1) ou falsa (0).

Dessa forma, observa-se que a Lógica Fuzzy difere-se da Lógica Booleana por permitir a utilização de um intervalo entre os limites 0 e 1, e não apenas os valores 0 ou 1. Possibilita que níveis de incerteza sejam tratados, pois estabelece um grau de verdade (pertinência) sobre a condição determinada como sendo parcialmente falsa ou verdadeira. Logo, elementos próximos ao conceito principal têm valores de pertinência próximos de 1; e os que estão distantes, apresentam valores próximos de 0.

O Índice de Sobreposição consiste na interação dos mapas (soma) a partir de uma combinação de pesos. São utilizados mapas multiclasses, onde, para cada classe, é atribuída uma pontuação, possibilitando uma ponderação mais flexível.

Já os modelos de Índices de Sobreposição apresentam uma combinação de mapas mais flexível do que os Operadores Booleanos. As tabelas de pontuação e os pesos dos mapas podem ser ajustados para refletir o julgamento do especialista no domínio da aplicação em causa (BONHAM-CARTER,1994).

Dentre as modelagens realizadas em ambiente SIG para estudos hidrogeológicos, destaca-se a modelagem baseada no conhecimento, que consiste na seleção com base no conhecimento empírico dos fatores que influenciam na ocorrência do fenômeno estudado, análise dos fatores com atribuição de pesos e cargas aos critérios utilizados, a partir de regras ou métodos que auxiliem nesta decisão. Logo, as regras de decisão quanto ao relacionamento espacial entre os diferentes fatores e suas respectivas influências no fenômeno estudado constituem a essência da modelagem baseada no conhecimento (GOMES, 2008).

#### 2.3.1.1 Aplicações em Estudos Hidrogeológicos

Os SIGs possuem funções de consulta, manipulação e análise espacial de dados geográficos, que permitem a realização de simulações (modelagem) sobre os fenômenos do mundo real e suas características. Assim, os SIGs apresentam um papel importante na análise de problemas de decisão multicriterial.

O uso do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informações Geográficas tem-se revelado claramente aplicáveis na integração e análise de diferentes mapas temáticos, para a delimitação de zonas potenciais de ocorrência de águas subterrâneas (KRISHNAMURTHY et al., 1996).

Nos seus trabalhos para a definição de áreas potenciais de ocorrência de água subterrânea, utilizando Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas, Musa et al. (2000) propõe uma modificação no método DRASTIC (ALLER et al., 1987), que consiste na substituição dos parâmetros presentes neste modelo por outros determinantes para a ocorrência da água subterrânea. Os parâmetros utilizados foram: precipitação anual, uso e cobertura do solo, tipo de solo, elevação, declividade, densidade de drenagem, litologia e densidade de lineamentos. Para tais parâmetros foram estabelecidos pesos e cargas para suas diferentes classes, com o auxílio do Método Analítico Hierárquico.

A equação gerada a partir da modificação do modelo DRASTIC, de acordo com Musa et al. (2000), para a análise de zonas potenciais de água subterrânea, é desenvolvida da seguinte forma em Ambiente SIG, através da álgebra de mapas:

**GP= Rf+Lt+Ld+Lu+Te+Ss+Dd+St**

Onde:

GP: modelo de potencial da água subterrânea

Rf: carga da precipitação anual

Lt: carga da litologia

Ld: carga de densidade de lineamentos

Lu:carga de uso do solo

Te: carga elevação topográfica

Ss: carga da declividade

Dd:carga da densidade de drenagem

St: carga do tipo do solo

A avaliação geral e criação do modelo final de potencial de ocorrência de águas subterrâneas consistem na classificação das áreas em 05 categorias de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

As técnicas de Sensoriamento Remoto e o Sistema de Informações Geográficas têm auxiliado frequentemente a cartografia hidrogeológica, tornando esta uma ferramenta indispensável para o planejamento do uso das águas subterrâneas. A interpretação e ou tratamento estatístico de feições estruturais lineares ou fotolineamentos (identificados na imagem de satélite) permitem, por exemplo, a definição de áreas potenciais à pesquisa posterior de detalhe, objetivando a locação de poços em aquíferos descontínuos (FILHO e FONSECA, 2009).

Desse modo, a caracterização do potencial aquífero é determinada por fatores geológicos, relacionados com o clima, o relevo e o solo. A associação destes fatores definem regiões com o mesmo potencial de armazenamento, circulação e qualidade das águas (GOIÁS, 2006).

Gonçalves et al. (2007) desenvolveram uma metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos, a partir do estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, Distrito Federal, Brasil. Neste trabalho, foram utilizados parâmetros como: geologia, uso do solo, declividade, solos, dados hidrodinâmicos e lineamentos. Em

seguida, realizou-se a integração dos dados em ambiente SIG, onde cada plano de informação foi ponderado de acordo com a sua influência na capacidade de infiltração da água.

O método utilizado para a análise dos resultados consiste na análise combinatória da soma dos pesos das classes, diferenciadas por fatores numéricos e decimais. O mapa resultante foi dividido em 05 classes de potencial de infiltração e recarga da bacia: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

A utilização das diversas funções do SIG e a análise integrada de estudos temáticos permitiram a caracterização de um cenário hidrogeológico para a Folha de Irauçuba, no trabalho desenvolvido por Brandão e Gomes (2003). O objetivo da pesquisa foi elaborar um mapa de favorabilidade de ocorrência de água subterrânea, a partir da integração e correlação, dos dados de poços produtores, dados lito-estruturais, produtos temáticos originados de imagens de satélite e radar, e de aspectos geoambientais.

As variáveis de cada tema foram classificadas (hierarquizadas), de acordo com a sua contribuição para a percolação e armazenamento de água subterrânea. Por álgebra de mapas, os dados foram processados, sendo aplicados operadores de soma ponderada aos mapas temáticos, resultando no mapa de potencial hidrogeológico da Folha Irauçuba.

## 2.4 Método Analítico Hierárquico (AHP)

A avaliação multicriterial oferece diversas técnicas e procedimentos que possibilitam revelar as preferências dos decisores, integrando estas às tomadas de decisões, com base em Sistema de Informações Geográficas.

O Método Analítico Hieráquico ou Processo Analítico Hierárquico consiste em um método de análise multicriterial desenvolvido por Satty, na década de 1970. Esse corresponde a uma metodologia flexível e eficaz de tomada de decisão, que auxilia na definição de preferências e na escolha da alternativa, quando aspectos qualitativos e quantitativos devem ser ponderados.

O AHP consiste na tomada de decisão com múltiplos critérios, onde o problema apresenta uma hierarquia de solução, a partir das variáveis que serão trabalhadas na resolução do problema. A hierarquização permite a criação de um

modelo da realidade e visualização da interação dos componentes que, separados em níveis, garantem segurança e flexibilidade.

A modelagem baseada no conhecimento implica na atribuição de pesos aos critérios, muitas vezes, de forma subjetiva. Para tornar mais criteriosa a aplicação de ponderadores aos fatores, utiliza-se métodos específicos, dentre eles o AHP.

Segundo Baraças e Machado (2006, p. 3),

> [...] este método permite classificar as partes ou variáveis segundo uma ordem hierárquica, atribuir valores numéricos aos julgamentos subjetivos à importância relativa de cada variável e sintetizar os julgamentos a fim de determinar as variáveis que têm maior ou menor prioridade sobre os outros, por forma a agir de maneira mais conveniente para atingir a decisão.

Assim, os elementos que fazem parte da hierarquia devem ser organizados de maneira descendente, em que o objetivo principal da pesquisa deve estar no primeiro nível da hierarquia; num nível abaixo, os critérios; em seguida, as alternativas (Figura 2.4).

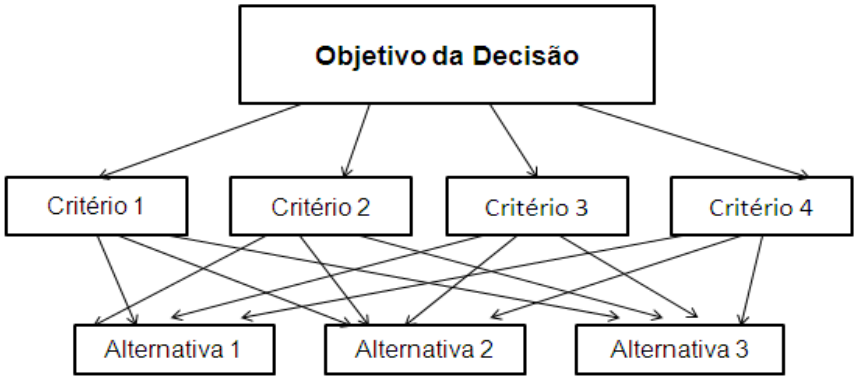



Figura 2.4: Estrutura de decisão hierárquica em três níveis.

Fonte: Baraças e Machado (2006).

O método de análise hierárquica, ou método analítico hierárquico, é baseado na construção de uma série de matrizes (Tabela 2.1) de “pares de comparação”, que comparam com todos os critérios entre si. Isto é feito para estimar os pesos de cada um desses, descrevendo o quanto o mesmo está contribuindo para atingir o objetivo geral do estudo.

Para Samizava (2008), o método AHP baseia-se na comparação pareada das variáveis, no qual os julgamentos são realizados considerando-se o grau de importância relativa entre os fatores. Este autor também comenta que a análise multicriterial, utilizando o AHP, reduz a subjetividade, já que está relacionada com o conhecimento empírico do usuário, ao atribuir valores de importância relativa entre as variáveis na matriz de comparação pareada.

Logo, os componentes das matrizes podem ser avaliados de acordo com seu grau de importância dentro da hierarquia estabelecida, sabendo-se que cada elemento revela quanto o critério da coluna esquerda é mais importante em relação àquele correspondente com a linha superior, portanto, quando um critério é avaliado com si próprio, o único resultado possível é 1.

A consistência da matriz é calculada a partir da Razão de Consistência (CR), que mede quanto os valores de comparação entre os fatores foram gerados aleatoriamente. Se o CR for maior que 0,1, os julgamentos, ou seja, os valores de comparação atribuídos na construção da matriz, não são confiáveis. Logo, recomenda-se a reorganização da matriz, alterando os valores de comparação entre os fatores.

Tabela 2.1. Matriz de comparação dos critérios.

**CRITÉRIOS**

**CRITÉRIOS**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $G_{1\,2}$ | $G_{1\,3}$ | ..... | $G_{1\,j}$ |
| $1/G_{1\,2}$ | 1 | $G_{2\,3}$ | ..... | $G_{2\,j}$ |
| $1/G_{1\,3}$ | $1/G_{2\,3}$ | 1 | ..... | $G_{3\,j}$ |
| ..... | ..... | ..... | 1 | ..... |
| $1/G_{1\,j}$ | $1/G_{2\,j}$ | $1/G_{3\,j}$ | ..... | 1 |

Fonte: Adaptado de THIRUMALAIVASAN, 2001.

As matrizes de comparação são traduzidas de uma linguagem verbal para a numérica, através da Escala Fundamental de Satty, descrita no quadro 2.3:

Quadro 2.3. Escala Fundamental de Satty.

| Importância | Definição | Explicação |
|---|---|---|
| 1 | Igual importância | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo |
| 3 | Importância pequena | O julgamento favorece levemente uma atividade em relação à outra |
| 5 | Importância grande ou essencial | O julgamento favorece fortemente uma atividade em relação à outra |
| 7 | Importância muito grande | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra |
| 9 | Importância absoluta | A evidência favorece uma atividade em relação à outra |
| 2,4,6,8 | Valores Intermediários | Quando há uma condição de compromisso entre as duas definições |

Fonte: Adaptado de SATTY, 1990.

## 2.5 Vulnerabilidade e Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas

Os aquíferos encontram-se sob perigo de contaminação devido aos processos de urbanização, de desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e da exploração mineral.

Segundo Foster et al. (2002), a utilização do conceito de vulnerabilidade teve início na década de 70 na França, com Albinet e Margat (1970), sendo utilizado de maneira mais ampla, na década de 1980 (FOSTER e HIRATA, 1993; ALLER et al.,1987).

A vulnerabilidade das águas subterrâneas corresponde à capacidade das características litológicas e hidrodinâmicas do aquífero, de impedir determinados impactos naturais ou antrópicos, como também pode ser definida, segundo Ribeira (2004), por uma série de atributos ou características do meio aquífero (tal qual o solo, a zona não saturada, os parâmetros hidráulicos do aquífero e a recarga) que controlam sua habilidade de resistir a determinado impacto e capacidade de autorrestauração.

Para Hirata e Fernandes (2008, p. 405),

> a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação pode ser definida em função de um conjunto de características

> físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou aquitarde confinante que, juntas, controlam a chegada do contaminante ao aquíferos.

Foster (1987 *apud* FOSTER e SKINNER, 1995) considera a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, como um conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua susceptibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície.

Desta forma, entende-se que o perigo de contaminação corresponde à possibilidade das águas subterrâneas sofrerem impactos negativos consequentes de determinadas atividades humanas, a tal nível que a água torna-se imprópria para o consumo humano, segundo os níveis de concentrações estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Tal periculosidade trata da interação entre a vulnerabilidade natural da água subterrânea com a carga contaminante que é, será ou poderá ser aplicada por determinadas atividades humanas (FOSTER et al., 2002).

O conceito de perigo de contaminação das águas subterrâneas difere-se do risco, pois este último consiste na relação do perigo com a escala de impacto na vida humana, nos ecossistemas e no valor econômico dos recursos hídricos.

A avaliação do perigo de contaminação envolve a interação do mapa de vulnerabilidade com as atividades potenciais de gerar carga contaminante. As áreas que apresentam alta vulnerabilidade e a presença de atividades capazes de gerar carga contaminante representam as situações mais preocupantes. Desta forma, ao determinar o perigo de contaminação, torna-se necessário  a proteção e gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que permite identificar as atividades potencialmente contaminantes, indicando ações necessárias para evitar e controlar possíveis contaminações.

### *2.5.1 Métodos de Cartografia de Vulnerabilidade*

As metodologias de determinação da vulnerabilidade de aquíferos são atualmente utilizadas como ferramenta de auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas, associadas a atividades de gestão dos recursos hídricos e de planejamento e ordenamento territorial.

Diversos métodos são utilizados na determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Entre esses, os principais são: DRASTIC, GOD, TPE, Poluição dos Lençóis Aquíferos, Mapa de Vulnerabilidade dentre outros (HIRATA e REBOUÇAS, 2001). Existem também, adaptações dos métodos citados como o DRATLu (FRANCÊS et al., 2001), que corresponde a uma adaptação do DRASTIC (Aller et al., 1987), e o GODS (CUSTODIO,1995), que trata de uma adaptação do método GOD (FOSTER e HIRATA, 1993).

O método Poluição dos Lençóis Aquíferos criado por Taltasse (1972) avalia a vulnerabilidade desses por fatores geológicos: estrutura e litologia.

O método TPE (SILVA et al., 1980) avalia as áreas com perigo de contaminação com os seguintes parâmetros: velocidade da água subterrânea; porcentagem de argila; atividade potencialmente contaminante; exploração dos aquíferos. Já o método Mapa de Vulnerabilidade desenvolvido por Duarte (1980), avalia a vulnerabilidade geral a partir dos seguintes fatores: características litológicas e área de recarga e descarga.

Dos métodos citados, dois se destacam na determinação da vulnerabilidade: o método “GOD”, que engloba a vulnerabilidade em geral (FOSTER e HIRATA, 1993); e o método DRASTIC (ALLER et al., 1987).

O DRASTIC foi desenvolvido pela *National Ground Water Association*, e empregado pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana na avaliação do potencial de poluição das águas subterrâneas, utilizando variáveis hidrogeológicas da área de estudo.

Entende-se que essas variáveis relacionam-se através de uma equação, aplicada à unidade geográfica da pesquisa. O ambiente hidrogeológico inclui os principais aspectos geológicos e do meio aquífero, sendo que, para cada aspecto, confere-se um peso, que está associado à sua relevância na avaliação do potencial de vulnerabilidade. O quadro 2.4 ilustra os fatores DRASTIC, e seus respectivos pesos.

Os fatores DRASTIC são divididos em faixas com variação de 1 a 10, sendo que valores próximos a 10 revelam o potencial de vulnerabilidade à contaminação da área de estudo.

Quadro 2.4. Fatores DRASTIC e seus pesos.

| Fatores | Pesos |
|---|---|
| **D-** Depth to Water (Profundidade da água subterrânea); | 5 |
| **R**- Net Recharge (Recarga) | 4 |
| **A**- Aquifer Media (Meio Aquifero); | 3 |
| **S-** Soil Media ( Meio do solo); | 2 |
| **T**- Topography (Topografia); | 1 |
| **I-** Impact (Material) of Vadose Zone ( Impacto da Zona Insaturada); | 5 |
| **C-** Hidraulic Condutivity (Condutividade Hidráulica). | 3 |

Fonte: ALLER et al., 1987

Os fatores DRASTIC são descritos da seguinte forma:

- **Profundidade da água subterrânea (D):** a profundidade da superfície freática está relacionada com a percolação de determinado contaminante pela água.

- **Recarga (R):** representa a quantidade de água por unidade de área que penetra na superfície terrestre e alimenta o aquífero.

**- Meio Aquífero (A):** é definido a partir das unidades geológicas e hidrogeológicas, que podem ser associadas aos tipos de aquíferos.

**- Meio do Solo(S):** apresenta significativa importância, no que diz respeito à quantidade de água que infiltra no subsolo. Pode ser obtido a partir de dados existentes ou de caracterização das rochas.

**- Topografia (T):** refere-se à variação da declividade da superfície terrestre, sendo identificada a partir do Modelo Digital do Terreno que atribui a classes de declividade. Apesar de ter peso 1 para o modelo DRASTIC, a declividade é um fator importante para a recarga de aquíferos, pois, em percentuais menores, a intensidade do processo de infiltração é maior.

**- Impacto (Material) da Zona Insaturada (I):** parte do terreno que está parcialmente preenchida por água.

**- Condutividade Hidráulica(C):** capacidade do aquífero de transmitir a água. É obtida a partir de testes de bombeamento dos poços.

Os fatores são avaliados entre si a partir da seguinte equação:

**DRASTIC= DpDc+ RpRc+ ApAc+ SpSc+ TpTc+IpIc+ CpCc**

Onde: Dp,Rp,Ap,Sp,Tp,Ip e Cp, correspondem aos pesos dos fatores DRASTIC.

Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic e Cc, correspondem ao fator de carga dos parâmetros analisados.

Os mapas de vulnerabilidade de aquíferos apresentam limitações devido à falta de informações e dados necessários à aplicação de metodologias detalhistas. Assim, quando há escassez de dados, e esses apresentam incertezas ou não abrangem completamente o território, a aplicação do DRASTIC torna-se comprometedora.

Segundo Foster e Hirata (1993, p.68),

> [...] os componentes da vulnerabilidade não são diretamente mensuráveis, mas sim a partir da combinação de diversos fatores. Os dados relacionados com a maioria destes fatores geralmente não estão disponíveis, mas podem ser estimados facilmente.

Portanto, caso a definição dos parâmetros se baseie naqueles disponíveis ou facilmente coletáveis, logo, sugerem-se a redução da lista de parâmetros, utilizando àqueles que estão descritos no quadro 2.5.

Quadro 2.5. Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

| **Componente da Vulnerabilidade** | **Informação Hidrogeológica** | |
|---|---|---|
| | **Idealmente requerida** | **Normalmente Disponível** |
| Inacessibilidade Hidráulica | - Grau de confinamento do aquífero<br>- Profundidade da água subterrânea<br>- Teor de umidade da zona não saturada<br>- Condutividade Hidráulica vertical dos estratos da zona não saturada das camadas confinantes | - Tipo do aquífero<br>- Profundidade da água subterrânea |
| Capacidade de Atenuação | - Distribuição do tamanho dos grãos e fissuras da zona não saturada das camadas confinantes<br>- Mineralogia dos estratos da zona não saturada ou camadas confinantes | - Grau de consolidação/fissuração dos estratos<br>- Características litológicas dos estratos |

Fonte: Foster et al., 2002

Logo, uma alternativa para a aplicação e indexação destes parâmetros é a utilização do método GOD (Quadro 2.6). Este corresponde a uma das técnicas de determinação de vulnerabilidade mais utilizadas, devido à 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.

Quadro 2.6. Parâmetros considerados no método GOD

| Parâmetro | Descrição |
|---|---|
| *G(Groundwater hidraulic confinement)* | Grau de confinamento do aquífero (surgente, confinado, semiconfinado, não confinado, nenhum) |
| *Overlying Strata(vadose zone or confining beds)* | Substrato litológico - caracterização do aquífero quanto ao seu grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes e natureza litológica |
| *Depth to groundwater table* | Distância da água - profundidade do lençol freático (aquífero não-confinado) ou teto do aquífero (confinado) |

Fonte: Foster et al., 2002.

### *2.5.2 Fontes Potenciais de Contaminação de Águas Subterrâneas*

Diversas atividades humanas apresentam perigo de contaminação das águas subterrâneas, como as atividades agrícolas, industriais, de exploração mineral, a urbanização, as quais são potenciais fontes de contaminação. Tais fontes são classificadas em pontuais e difusas ou dispersas. As primeiras caracterizam-se pela localização “pontual” e de fácil identificação, como os tanques de combustíveis enterrados, efluentes industriais não tratados, beneficiamento agrícola e mineral, lixiviação de aterros sanitários etc. Já as fontes difusas ou dispersas apresentam distribuição espacial irregular na área de estudo, formada por diferentes fontes menores, tais como os vazamentos de tubulações de esgoto, inexistência de saneamento básico, lagoas de efluentes, vazamento de tubulações e tanques industriais.

Nas áreas urbanas, há um número significativo de atividades potencialmente contaminantes, sendo que, a principal preocupação é a carga contaminante no

subsolo associada com saneamento sem rede de esgoto, como fossas sépticas em áreas residenciais com rede de ligação incompleta ou inexistente (FOSTER e HIRATA, 1993).

As práticas inadequadas de manejo do solo, como algumas práticas de seu uso podem causar a contaminação das águas subterrâneas, com taxas elevadas de nitrato no cultivo da soja, milho, arroz etc.

Com relação às atividades industriais, devido à sua extrema diversidade e aos obstáculos para se obter informações sobre os processos, há uma maior dificuldade em se estimar a carga poluidora. Geralmente, é possível estimar o volume do efluente gerado por determinada atividade, a partir da quantidade de água utilizada. Entretanto, é difícil estabelecer a proporção do total do efluente que está sendo infiltrado no subsolo (FOSTER e HIRATA, 1993).

Uma forma simples de classificar as fontes potenciais de contaminação é a aplicação do método *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically (POSH)* proposta por Foster et al. (2002). Esta metodologia permite a classificação das fontes potenciais de contaminação em três níveis: reduzido, moderado e elevado. Tal distribuição considera o tipo de atividade, sua capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada.

## 2.6 Metodologia GOD

O desenvolvimento do método **GOD** se dá a partir dos seguintes fatores: confinamento do aquífero(G); natureza composicional da zona não saturada e/ou aquitarde e seu grau de fraturamento (O); profundidade do nível d'água ou da base confinante do aquífero(D).

Este método aplica constantes entre 0 e 1 para cada variável e o produto entre essas variáveis determina o índice de vulnerabilidade, sendo que, todos os parâmetros apresentam o mesmo peso de importância sobre o índice final. A estimativa de vulnerabilidade de aquíferos a contaminação pela metodologia GOD envolve as seguintes etapas (FOSTER et al., 2002):

- Identificar o tipo de confinamento da água subterrânea, com posterior indexação do parâmetro no intervalo de 0,0-1,0;

- Especificar os estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de grau de consolidação, levando-se em consideração a possível presença ou ausência de permeabilidade por fissuras e tipos litológicos, relacionada indiretamente com a porosidade efetiva, permeabilidade da matriz rochosa e o teor de umidade da zona não saturada, assinalando-se uma segunda pontuação com intervalos de valores entre 0,4-1,0.
- Estimar a profundidade até o nível freático (de aquíferos não confinado) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação entre os intervalos 0,6-1,0.

A equação que define o índice de vulnerabilidade é representada da seguinte forma:

**Índice de Vulnerabilidade GOD= Gi * Oi * Di**

Onde, **G O D** correspondem aos parâmetros e o **i** ao índice de classificação de cada parâmetro. A Figura 2.5 apresenta o esquema de avaliação utilizado na estimativa da vulnerabilidade de aquíferos.

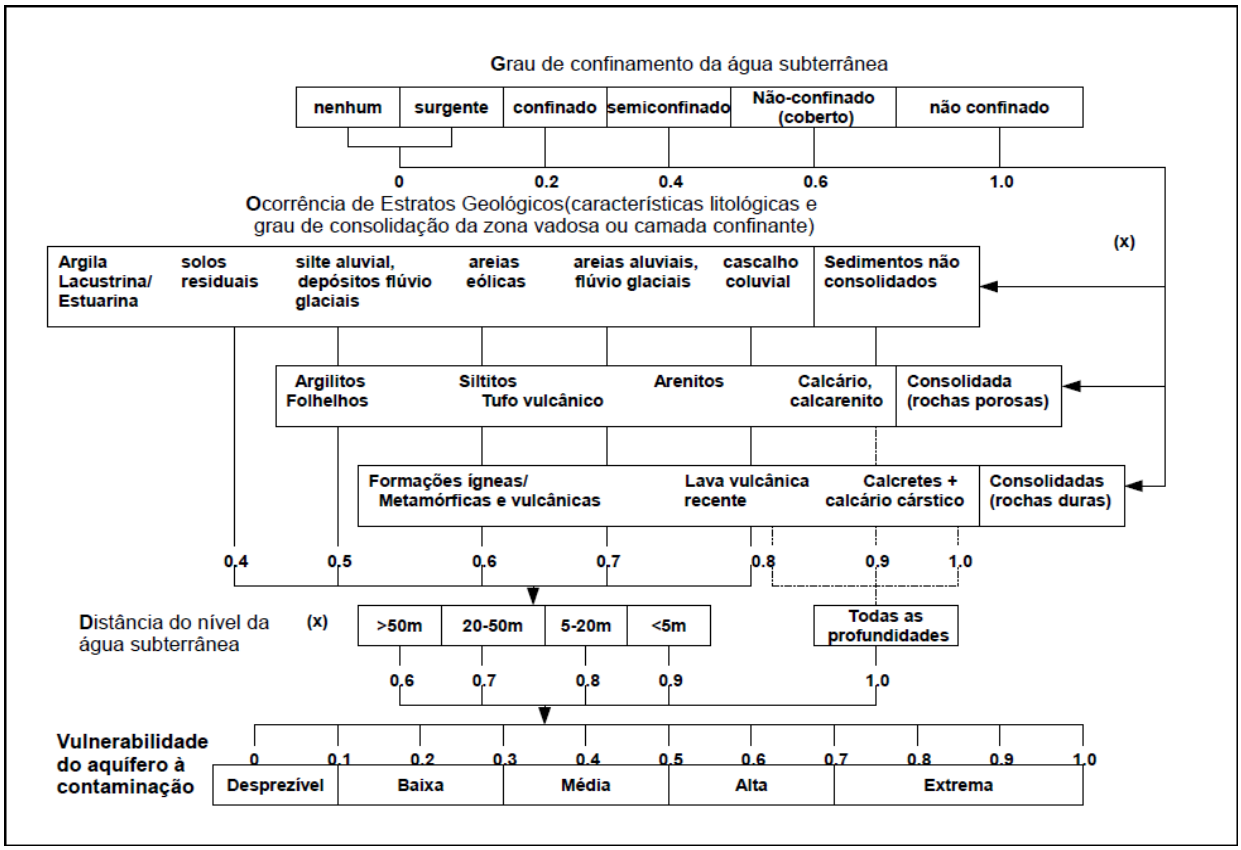



Figura 2.5. Sistema GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero (FOSTER et al., 2002).

As classes de vulnerabilidade de aquíferos variam de insignificante à extrema, sua nomenclatura apresenta definição específica, que reflete a sensibilidade natural dos aspectos hidrogeológicos observados no estudo. Assim, as definições de diferentes classes de vulnerabilidade são apresentadas no quadro 2.7

Quadro 2.7. Definição das classes de vulnerabilidade do aquíferos.

| CLASSES DE VULNERABILIDADE | DEFINIÇÃO CORRESPONDENTE |
|---|---|
| **Extrema** | Vulnerável a maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação |
| **Alta** | Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação |
| **Moderada** | Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados |
| **Baixa** | Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados |
| **Insignificante** | Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação). |

Fonte: Foster et al., 2002.

# 3 MODELAGEM DA POTENCIALIDADE HÍDRICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI

## 3.1 Introdução

A crescente utilização da água subterrânea revela a necessidade da realização de atividades destinadas à sua conservação, bem como a obtenção de informações sobre disponibilidade, escassez e qualidade.

O estudo dos aspectos hidrogeológicos das bacias hidrográficas são importantes para a caracterização, avaliação e planejamento do uso da água subterrânea, através da identificação de áreas prioritárias em termos de proteção ou exigências ambientais.

Para diversos pesquisadores, a utilização do Sistema de Informações Geográficas e as técnicas de Sensoriamento Remoto permitem o reconhecimento do cenário hidrogeológico e potencial de ocorrência de água subterrânea. Dentre os principais estudos, podemos destacar o desenvolvido por Musa et al. (2000) que propõe uma modificação do método de análise de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos denominado DRASTIC (ALLER et al., 1987), a partir da substituição dos parâmetros deste modelo por aqueles determinantes na ocorrência da água subterrânea, como também a metodologia desenvolvida por Gonçalves et al. (2007) para elaboração de mapas hidrogeológicos, a partir do estudo de caso de uma bacia hidrográfica, que utiliza os seguintes parâmetros: geologia, uso do solo, declividade, solos, dados hidrodinâmicos e lineamentos estruturais.

Desta forma, o presente capítulo tem por objetivo gerar um modelo de potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, a partir dos aspectos de superfície e subsuperfície importantes na ocorrência e armazenamento da água subterrânea, no uso de um método de análise hierárquica para auxiliar na definição dos pesos de cada critério. A modelagem da potencialidade hídrica das águas subterrâneas foi desenvolvida em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

## 3.2 Materiais e Método

### *3.2.1 Procedimentos Metodológicos*

O desenvolvimento da pesquisa apresenta fases de investigação que são determinantes para o levantamento e a geração de dados e informações, interpretação, integração e modelagem. A criação do modelo contempla 05 fases representadas no fluxograma metodológico (Figura 3.1):

1) Aquisição de imagens de satélite, MDT(Modelo Digital do Terreno), de dados vetoriais e analógicos;

2) Delimitação da área de estudo, digitalização, georreferenciamento e processamento de dados- compõe-se do processamento digital de imagens (de Sensoriamento Remoto e modelo digital de elevação). O processamento digital das imagens (PDI) tem por objetivo identificar e extrair lineamentos estruturais. As técnicas de PDI a serem utilizadas com esta finalidade são: combinação de bandas e sombreamento;

3) Construção da base dos dados no SIG- elaboração de *layers* temáticos;

4) Análise dos dados espaciais gerados- constituí-se da análise e interpretação dos dados gerados e, estabelecimento de cargas e pesos dos critérios com o auxílio do método analítico hierárquico;

5) Integração e Modelagem- refere-se a realização de álgebra e fusão de mapas para a geração do modelo.

As bases de dados utilizadas são descritas abaixo:

- **Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SEPLANTEC/SRH, 2004):** é composta por uma base cartográfica de layers temáticos, como do tipo de solo, geormorfologia, unidades de planejamento (delimitação das sub-bacias), bacias hidrográficas, hidrologia, poços tubulares, cotas, geologia, estações fluviométricas e pluviométricas, dentre outros, em diferentes escalas, que vai de 1:100.000 à 1: 2.500.000;
- **Programa Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste- Estado de Sergipe (CPRM/SEPLANTEC, 2002)**: é constituído por uma base com relatório de caracterização hidogeológica dos municípios do estado de Sergipe, que apresenta dados de poços de captação de água subterrânea, como: nível

estático e dinâmico, vazão e localização dos poços (coordenadas) e o tipo de aquíferos em que se encontram os poços (escala 1: 2.500.000).

- **Atlas de Qualidade da Água Subterrânea no Estado de Sergipe com Fins de Irrigação (Embrapa, 2007):** esta base apresenta dados quantitativos e qualitativos gerados, partindo da amostragem de poços de água subterrânea de todo o estado de Sergipe. Apresenta mapas vetoriais quantitativos como de profundidade, vazão, nível estático e dinâmico dos poços (escala 1: 2. 500.000). Em dados qualitativos**,** caracterizam-se em mapas dos seguintes parâmetros: amônia, cálcio, cloreto, ferro, magnésio, pH, sódio, sólidos dissolvidos, sulfato, condutividade elétrica e bicarbonato.

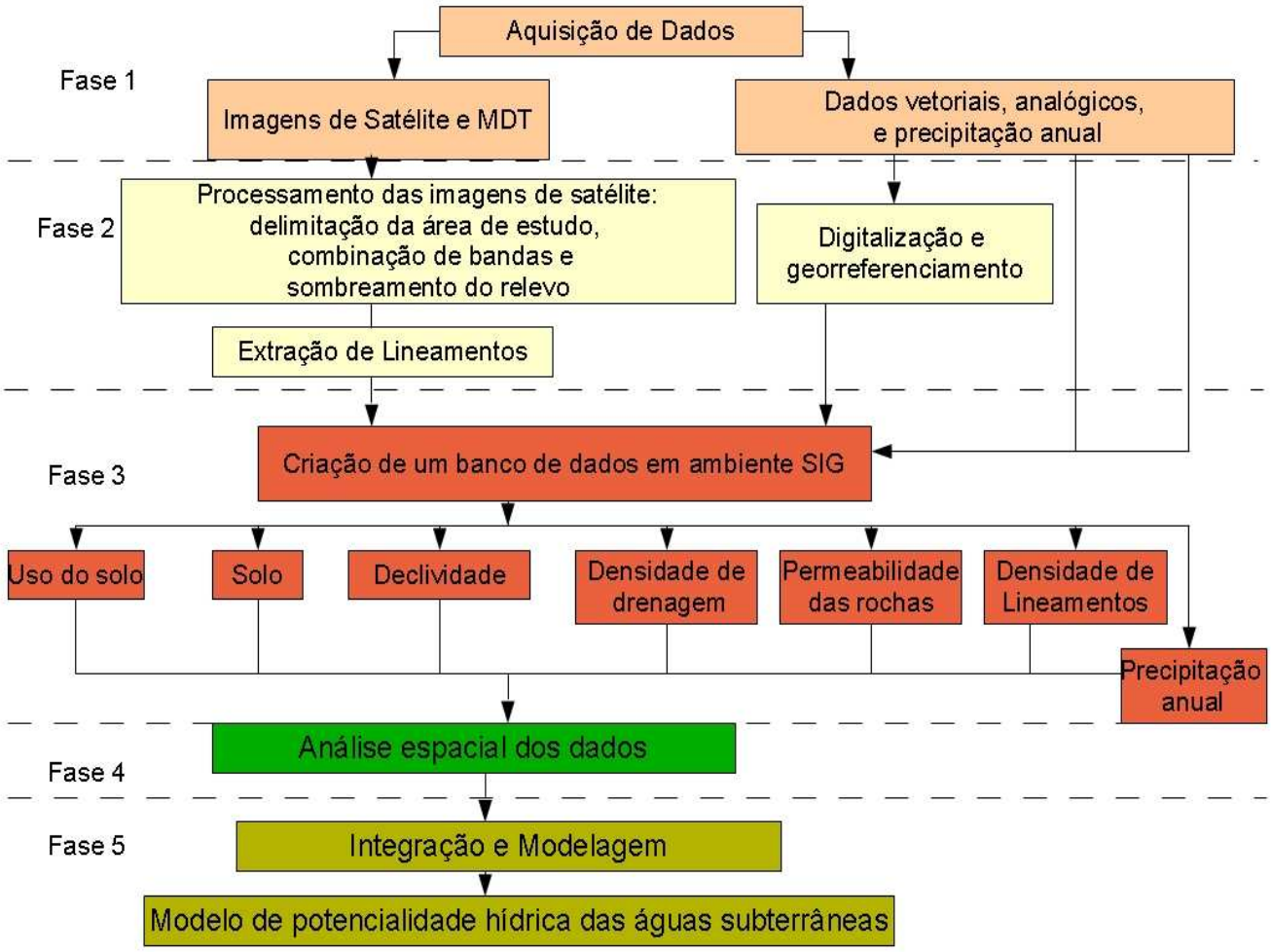



Figura 3.1. Fluxograma Metodológico

Consideram-se que os parâmetros utilizados na análise do potencial hídrico das águas subterrâneas foram definidos de acordo com seu grau de importância para a infiltração e armazenamento de água. Portanto, as suas relevâncias estão descritos no tópico "**Critérios para a Determinação da Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas"**. Assim, no desenvolvimento do modelo (mapa), o Método Analítico Hierárquico tem a função de auxiliar na definição dos pesos aos diferentes critérios determinados previamente para a elaboração do mapa.

#### 3.2.1.1 Elaboração do Mapa de Densidade de Lineamentos

Para a identificação e extração de lineamentos estruturais foram utilizadas técnicas de processamento digital como a combinação de bandas em imagens do satélite e sombreamento do relevo, a partir do Modelo Digital do Terreno. Foram utilizadas imagens do satélites Landsat 5 TM (data do imageamento: 03 de abril de 2009) e Landsat 7 ETM+ (data do imageamento: 07 de maio de 2001). Todas as imagens foram adquiridas gratuitamente pelo site do INPE.

O Modelo Digital do Terreno (produto gerado a partir de imagem do projeto SRTM-Shuttle Radar Topographic Mission da Nasa) da área de estudo foi obtido no site da Embrapa, através do projeto Brasil em Relevo (MIRANDA et al., 2010), que disponibiliza os dados pré-processados do projeto SRTM de todo território nacional, com resolução espacial de 90 metros.

Os principais critérios de identificação de lineamentos são as descontinuidades estruturais, os alinhamentos de escarpas e vales, traçados retilíneos da drenagem superficial, variações bruscas de litologias e densidade de drenagens relacionadas e padrões de vegetações orientadas, partindo-se de direções preferenciais.

Deste modo, o Modelo Digital do Terreno foi adicionado no banco de dados SIG e, diante da técnica *Hillshade* da ferramenta Spatial Analyst do ArcGis 9.3®, foram elaborados os mapas de relevo sombreado com diferentes fontes azimutais de iluminação a um ângulo de 45º. Os lineamentos identificados foram vetorizados e, para medir o azimute automaticamente de cada lineamento, foi utilizada a ferramenta *Calculate Field* (rotina polyline_GetAzimute.cal do pacote EasyCalculate50, disponível no site: http://www.ian-ko.com). A estatística das

principais direções foi realizada com o comando *Summarize* da tabela de atributos do shape (plano de informação), correspondente aos lineamentos.

Os fotolineamentos vetorizados a partir os mapas de relevo sombreado foram obtidos, inicialmente, em oito direções distintas de iluminantes (N, S, E, W, NE, NW, SE e SW), todos a um ângulo de 45º. A presença de nuvens nas imagens Landsat dificultou a identificação dos lineamentos em grande parte da área de estudo, como também a aplicação de outras técnicas de Sensoriamento Remoto (filtragens), devido às falsas interpretações que podem ser geradas na presença de nuvens, dentre outros fatores, como a mudança da cobertura vegetal e estradas.

Diante da imagem do satélite Landsat 5 TM foram feitas composições RGB, das bandas 3, 4 e 5. Já na imagem do Landsat 7 ETM+ fez-se uma análise da banda 8 (pan-cromática). Segundo Martini (2002), nos mapeamentos litológicos e estruturais são utilizadas preferencialmente a banda 8, com imagem em preto e branco, que corresponde à banda pancromátrica do visível do sensor Landsat ETM+. Assim, foi gerado um mapa contendo os lineamentos das imagens Landsat TM e ETM+ e outro do relevo sombreado. Em seguida, os dados dos dois mapas foram integrados para a geração do mapa final de fotolineamentos.

Os lineamentos foram traçados com base em cristas alinhadas, fundos de vales e drenagens, de acordo com a análise e interpretação do mapa de sombreamento gerado, sendo, logo após, refinado com a interpretação da imagem do satélite. A densidade dos fotolineamentos foi realizada com a ferramenta *LineDensity* do ArcGis 9.3®.

Os mapas de relevo sombreado mostraram-se mais adequados na identificação e análise dos lineamentos, uma vez que estes apresentam ausência de feições superficiais, como a cobertura da vegetação, mudança de cultivos e as estradas, que influenciam na interpretação. A aplicação do sombreamento em diferentes direções de iluminação favorece o contraste dos lineamentos. Assim, foram elaborados diagramas de rosáceas com as frequências, agrupadas em classes de 10°, visando à determinação das orientações preferenciais.

A análise dos mapas de relevo sombreado permitiram a identificação de lineamentos em escala regional (entre 4-8 km), observáveis em escalas menores que 1:250.000. As direções de maiores destaques obtidas através das individualizações das lineações nos mapas de relevo sombreados (Figura 3.2) foram de N50-60E e N70-80E.

De fato, as imagens de satélite ressaltaram os lineamentos menores, porém com um maior grau de dispersão e em menor quantidade, sendo que as direções de maiores destaques obtidas através das individualizações das lineações nas imagens Landsat (Figura 3.3) foram de N40-60E, N80-90E e N50-60W.

Os dados obtidos foram integrados num mapa final (Figura 3.4), sendo que os lineamentos repetidos foram eliminados, com o objetivo de evitar falsas análises. Assim, as direções de maiores destaques obtidas através das individualizações das lineações nos mapas de relevo sombreados somados as das imagens do satélite Landsat foram: N70-80E, N40-60E e N60-70W.

#### 3.2.1.2 Método Analítico Hierárquico

Trata-se de um método de análise multicriterial denominado AHP (Analystic Hierarchy Process) ou Processo Analítico Hierárquico desenvolvido por Satty na década de 70, correspondendo-se a uma metodologia flexível e eficaz de tomada de decisão que auxilia na definição de preferências e na escolha da alternativa, quando aspectos qualitativos e quantitativos devem ser ponderados.

A modelagem baseada no conhecimento implica na atribuição de pesos aos critérios, muitas vezes de forma subjetiva. Para tornar mais criteriosa a aplicação de ponderadores aos fatores, utiliza-se métodos específicos, dentre eles o AHP. Este aplica-se na tomada de decisão com múltiplos critérios, em que o problema apresenta uma hierarquia de solução das variáveis que serão trabalhadas para a sua resolução. Tal hierarquização permite a criação de um modelo da realidade e visualização da interação dos componentes que serão separados em níveis, a fim de garantir segurança e flexibilidade.

Segundo Baraças e Machado (2006, p.3),

> [...] este método permite classificar as partes ou variáveis segundo uma ordem hierárquica, atribuir valores numéricos aos julgamentos subjetivos à importância relativa de cada variável e sintetizar os julgamentos, a fim de determinar as variáveis que têm maior ou menor prioridade sobre os outros, por forma a agir de maneira mais conveniente para atingir a decisão.

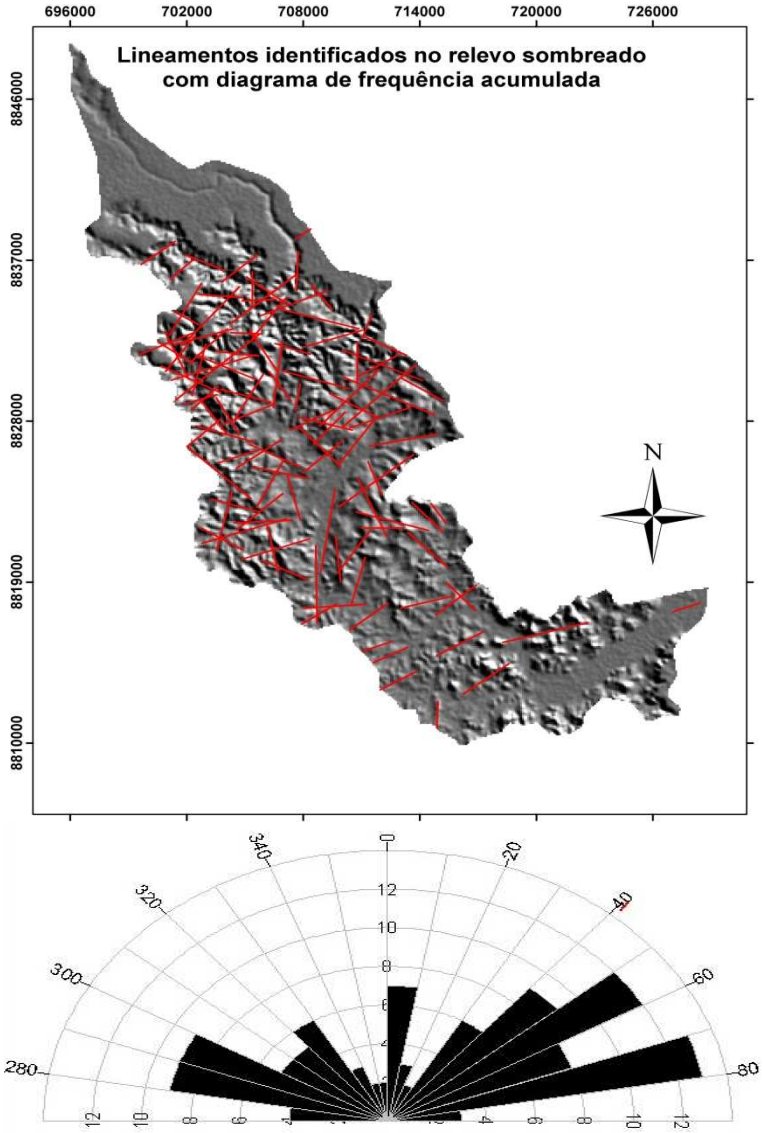



Figura 3.2. Lineamentos identificados no relevo sombreado com diagrama de frequência acumulada.

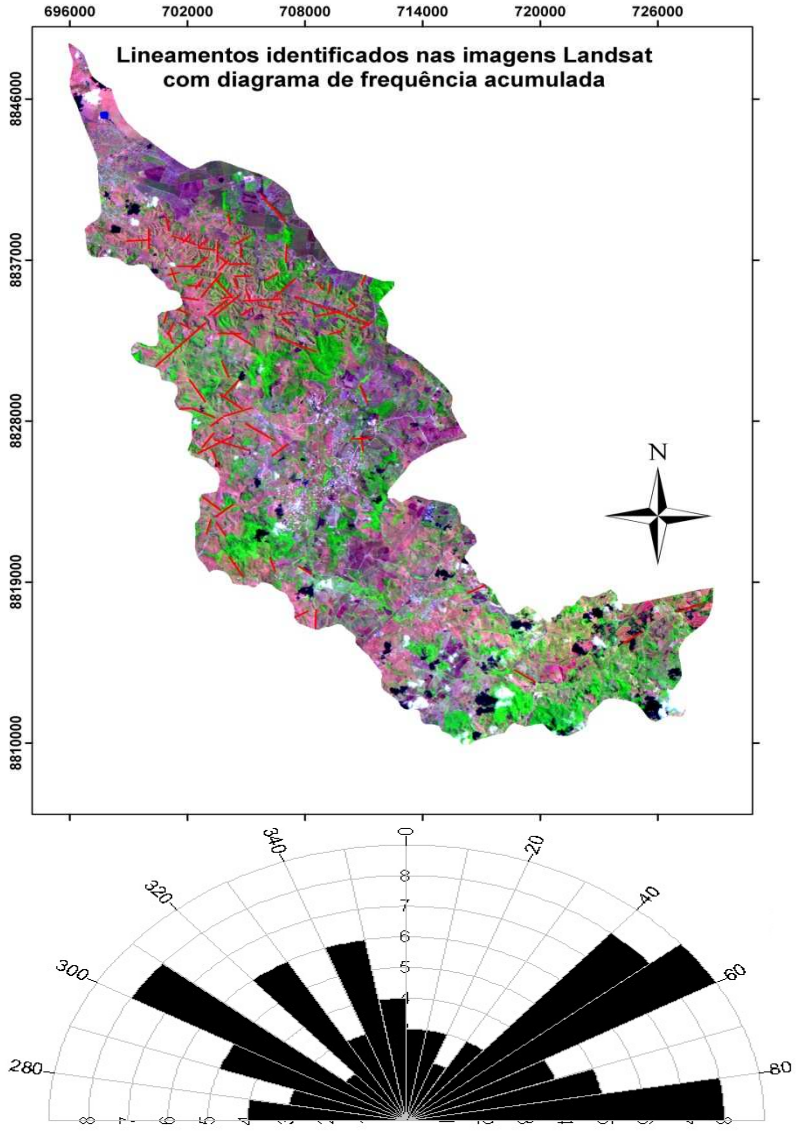



Figura 3.3. Lineamentos identificados nas imagens Landsat com diagrama de frequência acumulada.

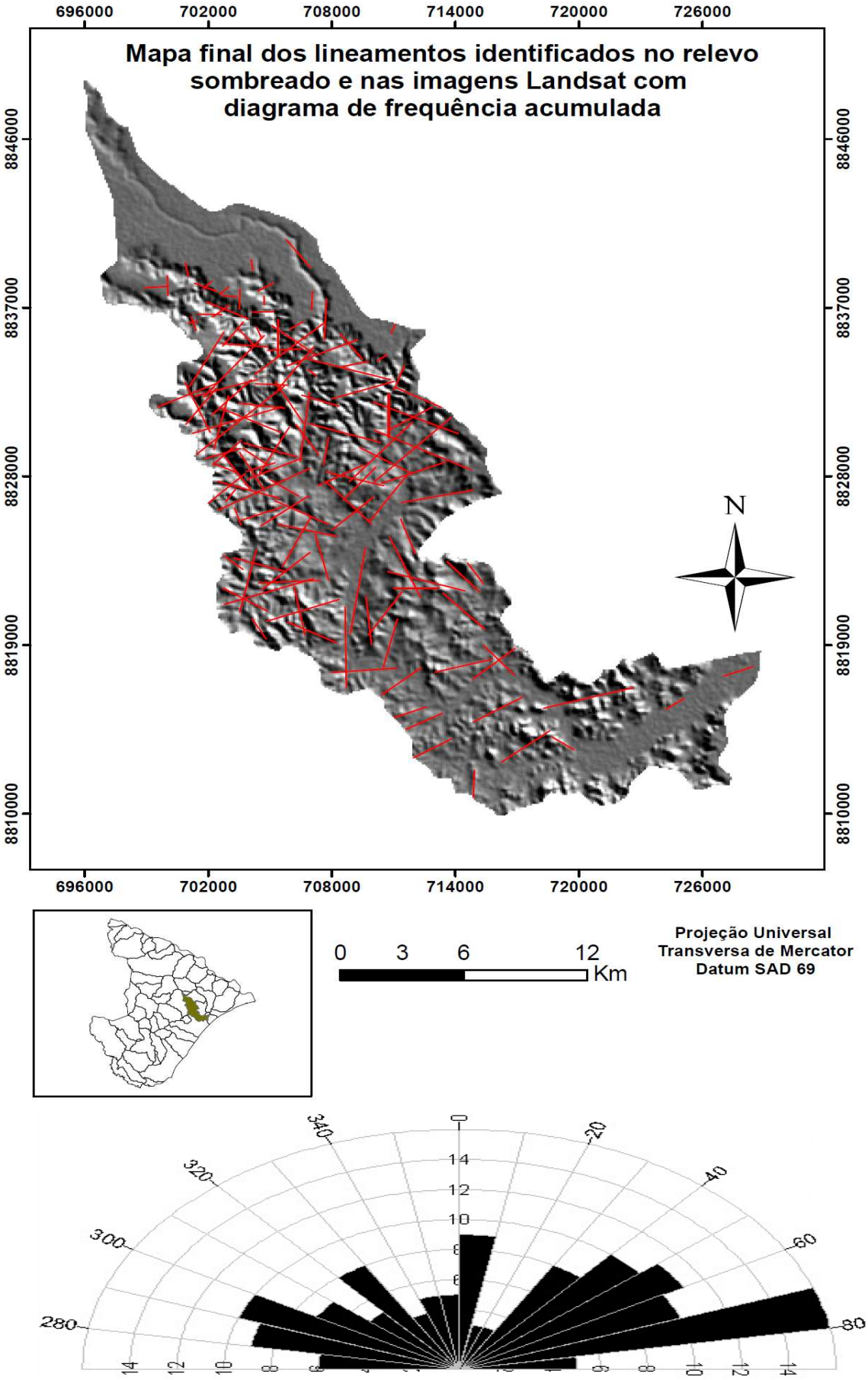



Figura 3.4. Mapa final dos lineamentos identificados no relevo sombreado e nas imagens Landsat com diagrama de frequência acumulada.

Assim, os elementos que fazem parte da hierarquia, devem ser organizados de maneira descendente, onde o objetivo principal da pesquisa deve estar no primeiro nível da hierarquia; num nível abaixo os critérios; em seguida, as alternativas ou classes (figura 3.5).

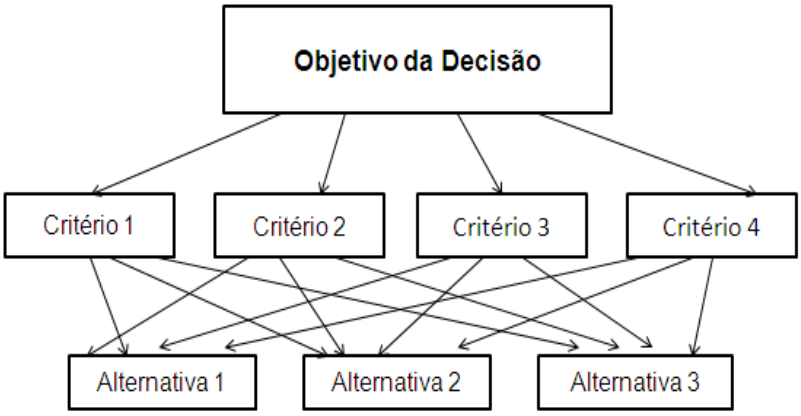



Figura 3.5. Estrutura de decisão hierárquica em três níveis.
Fonte: Baraças e Machado, 2006.

O método de análise hierárquica ou método analítico hierárquico é baseado na construção de uma série de matrizes (tabela 3.1) de “pares de comparação” que comparam todos os critérios entre si. Isto é feito para estimar os pesos de cada um, descrevendo o quanto o mesmo está contribuindo para atingir o objetivo geral do estudo.

Logo, os componentes das matrizes podem ser avaliados de acordo com seu grau de importância, dentro da hierarquia estabelecida, sabendo-se que cada elemento revela quanto o critério da coluna esquerda é mais importante em relação a cada critério correspondente na linha superior. Portanto, quando um critério é avaliado com si próprio, o único resultado possível é 1.

A consistência da matriz é calculada a partir da Razão de Consistência (CR), que mede quanto os valores de comparação entre os fatores foram gerados aleatoriamente. Se o CR for maior que 0,1, os julgamentos, ou seja, os valores de comparação atribuídos na construção da matriz, não são confiáveis. Logo, recomenda-se a reorganização da matriz, alterando os valores de comparação entre os fatores.

Tabela 3.1. Matriz de comparação dos critérios.

**CRITÉRIOS**

**CRITÉRIOS**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $G_{1\,2}$ | $G_{1\,3}$ | ..... | $G_{1\,j}$ |
| $1/G_{1\,2}$ | 1 | $G_{2\,3}$ | ..... | $G_{2\,j}$ |
| $1/G_{1\,3}$ | $1/G_{2\,3}$ | 1 | ..... | $G_{3\,j}$ |
| ..... | ..... | ..... | 1 | ..... |
| $1/G_{1\,j}$ | $1/G_{2\,j}$ | $1/G_{3\,j}$ | ..... | 1 |
| | | | | |

Fonte: THIRUMALAIVASAN (2001).

As matrizes de comparação são traduzidas de uma linguagem verbal para a numérica, através da Escala Fundamental de Satty que estão descritas no quadro 3.1

Quadro 3.1. Escala Fundamental de Satty.

| Importância | Definição | Explicação |
|---|---|---|
| 1 | Igual importância | As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo |
| 3 | Importância pequena | O julgamento favorece levemente uma atividade em relação à outra |
| 5 | Importância grande ou essencial | O julgamento favorece fortemente uma atividade em relação à outra |
| 7 | Importância muito grande | Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra |
| 9 | Importância absoluta | A evidência favorece uma atividade em relação à outra |
| 2,4,6,8 | Valores Intermediários | Quando há uma condição de compromisso entre as duas definições |

Fonte: Adaptada de Satty (1990, p.15)

### 3.2.1.3 <u>Critérios para a Elaboração do Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas</u>

A definição dos critérios adotados na análise da potencialidade hídrica das águas subterrâneas consiste na seleção de dados do meio físico-natural e de fatores

antrópicos representativos dos fenômenos ou evidências que permitem os processos de armazenamento e circulação da água no meio aquíferos.

Aplica-se a modelagem de acordo com o conhecimento dos aspectos físico-naturais e antrópicos da sub-bacia do rio Siriri, amplamente discutida, objetivando a definição dos critérios a serem utilizados e sua importância para a ocorrência do fenômeno pesquisado. Logo, tais critérios foram: precipitação, uso e cobertura do solo, tipo do solo, declividade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos e geologia (permeabilidade das rochas).

### *3.2.2 Procedimentos Cartográficos*

#### 3.2.2.1 Mapa de Precipitação

Na elaboração deste mapa foram utilizados dados de precipitação da base do Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SEPLANTEC/SRH, 2004), na escala 1:500.000. A precipitação, associada a outros fatores, como o tipo de solo, o uso do solo, a declividade e os litotipos apresentam papel importante no processo de infiltração da água precipitada. Deste modo, áreas com valores mais alto de precipitação possuem as maiores cargas. Na tabela 3.2, são estabelecidas as cargas para os intervalos de precipitação da sub-bacia do rio Siriri.

Tabela 3.2. Cargas de precipitação.

| Precipitação anual (mm) | Cargas |
|---|---|
| 1400-1700 | 70 |
| 1200-1400 | 50 |
| 1000-1200 | 30 |

#### 3.2.2.2 Mapa de Uso e Cobertura do Solo

O uso e a cobertura do solo são determinantes na quantidade da água precipitada que infiltrará no solo. As florestas, por exemplo, têm ação regularizadora nas vazões dos cursos d’água, pois evitam que as águas de maiores precipitações

atinjam os cursos d'água num pequeno intervalo de tempo, permitindo assim, que parte da água precipitada infiltre no solo. Já na área urbana, há um impedimento, significativo, que a água precipitada infiltre, o que gera o aumento do escoamento superficial. Para a elaboração deste mapa e das respectivas cargas (Quadro 3.2) foi utilizado o layer de uso e cobertura do solo da sub-bacia do rio Siriri desenvolvido por Rocha et al., (2009), elaborado a partir da classificação supervisionada de imagens do satélite SPOT, na escala 1:25.000.

Quadro 3.2. Cargas para uso e cobertura do solo

| Uso e Cobertura do solo | Cargas |
|---|---|
| Nuvens | 0 |
| Área Degradada/Área Petrobras/Distrito/ Povoado/Sede Municipal/Extração Mineral | 10 |
| Cultivos Agrícolas/Cana-de-Açúcar/Solos expostos/ Lago/ Lagoa/ Açude/Pastagem | 20 |
| Área Embrejada/Campos de Restinga/Capoeira | 30 |
| Área Embrejada com vegetação | 40 |
| Mata/Mata Ciliar | 50 |

### 3.2.2.3 Mapa de Tipo de Solo

Os diferentes tipos de solo influenciam nas características do escoamento superficial devido à sua capacidade de infiltração (textura- tamanho dos grãos e estrutura- forma e arranjo das partículas). A porosidade varia bastante para cada tipo de solos, que afeta a infiltração e a capacidade de armazenamento dos mesmos. Já a permeabilidade do solo interfere na recarga dos aquíferos, no escoamento subterrâneo e na capacidade de produção dos poços. Os pesos desse parâmetro foram estabelecidos, partindo-se do mapa de tipo de solo (escala 1:400.000) de SEPLANTEC/SRH(2004), ou seja, de suas características que estão presentes na área de estudo. Como este mapa se encontrava na classificação antiga de solos, foi realizada uma reclassificação (Quadro 3.3), com base na nova classificação de solos da Embrapa (1999).

Quadro 3.3. Cargas dos tipos de solo.

| Classificação | Reclassificação | Cargas |
|---|---|---|
| Latossolo vermelho amarelo LVd1 | Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico(LVAd1) | 40 |
| Podzólico vermelho amarelo PV1 | Argissolo Vermelho-Amarelo(PVA1) | 20 |
| Podzólico vermelho amarelo PV2 | Argissolo Vermelho-Amarelo(PVA2) | 20 |
| Solos Aluviais Aed | Neossolos Flúvicos Eutroficos e Distróficos(RYve/RYbd) | 20 |
| Podozólico vermelho amarelo equivalente eutrófico PE5 | Luvissolo Crômico Eutrófico(TC) | 10 |
| Solos Hidromórficos HGe | Neossolo Quartzarenico hidromórfico(RQg) | 50 |
| Vertisol | Vertissolo(V) | 10 |
| Podzólico Vermelho Amarelo PV7 | Argissolo Vermelho-Amarelo(PVA7) | 20 |
| Podzólico Vermelho Amarelo PV9 | Argissolo Vermelho-Amarelo(PVA9) | 20 |

### 3.2.2.4 Mapa de Declividade

A declividade possui relação importante e complexa com a infiltração e o escoamento superficial, pois, influencia no tempo do escoamento superficial e a concentração da chuva. As diferentes faixas de declividade e suas respectivas cargas (Tabela 3.3) foram estabelecidas a partir do modelo digital do terreno, na escala 1: 450.000.

Tabela 3.3. Faixas e cargas para declividade.

| Declividade (%) | Cargas |
|---|---|
| (0 - 8) | 40 |
| (9 - 37) | 25 |

### 3.2.2.5 Mapa de Densidade de Drenagem

Densidade de Drenagem é a relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área da drenagem. Quanto maior a densidade de drenagem, mais rapidamente a água precipitada responsável pelo escoamento superficial chegará ao

exutório da bacia. Essa densidade (Tabela 3.4) foi calculada com o algoritmo Kernel (SILVERMAN, 1986) implementado no ArcGis 9.3®, que se refere na determinação das densidades com o somatório de todos os comprimentos segmentos divididos pelo tamanho da área de procura, definida como de 1000 metros. Este mapa foi elaborado, baseando-se no shape (plano de informação) de hidrologia (SRH/SEPLANTEC, 2004), na escala 1:100.000.

Tabela 3.4. Cargas para densidade de drenagem.

| Densidade de Drenagem ($km/Km^2$) | Cargas |
|---|---|
| 0-0,23645 | 50 |
| 0,23645-0,70936 | 40 |
| 0,70936-1,18226 | 30 |
| 1,18226-1,76718 | 20 |

### 3.2.2.6 Mapa Geológico

No desenvolvimento deste critério, foram estabelecidas classes de permeabilidade para as rochas das unidades geológicas presentes na sub-bacia do rio Siriri, com as cartas geológicas da Bacia de Sergipe/Alagoas (DNPM/PETROBRAS, 1975), desenvolvidas na escala 1: 50.000. As cargas para cada unidade foram estabelecidas de acordo com observações no campo e no Mapa de Qualidade e Disponibilidade de Águas Subterrâneas (IBAMA e SEPLAN, 1992). Trata-se de um fator condicionante para a ocorrência e transmissão de água subterrânea, tendo em vista as características dos litotipos presentes na área que favorecem a infiltração da água precipitada. O quadro 3.4 mostra os aspectos litológicos definidores de propriedades aquíferas e os fatores de influência na permeabilidade, como também as cargas e justificativas estabelecidas para cada unidade geológica.

Quadro 3.4. Cargas para os atributos litológicos definidores de propriedades aquíferas e fatores adicionais passíveis de modificação de propriedades.

| **Unidades Geológicas/Aquíferos** | | **Litotipos** | **Fatores adicionais de influência na permeabilidade** | **Cargas (Justificativas)** |
|---|---|---|---|---|
| ***Sedimentos Costeiros e Aluvião*** | | Areias e cascalhos de origem aluvial ou fluvial ou litorânea. Sedimentos síltico argilosos de origem fluvial ou mangues costeiros. | Relacão de composicão arenosa (permeabilidade média a alta) X Síltico argilosa (permeabilidade baixa) | **45-** Ocorre a composição arenosa e síltico argilosa com predominância da primeira. |
| ***Formação Barreiras (Aquífero Barreiras)*** | | Sedimentos inconsolidados representados por siltes, areias mal selecionadas e argilas. Clásticos continentais finos a grosseiros, de coloração variada e grau de compactação insignificante. Arenito caolínico mal consolidado e cascalhos. | Relacão de composicão arenosa (permeabilidade média a alta) X Síltico argilosa (permeabilidade baixa) | **30-** Há ocorrência de camadas argilosas. |
| ***Formação Cotinguiba*** | ***Membro Sapucari (Aquífero Sapucari)*** | Essencialmente constituído por calcilutito cinzento maciço ou estratificado. | Granulometria em calcários granulares X Grau de dissolucão em calcários em geral x grau de fraturamento em calcários em geral. | **70-** Mostra evidências de dissolução e apresenta grau médio de fraturamento. |
| ***Formação Riachuelo*** | ***Membro Angico (Aquífero Angico)*** | Arenito branco fino a conglomerático com cimento calcifero. | Granulometria e grau de cimentação. | **20-**Granulometria heterogênea (fina a conglomerática) e cimento calcitico. |
| | ***Membro Maruim (Aquífero Maruim e Maruim /Aguilhada)*** | Calcarenito e calcirrudito oncolítico e oolítico creme, recifes algálicos isolados. Em 1994, Feijó inclui no topo deste membro o calcário dolomitizado, antes denominado de Membro Aguilhada. | Granulometria e grau de cimentacão X Grau de dissolucão X Grau de fraturamento. | **70-**Apresenta granulometria grossa a média e dissolução. |
| | ***Membro Taquari*** | Alternâncias de calcilutito e folhelhos cinzentos. | Granulometria e grau de cimentacão X Grau de dissolucão X Grau de fraturamento. | **20-** Apresenta granulometria fina e alta cimentação. |
| ***Cornubianito Traipu*** | | Biotita, granada, cornubianito cinza-prateado com porfiroblastos de biotita e ou granada. | Rocha sem porosidade ou permeabilidade de origem X Fraturamento. | **15-** Presença de fraturamento |

Fonte: Modificado de Feitosa et al., 1998 ; Petrobras/DNPM, 1975; IBAMA e SEPLAN, 1992.

### 3.2.2.7 Mapa de Densidade de Lineamentos

Os lineamentos refletem um fenômeno de subsuperfície (morfoestrutura) e são feições lineares mapeáveis, pois diferem-se de outras feições adjacentes. A densidade de lineamentos associada à geologia são importantes na determinação de ocorrência e transmissão de água subterrânea. Tais lineamentos foram extraídos das imagens do satélite LandSat TM e ETM+ e do modelo digital do terreno, com escala de 1: 450.000. As interseções dos lineamentos controlam a transmissão da água subterrânea através de orientações preferenciais. Quanto maior a densidade de lineamentos (Tabela 3.5), maior é a probabilidade de ocorrência da água subterrânea.

Tabela 3.5. Cargas para Densidade de Lineamentos.

| Densidade de Lineamentos ($Km/Km^2$) | Cargas |
|---|---|
| 1,58661 - 2,92211 | 50 |
| 0,947403- 1,58661 | 30 |
| 0,39950 - 0,94740 | 20 |
| 0 - 0,39950 | 10 |

### 3.2.2.8 Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas

Para a elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas foi construída uma base de dados cartográficos, a partir da qual, foram gerados diferentes mapas, representativos dos critérios de análise do potencial, que são esses: permeabilidade das rochas, uso do solo, solo, declividade, precipitação, densidade de drenagem e densidade de lineamentos. A cada mapa foram atribuídas cargas para suas diferentes classes e pesos, de acordo com sua influência no objetivo geral do trabalho. Os pesos foram atribuídos com o auxílio da extensão do método analítico hierárquico (AHP), presente no software ArcGis 9.3®.

Os procedimentos cartográficos realizados no ArcGis 9.3® e no Envi 4.4® são descritos detalhadamente na modelagem cartográfica ( Figura 3.6). A extensão AHP permitiu a criação da matriz de comparação entre os critérios e a definição de pesos, de acordo com a importância de cada critério na definição de áreas potencias de ocorrência da água subterrânea.

Os valores e pesos atribuídos na modelagem têm o objetivo de definir quais dados de evidências são representativos e previsores do fenômeno estudado, ou seja, que influenciam no armazenamento e circulação da água subterrânea. Em seguida, os valores da matriz comparativa e os pesos referentes a cada critério foram atribuídos, e através da álgebra de mapas foi gerado o mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas. A avaliação geral e a criação do modelo baseiam-se na classificação das áreas em 05 categorias de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto.

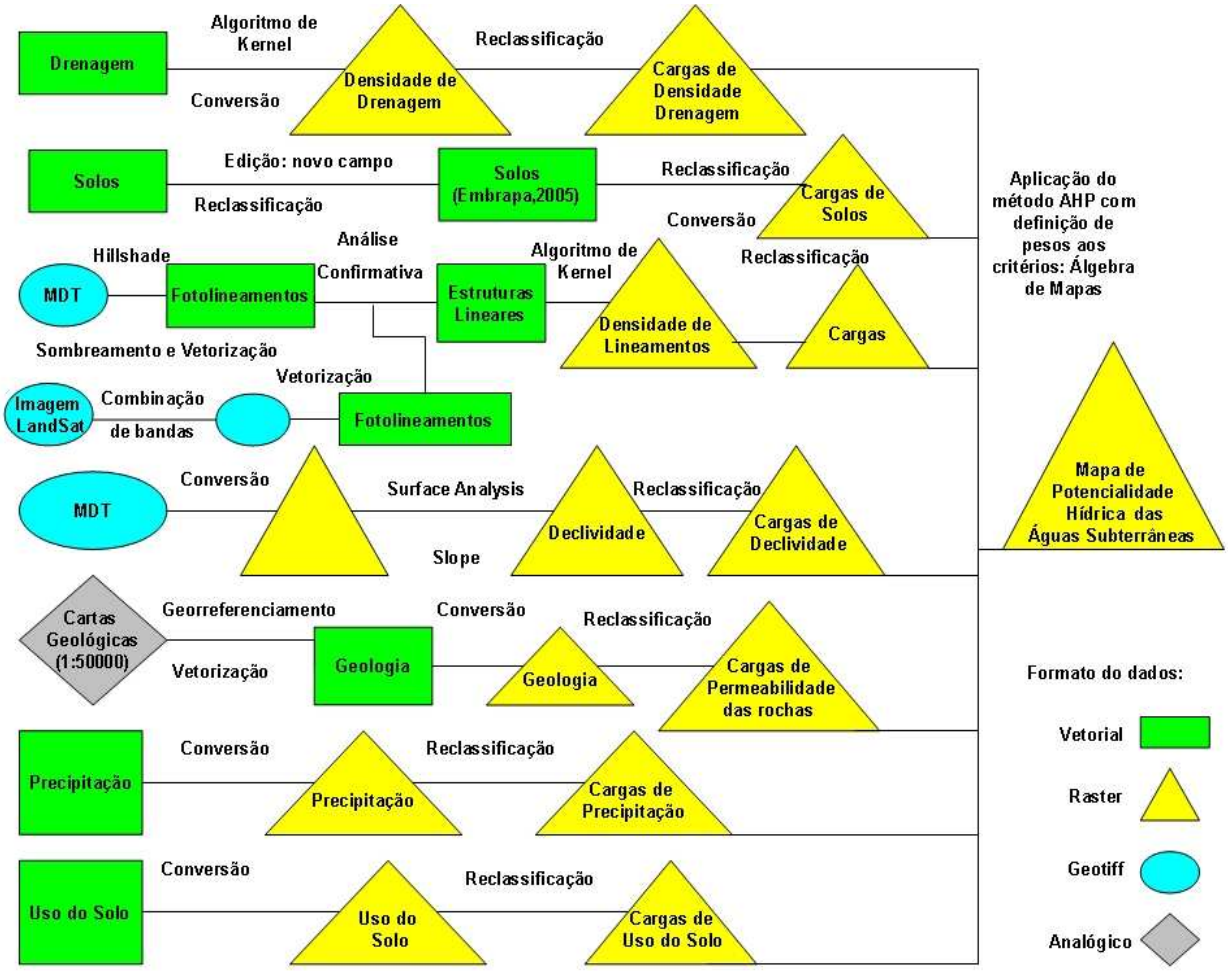



Figura 3.6. Modelagem cartográfica para elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri.

## 3.4 Resultados e Discussão

A modelagem da potencialidade hídrica das águas subterrrâneas fundamentou-se na análise e integração de mapas temáticos gerados pelos dados geológicos, de poços produtores, de aspectos físico-naturais e antrópicos determinantes na favorabilidade de ocorrência de água subterrânea. Cada mapa temático foi quantificado, de acordo com a sua importância no objetivo principal do trabalho. Na modelagem final dos dados, aplicou-se uma análise multicriterial para a definição dos pesos de cada variável, segundo sua contribuição para a percolação e armazenamento de água subterrânea. Desta forma, verificou-se que a modelagem baseada no conhecimento permitiu a geração dos mapas temáticos apresentados a seguir.

*a) Geologia*

O conhecimento geológico de determinada área é o ponto inicial para o entendimento da distribuição dos aquíferos, reconhecidos como unidades geológicas capazes de armazenar e transmitir água. As cargas para cada unidade geológica foram definidas com base nos fatores determinantes na permeabilidade das litologias. Assim, o mapa geológico da figura 3.7 mostra as cargas geradas pela reclassificação realizada, com base nas características de permeabilidade das diferentes unidades geológicas.

*b) Declividade*

A declividade é indispensável nos estudos hidrogeológicos, uma vez que a inclinação do terreno é determinante na taxa de infiltração da água precipitada. Isso significa que, quanto maior a declividade, maior será o escoamento superficial, e menor a infiltração. O mapa de cargas para as diferentes classes de declividade é apresentado na figura 3.8. Na área correspondente a carga 40 (classe de 0% a 8%), o escoamento superficial é bastante reduzido, sendo excelente para a infiltração da água precipitada. Já a área da carga 25 (classe de 9% a 37%), o escoamento é moderado com infiltração regular da água.

*c) Tipo de Solos*

A permeabilidade e espessura do solo favorecem a infiltração da água precipitada. As cargas para os diferentes tipos de solo foram estabelecidas a partir da classificação hidrológica dos solos com base na sua capacidade de infiltração (WARD e ELLIOT, 1995). Assim, os solos da área de estudo foram classificados em: i) solos com alta capacidade de infiltração, formando solos profundos e com drenagem boa a excessiva (correspondem ao Latossolo e o Neossolo Quartzarênico); ii) solos com baixa capacidade de infiltração, formado por camadas impermeáveis que dificultam o movimento descendente da água ( corresponde ao Argissolo Vermelho-Amarelo e o Neossolo Flúvico); iii) solos com capacidade de infiltração muito baixa, formados por solos argilosos com elevado potencial de agregação (foram estabelecidos nesta classe o Luvissolo Crômico e o Vertissolo).

Desse modo, observou-se que os solos que demonstram melhor capacidade de infiltração por serem profundos e bem drenados (carga 40 e 50 respectivamente), são o Latossolo e o Neossolo Quartzarênico. Quanto aos Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Flúvico caracterizam-se por baixa capacidade de infiltração, com textura areno-argilosa (carga 20). Já Luvissolo Crômico e o Vertissolo são ricos em argila com condições menos favoráveis à infiltração (carga 10). O mapa de cargas de solo é apresentado na figura 3.9.

*d) Uso do Solo*

A cobertura vegetal tem papel importante no processo de infiltração, uma vez que diminui o escoamento superficial das águas pluviais e aumenta o seu tempo de residência. As áreas com mata ciliar e mata possuem as melhores condições de infiltração na sub-bacia, recebendo carga 50 (Figura 3.10), assim como as áreas embrejadas com vegetação (carga 40). Os campos de restinga, capoeira e área embrejada indicam situações intermediárias (carga 30). As áreas com pastagens e cultivos agrícolas receberam carga 20. Enquanto as áreas degradadas, povoados, sedes municipais e com atividades de extração mineral apresentam condições menos favoráveis a infiltração (carga10).

*e) Densidade de Drenagem*

A densidade de drenagem reflete as características físicas da bacia, sendo que as rochas e os solos apresentam importância quanto aos aspectos relacionados à resistência a erosão. A sub-bacia do rio Siriri insere-se num contexto geológico dominado por rochas da bacia sedimentar de Sergipe/Alagoas e de coberturas recentes com alta permeabilidade, como os arenitos. Áreas com ocorrências desse tipo de substrato geológico apresentam baixa densidade de drenagem. Assim, os baixos valores de densidade de drenagem presentes na sub-bacia estão associados à presença de rochas permeáveis, relevo suave e solos arenosos que favorecem a infiltração da água precipitada. Logo, os intervalos de menor densidade de drenagem receberam as cargas mais altas (Figura 3.11).

*f) Precipitação*

A precipitação associada a outros fatores físicos da sub-bacia, como a geologia, o tipo do solo e a declividade apresentam importância fundamental na quantidade de água que será infiltrada. No que diz respeito ao referido estudo, a precipitação média cresce à medida que se aproxima do exutório da bacia, o que permite um maior armazenamento de água nos aquíferos presentes em áreas com maiores precipitações. O mapa de cargas para as diferentes classes de precipitação é apresentado na figura 3.12.

*g) Densidade de Lineamentos*

Observa-se no mapa de densidade de lineamentos que os padrões e intensidades de fraturamentos mostram-se distintos nos setores da sub-bacia hidrográfica, com substrato do embasamento ígneo-metamórfico (destacando-se as direções N0-10E, N70-80E, N60-70W e N80-90W); e da Bacia Sergipe-Alagoas ( as direções N50-70E e N70-80E), sendo que é bem mais intensa no primeiro segmento, mesmo quando recobertos pelos depósitos da Formação Barreiras, o que favorece a infiltração e a transmissão da água. Assim, as áreas onde a intensidade dos lineamentos foram maiores, essas receberam as cargas mais altas (figura 3.13).

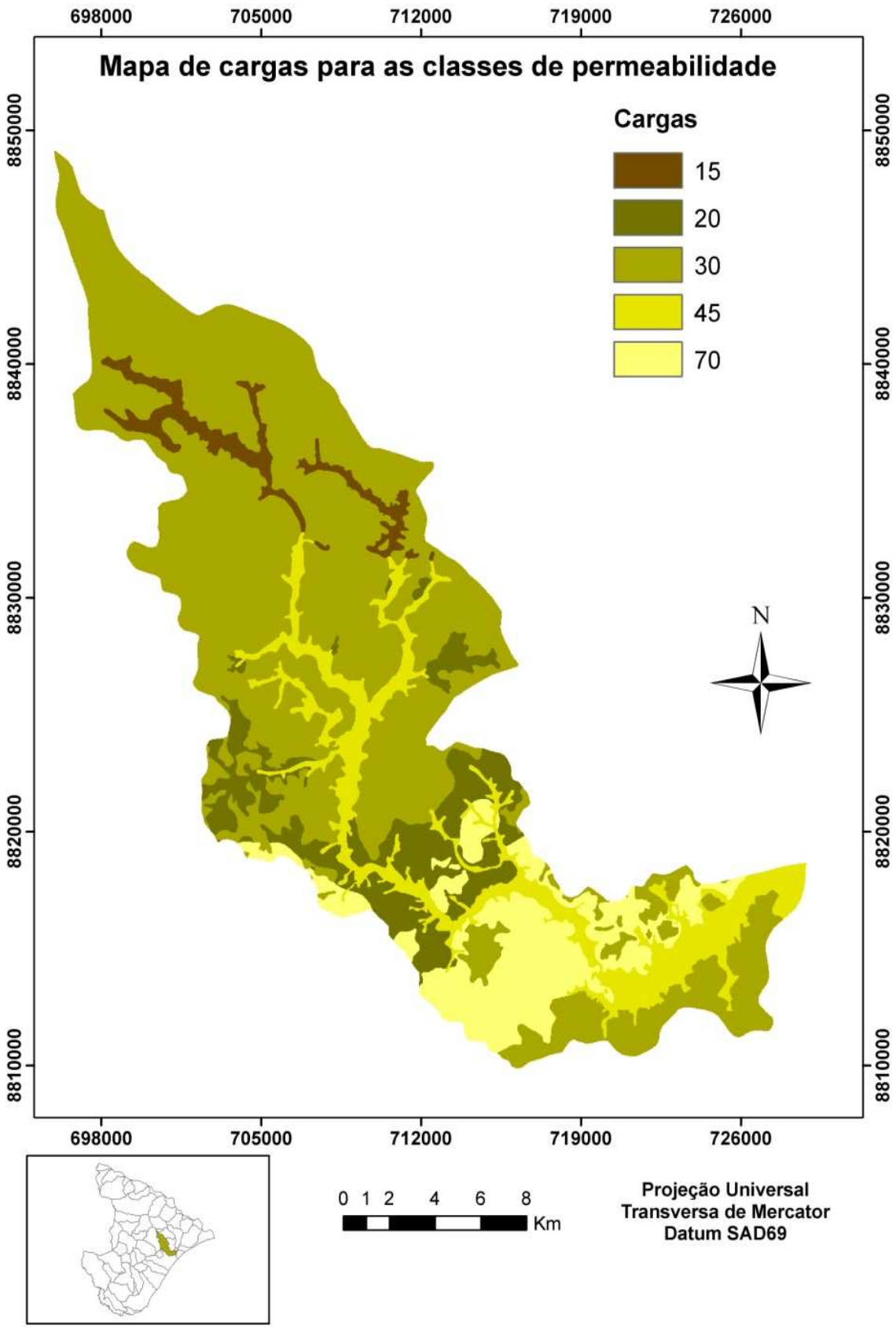



Figura 3.7. Mapa de cargas para as classes de permeabilidade.

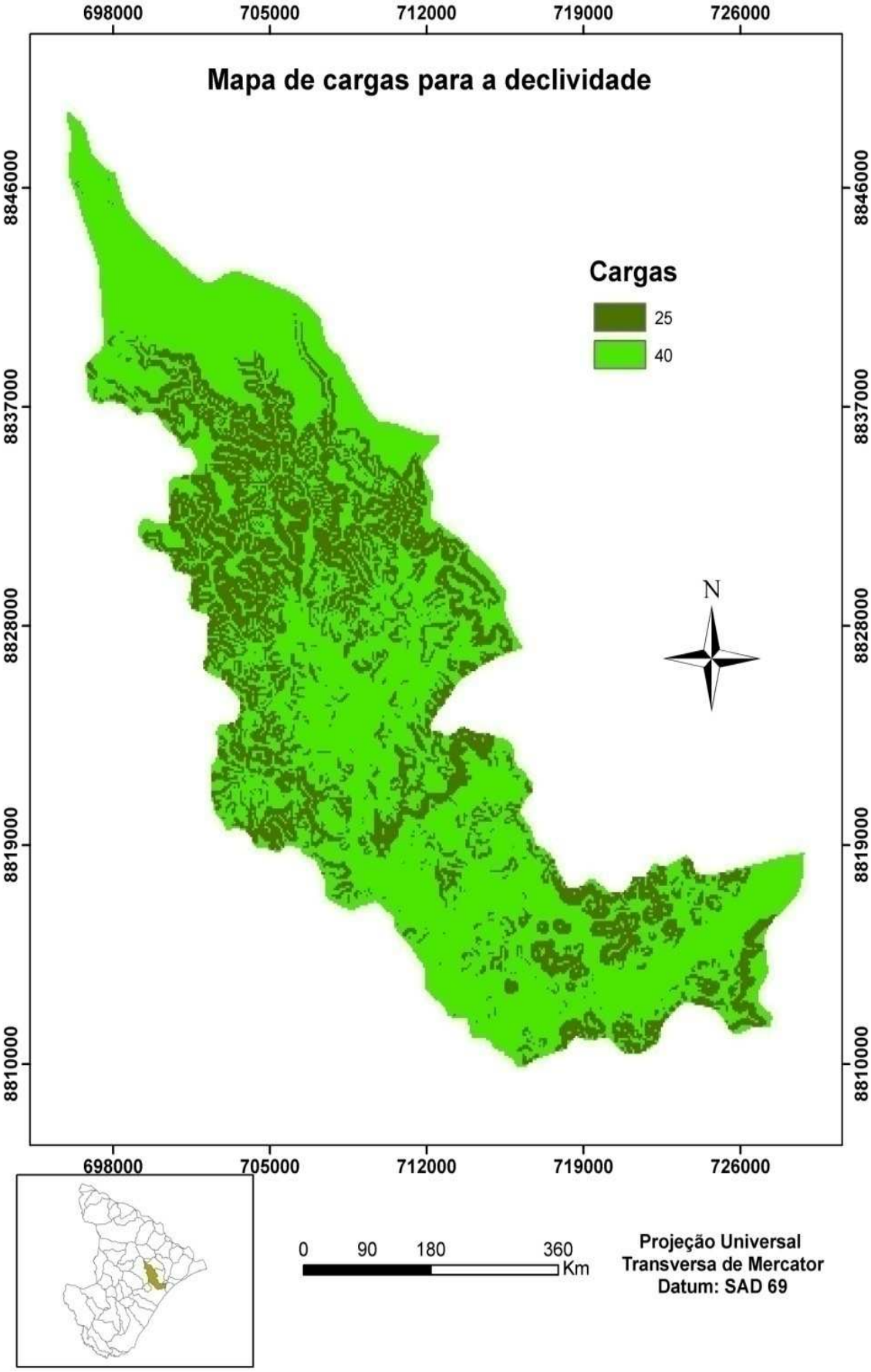



Figura 3.8. Mapa de cargas para declividade.

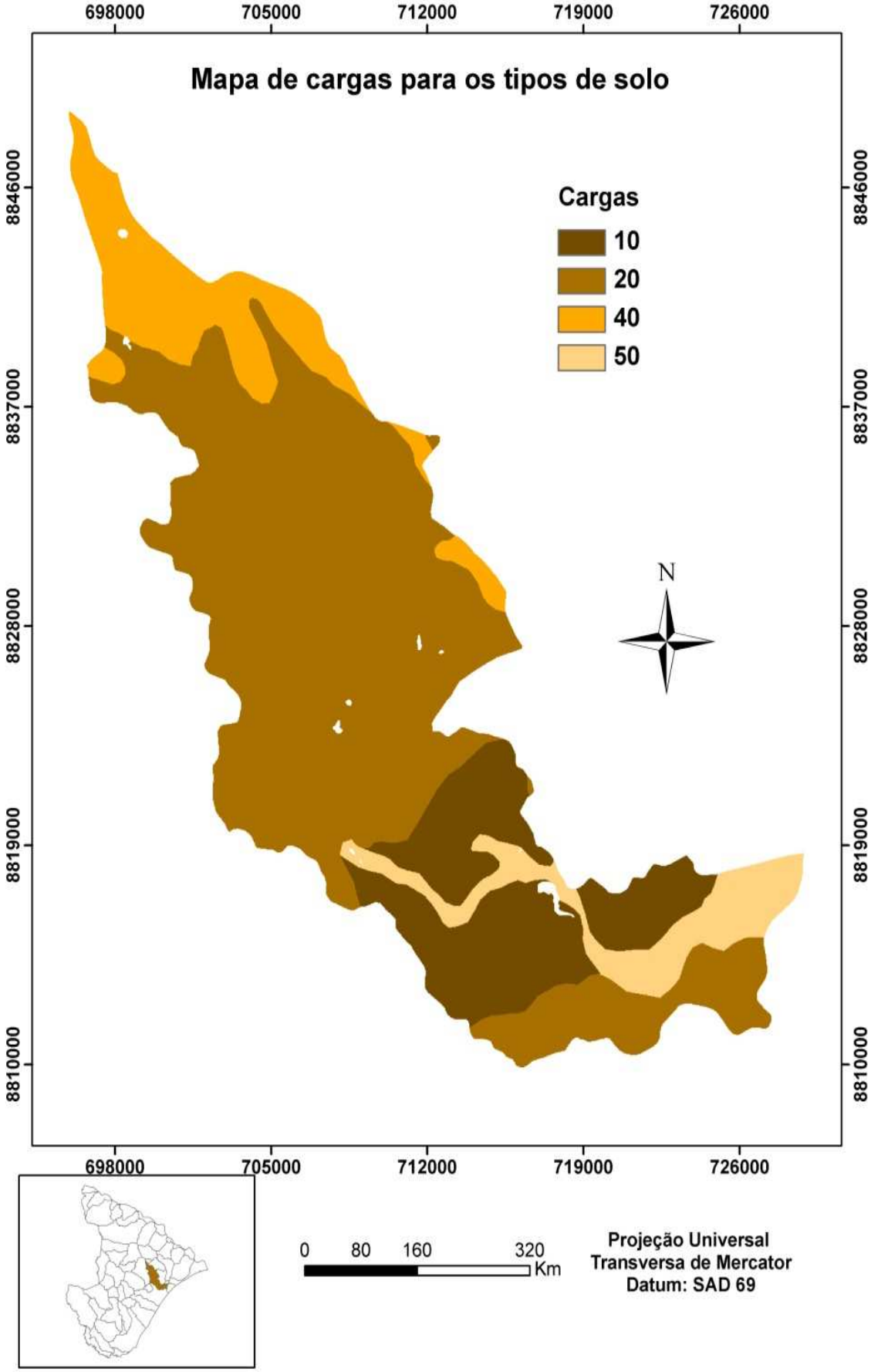



Figura 3.9. Mapa de Cargas para os tipos de solo.

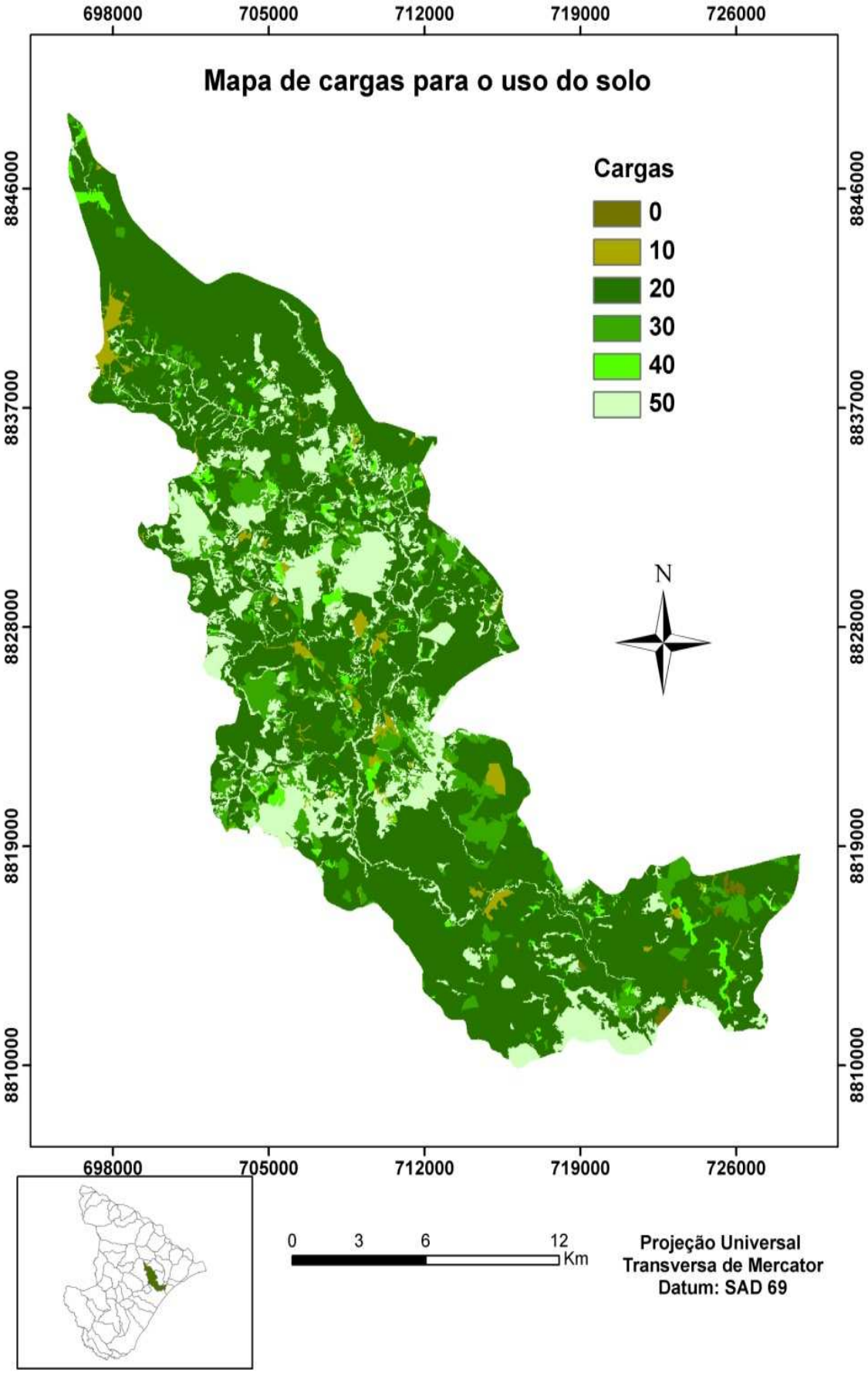



Figura 3.10. Mapa de cargas para o uso do solo.

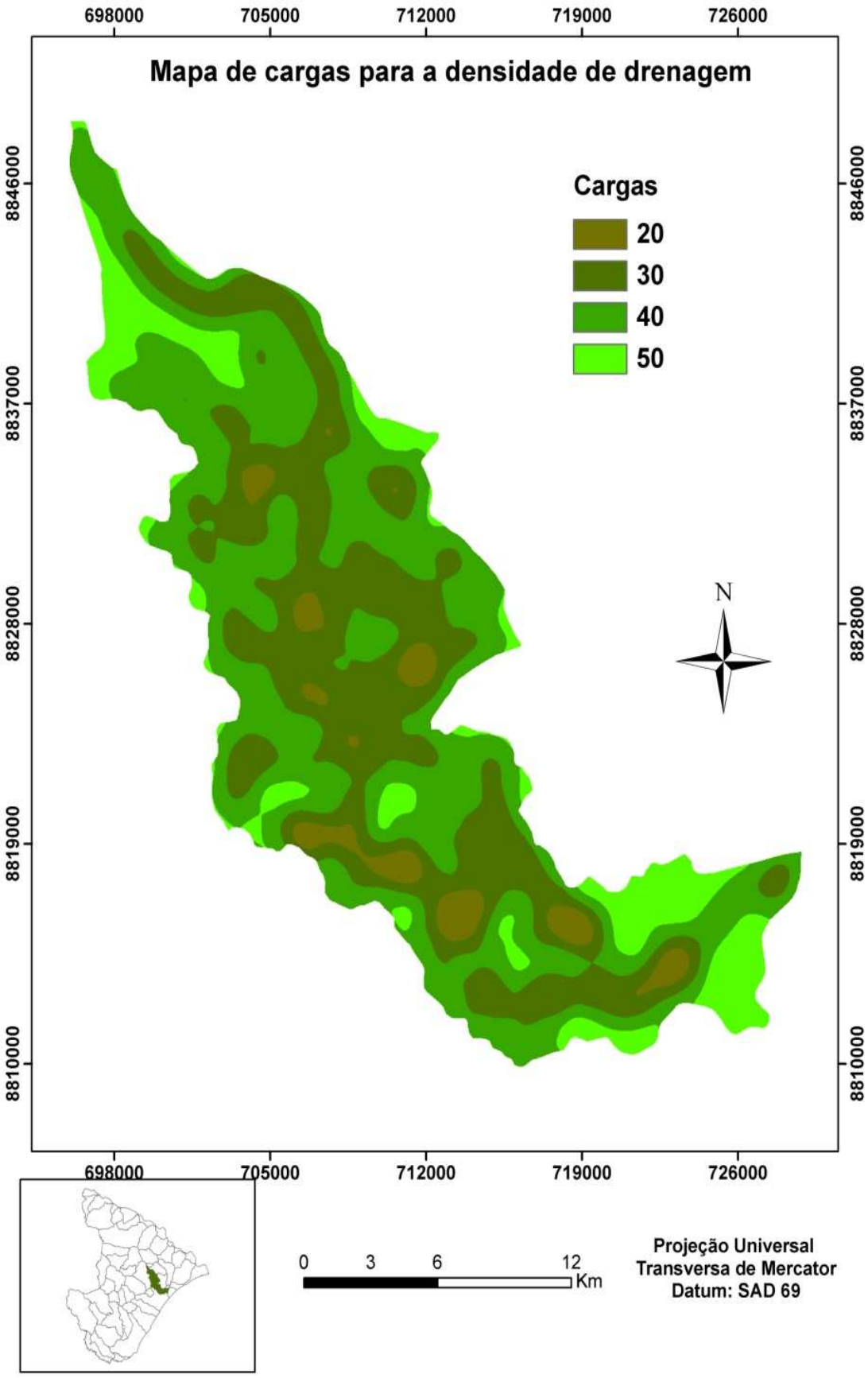



Figura 3.11 Mapa de cargas para a densidade de drenagem.

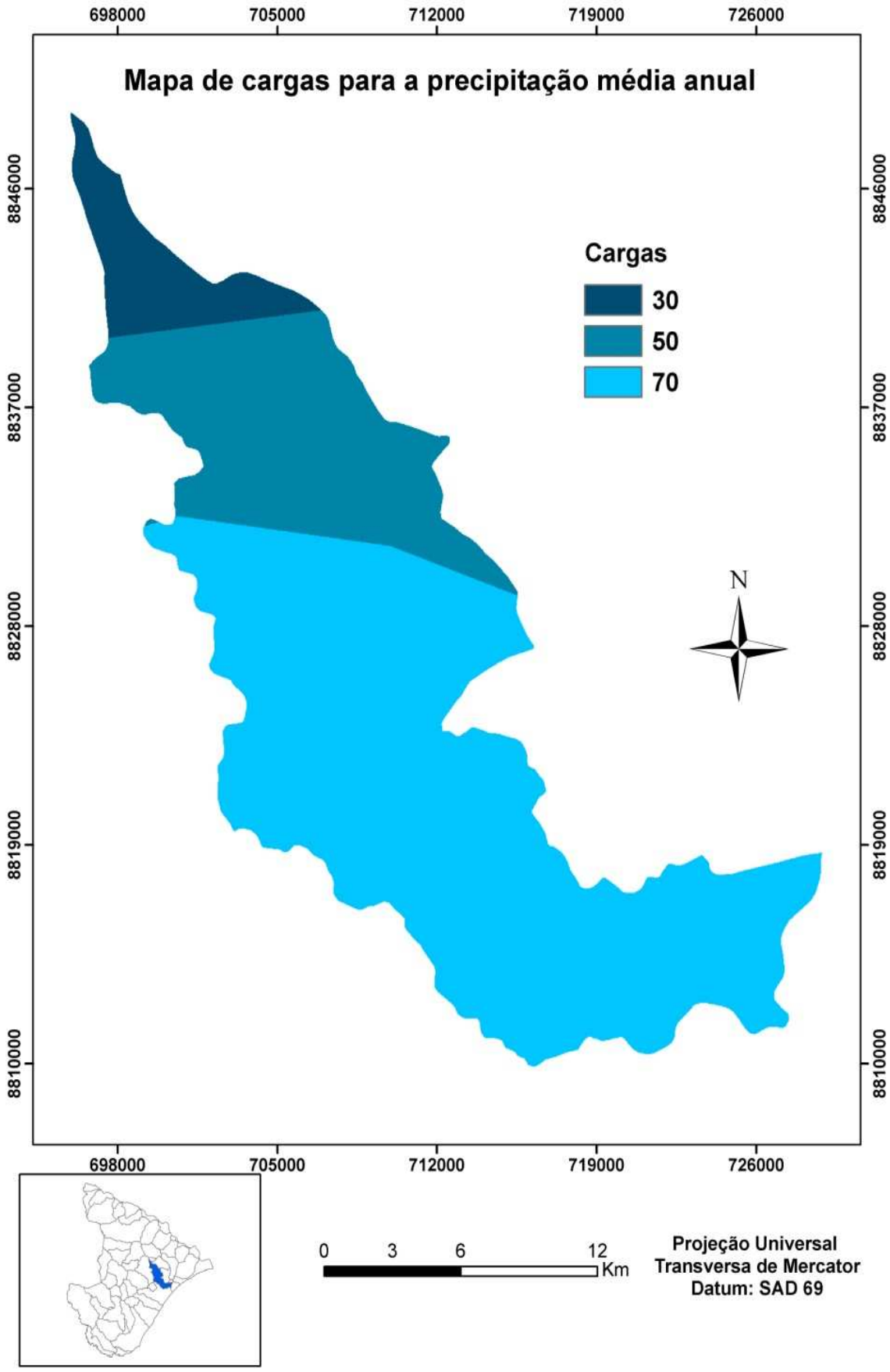



Figura 3.12 Mapa de cargas para a precipitação média anual.

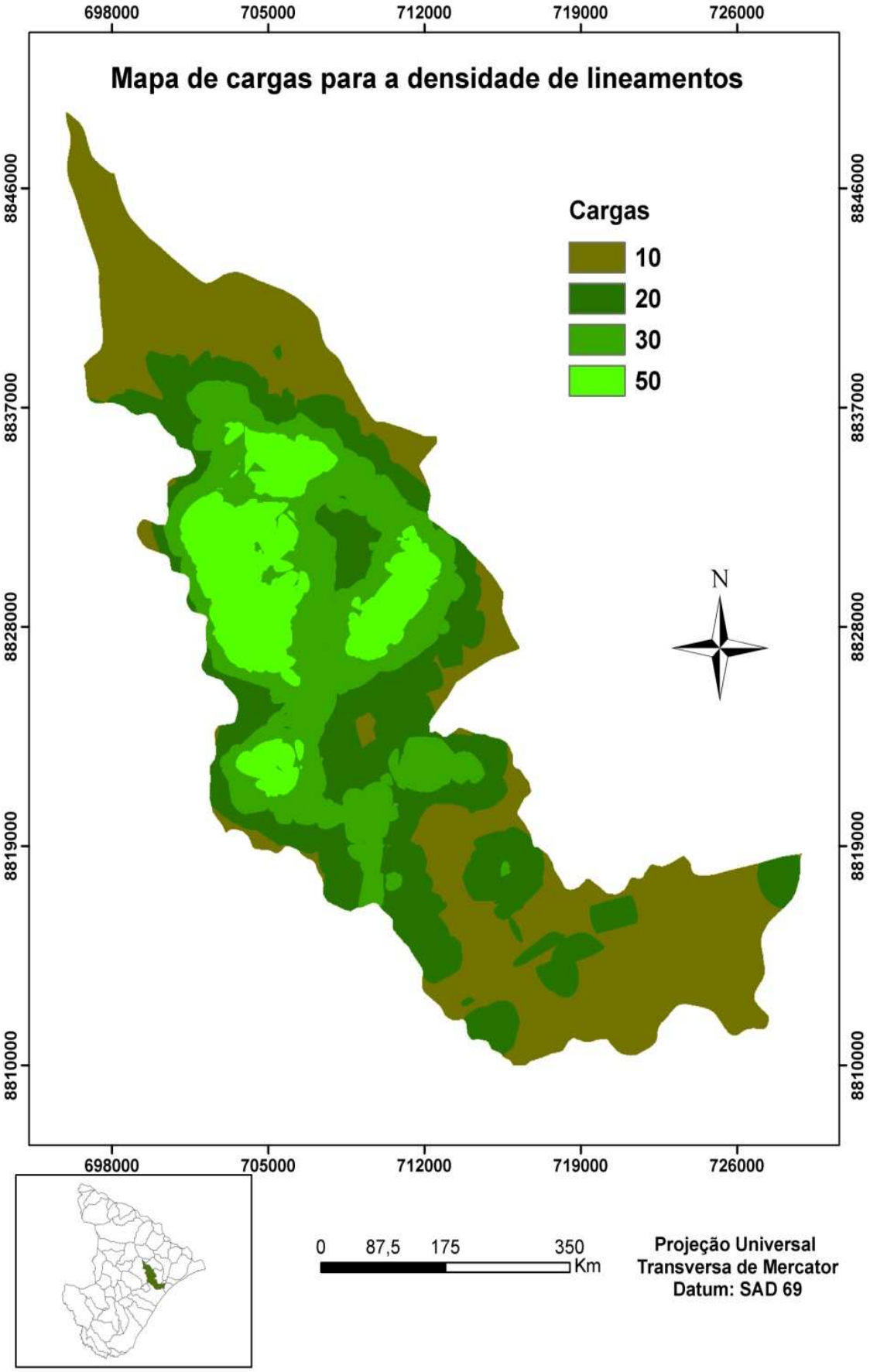



Figura 3.13. Mapa de cargas para a densidade de lineamentos.

### *3.4.1 Mapa de Potencialidade Hídrica das Águas Subterrâneas*

A elaboração do mapa de potencial hídrico das águas subterrâneas deu-se a partir da aplicação do método analítico hierárquico (AHP) para a definição dos pesos aos parâmetros. Estes receberam cargas para as diferentes classes de permeabilidade e uso do solo, densidade de drenagem e de lineamentos, declividade e precipitação. As cargas atribuídas às classes de cada parâmetro variaram de acordo com a sua contribuição para a percolação e armazenamento da água subterrânea.

A matriz de comparação (Tabela 3.6) entre os critérios foi elaborada com o objetivo de auxiliar na determinação dos pesos aos parâmetros, utilizando como base a escala fundamental de Satty (1990).

A permeabilidade das rochas presentes na área de estudo foi definida como primeiro critério da tabela e de maior importância, no objetivo da modelagem devido às características dos litotipos que permitem a água fluir com maior rapidez entre os poros.

A densidade de lineamentos apresenta-se como segundo critério de maior importância, uma vez que as interseções de lineamentos permitem a infiltração da água para reservatórios mais profundos. A densidade de drenagem foi definida como terceiro critério de maior importância, pois reflete as características de permeabilidade dos litotipos e solos, sendo que essa relação pode ser observada nos baixos valores de densidade de drenagem da área de estudo.

Os tipos de solo foram definidos como quarto critério de importância na matriz de comparação, uma vez que solos com maior permeabilidade favorecem a ocorrência da água subterrânea.

Assim, os quatro primeiros critérios receberam baixos valores de comparação entre si, pois se interrelacionam e apresentam maiores influências na infiltração e armazenamento da água.

A precipitação foi definida como quinto critério de importância devido à sua interação com outros fatores, como as litologias, o tipo de solo e a declividade que permitem a infiltração da água. Observa-se que este critério, apesar de ser o quinto em importância e com peso relativamente baixo, apresenta altos valores de cargas para as maiores faixas de precipitação, o que gerou determinado equilíbrio na modelagem.

A declividade apresenta-se em sexto, pois a área de estudo apresenta um relevo aplainado, que favorece o processo de infiltração da água. Para a declividade foi atribuído um valor alto nas cargas das regiões com baixa declividade. O uso do solo representa o sétimo critério de importância, com pequenas áreas de cobertura vegetal que favorece o processo natural de infiltração da água precipitada, como as matas e matas ciliares. Os pesos definidos com o auxílio do AHP são mostrados na tabela 3.7.

Tabela 3.6 Matriz de comparação entre os critérios.

| | **Permeabilidade** | **Densidade de Lineamentos** | **Densidade de Drenagem** | **Solo** | **Precipitação** | **Declividade** | **Uso do Solo** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Permeabilidade** | 1 | 4 | 3 | 5 | 6 | 9 | 9 |
| **Densidade de Lineamentos** | | 1 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 |
| **Densidade de Drenagem** | | | 1 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| **Solo** | | | | 1 | 5 | 5 | 7 |
| **Precipitação** | | | | | 1 | 4 | 3 |
| **Declividade** | | | | | | 1 | 2 |
| **Uso do solo** | | | | | | | 1 |

Tabela 3.7. Pesos dos parâmetros utilizados na elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas.

| **Parâmetros** | **Pesos (AHP)** |
|---|---|
| Permeabilidade | 0,3994 |
| Densidade de Lineamentos | 0,2384 |
| Densidade de Drenagem | 0,1554 |
| Solo | 0,1079 |
| Precipitação | 0,0511 |
| Declividade | 0,0268 |
| Uso do solo | 0,0211 |

A integração desses mapas e a aplicação do método AHP num ambiente SIG permitiram a elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas. A Razão de Consistência (CR) encontrada para a matriz de comparação do AHP foi de 0,03. Os resultados desta modelagem são apresentados no mapa da figura 3.14.

Comparando o mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas com o mapa geológico da área, observam-se correspondências entre as categorias de potencial e as unidades mapeadas. Verifica-se que as Coberturas Recentes formadas pelos sedimentos de praia e aluvião apresentaram potencial alto a muito alto, devido às características de permeabilidade media a alta dos sedimentos.

Já nas áreas correspondentes a Formação Barreiras observa-se um potencial hidrogeológico heterogêneo, variando de baixo a alto, devido à presença de camadas impermeabilizantes de argila que dificultam a passagem da água, como também a presença de solos mais argilosos. Nas áreas de alto potencial, nota-se uma maior densidade de lineamentos estruturais que favorecem a infiltração e transmissão da água precipitada para os reservatórios subterrâneos.

Os membros Maruim da Formação Riachuelo e o Sapucari da Formação Cotinguiba apresentaram potencial de alto a muito alto, devido à variação da permeabilidade dos seus litotipos, que se alternam de média a alta, a depender da evidência de dissolução e fraturamento das rochas carbonáticas. O potencial baixo a médio do membro Angico da Formação Riachuelo está relacionado com às heterogeneidades dos arenitos (finos a conglomeráticos) na presença de cimento calcífero. O membro Taquari da Formação Riachuelo e o Cornubianito Traipu apresentaram potencial muito baixo, devido às características de porosidade/permeabilidade praticamente nulas dessas unidades.

As vazões médias calculadas pelo banco de dados simplificados dos poços, presentes no anexo 1, confirmaram o potencial dos aquíferos Maruim, Sapucari e Barreiras, uma vez que são os mais explorados na sub-bacia hidrográfica, destacando-se o Sapucari com vazão média de 78113 L/h (78,113 $m^3$/h) e o Barreiras com o maior número de poços de captação de água subterrânea e vazão média de 19332 L/h (19,332 $m^3$/h), respectivamente. Já o Aquífero Maruim, concentra-se em torno de 12085 L/h (12,085 $m^3$/h).

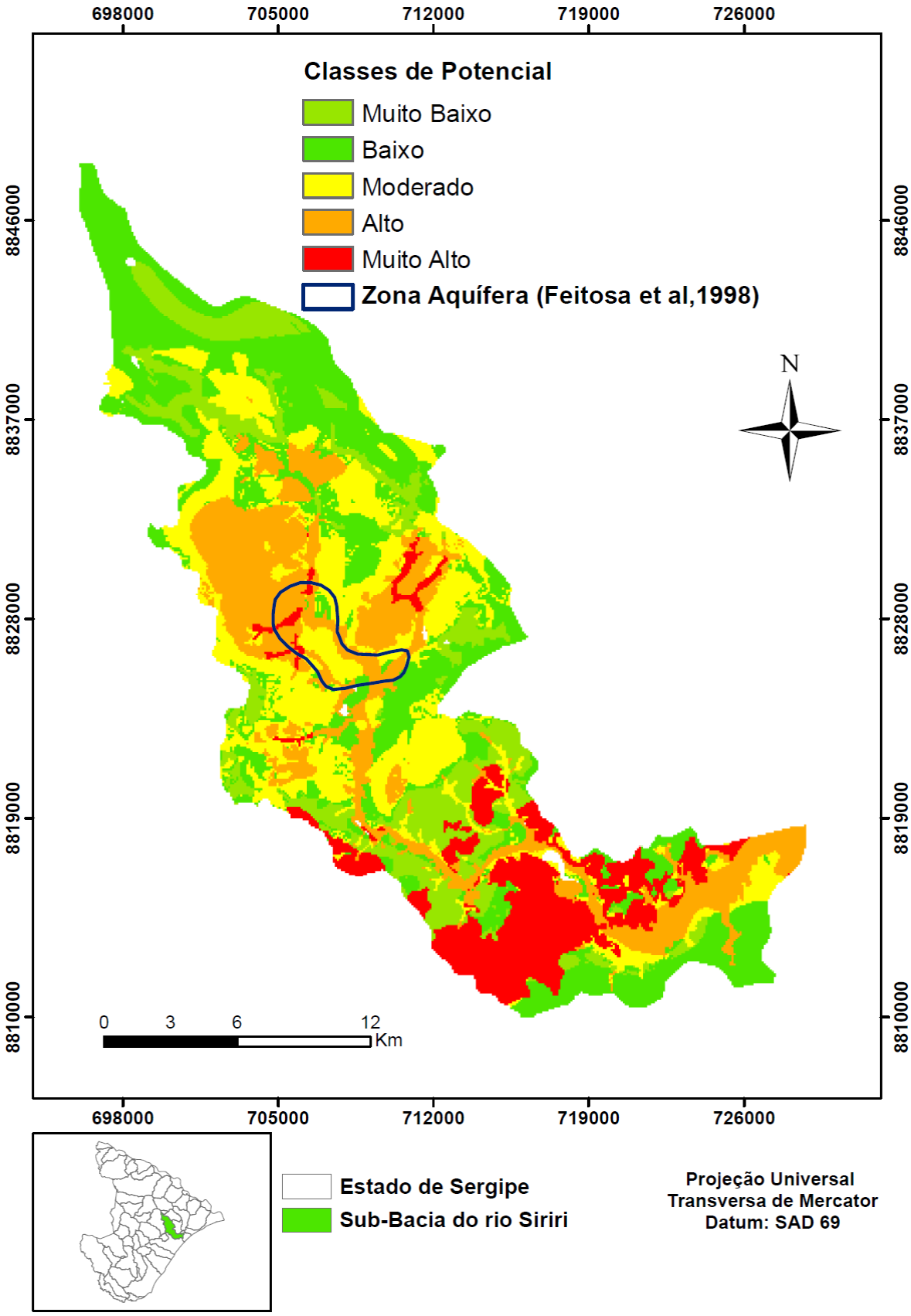



Figura 3.14. Mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas.

# 4 MODELAGEM DA VULNERABILIDADE E PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

## 4.1 Introdução

A exploração excessiva, a ocupação irregular do solo e a ausência de mecanismos normativos legais põem em risco a qualidade natural das águas subterrâneas. Um dos grandes problemas que está associado à exploração deste recurso hídrico refere-se à contaminação de sua qualidade natural, ocasionada pela ação antrópica.

Como exemplo, podemos citar a exploração mineral e a expansão da cana-de-açúcar que revelam preocupação, no que diz respeito à preservação do meio ambiente. Segundo SEMARH/PROJETEC/ TECHNE (2010a), poucas são as ações incrementadas na bacia do rio Japaratuba, que contemplam a sub-bacia do rio Siriri, voltadas para os aspectos de preservação e conservação do meio ambiente, sobretudo na destinação das águas residuais da exploração do petróleo e do uso incorreto da vinhaça produzida nas usinas de açúcar e de álcool.

O presente capítulo tem como objetivos: realizar a modelagem de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, a partir do método GOD e aplicar a metodologia POSH na identificação de fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas.

A importância deste capítulo encontra-se na elaboração dos mapas de vulnerabilidade e na identificação de atividades potencialmente contaminantes que permitem, a partir dos resultados obtidos, o desenvolvimento de pesquisas voltadas à qualidade das águas subterrâneas em áreas vulneráveis e com perigo de contaminação, como também deverá contribuir para o desenvolvimento de ações voltadas a gestão integrada dos recursos hídricos na sub-bacia do rio Siriri.

## 4.2 Vulnerabilidade e Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas encontram-se sob risco de contaminação devido aos processos de urbanização, de desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e da exploração mineral.

Segundo Foster et al. (2002), a utilização do conceito de vulnerabilidade teve início na década de 70, na França com Albinet e Margat (1970), sendo utilizado de maneira mais ampla na década de 1980 (FOSTER e HIRATA, 1993; ALLER et al.,1987).

A vulnerabilidade das águas subterrâneas corresponde à capacidade das características litológicas e hidrodinâmicas do aquífero, de impedir determinados impactos naturais ou antrópicos, como também pode ser definida, segundo Ribeira (2004), em uma série de atributos ou características do meio aquífero (como o solo, a zona não saturada, os parâmetros hidráulicos do aquífero e a recarga) que controlam a habilidade do aquífero de resistir a determinado impacto e sua capacidade de autorrestauração.

Para Hirata e Fernandes (2008, p. 405),

> a vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação pode ser definida em função de um conjunto de características físicas, químicas e biológicas da zona não saturada e/ou aquitarde confinante que, juntas, controlam a chegada do contaminante ao aquífero.

Foster (1987 *apud* FOSTER e SKINNER, 1995) considera a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como um conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua susceptibilidade de sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície.

O perigo de contaminação corresponde à possibilidade das águas subterrâneas sofrerem impactos negativos decorrentes de determinadas atividades humanas, a tal nível, que a água torne-se imprópria para o consumo humano, segundo os níveis de concentrações estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS). De fato, trata-se da interação entre a vulnerabilidade natural da água

subterrânea com a carga contaminante que é, será ou poderá ser aplicada por determinadas atividades humanas (FOSTER et al., 2002).

O conceito de perigo de contaminação das águas subterrâneas difere-se do risco, pois este último considera à relação do perigo com a escala de impacto na vida humana, no meio ambiente e no valor econômico dos recursos hídricos.

A avaliação do perigo de contaminação envolve a interação do mapa de vulnerabilidade com as atividades potenciais de gerar carga contaminante. As áreas que apresentam alta vulnerabilidade e a presença de atividades capazes de gerar carga contaminante são as situações mais preocupantes. Portanto, determinar tal perigo de contaminação é essencial para a proteção e gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que permite identificar as atividades potencialmente contaminantes, indicando ações necessárias para evitar e controlar possíveis contaminações.

A escala de trabalho da pesquisa, segue aquela definida por Foster et al. (2002) para a proteção das águas subterrâneas. Tais autores estabelecem o intervalo de escala entre 1:100.000 e 1:250.000 para o mapeamento da vulnerabilidade a contaminação e identificação de fontes potenciais de contaminação, e tem como aplicações o planejamento do uso do solo e o desenvolvimento de políticas públicas para o uso sustentável das águas subterrâneas.

### *4.2.1 Fontes Potenciais de Contaminação de Água Subterrânea*

Diversas atividades humanas representam perigo de contaminação das águas subterrâneas, como as atividades agrícolas, industriais, de exploração mineral, a urbanização, que são potenciais fontes de contaminação dessas águas.

As áreas urbanas apresentam um número significativo de atividades potencialmente contaminantes, sendo que, a principal preocupação é a carga contaminante no subsolo associada com saneamento sem rede de esgoto, como fossas sépticas em áreas residenciais com rede de ligação incompleta ou inexistente (FOSTER e HIRATA, 1993).

As práticas inadequadas de manejo do solo podem causar a contaminação das águas subterrâneas, com taxas elevadas de nitrato nos cultivos da soja, milho, arroz etc. Já as atividades industriais, devido à sua extrema diversidade e aos

obstáculos para se obter informações sobre os processos, apresentam maiores dificuldades em se estimar a carga poluidora. Geralmente, é possível fazer tal procedimento, baseando-se no volume do efluente gerado por determinada atividade, a partir da quantidade de água utilizada. Entretanto, é difícil estabelecer a proporção do total do efluente que está sendo infiltrado no subsolo (FOSTER e HIRATA, 1993).

Uma forma de classificar as fontes potenciais de contaminação está na aplicação do método *Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically (POSH),* proposta por Foster et al (2002). Esta metodologia permite a classificação das fontes potenciais de contaminação em três níveis: reduzido, moderado e elevado, considerando o tipo de atividade, sua capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada.

### *4.2.2 Metodologias de Cartografia de Vulnerabilidade*

As metodologias de determinação da vulnerabilidade de aquíferos são atualmente utilizadas como ferramenta de auxílio às propostas de proteção das águas subterrâneas, associadas a atividades de gestão dos recursos hídricos e de planejamento e ordenamento territorial.

Diversos métodos são utilizados na determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Dentre esses, os principais são: DRASTIC, GOD, TPE, Poluição dos Lençóis Aquíferos, Mapa de Vulnerabilidade e outros (HIRATA e REBOUÇAS, 2001), como também existem adaptações de métodos, a exemplo do DRATLu (FRANCÊS et al., 2001), que corresponde a uma adaptação do DRASTIC(ALLER et al., 1987); e o GODS (CUSTODIO, 1995), que trata de uma adaptação do método GOD (FOSTER e HIRATA, 1988).

Dos métodos citados, dois se destacam na determinação da vulnerabilidade: o “GOD”, que engloba a vulnerabilidade em geral (FOSTER e HIRATA, 1988); e o DRASTIC (ALLER et al., 1987). Este último foi desenvolvido pela *National Ground Water Association*, e é empregado pela Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana na avaliação do potencial de poluição das águas subterrâneas, utilizando as seguintes variáveis hidrogeológicas da área de estudo: **D-** Depth to Water (Profundidade da Água Subterrânea); **R**- Net Recharge (Recarga); **A**- Aquifer Media (Meio Aquifero); **S-** Soil Media ( Meio do Solo); **T**- Topography (Topografia); **I-**

Impact (Material) of Vadose Zone (Impacto da Zona Insaturada); **C-** Hidraulic Condutivity (Condutividade Hidráulica).

O GOD (FOSTER e HIRATA, 1993) corresponde a uma das técnicas de determinação de vulnerabilidade mais utilizadas devido à sua simplicidade de conceitos e implementação, já 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 (Quadro 4.1).

Quadro 4.1. Parâmetros considerados no método GOD.

| Parâmetro | Descrição |
|---|---|
| G (Groundwater hidraulic confinement) | Grau de confinamento do aquífero (surgente, confinado, semiconfinado, não confinado, nenhum). |
| Overlying Strata (vadose zone or confining beds) | Substrato litológico- caracterização do aquíferos, quanto ao seu grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes e natureza litológica. |
| Depth to groundwater table | Distância da água- profundidade do lençol freático (aquífero não-confinado) ou teto do aquífero (confinado). |

Fonte: FOSTER et al., 2002.

## 4.3 Materiais e Método

### *4.3.1 Procedimentos Metodológicos (Método)*

Para obtenção da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, o método “GOD” (Foster e Hirata, 1988) foi aplicado. As informações necessárias ao desenvolvimento deste estão disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia.

#### 4.3.1.1 <u>Método GOD</u>

O desenvolvimento do método **GOD** se dá nos seguintes fatores: confinamento do aquífero (G); natureza composicional da zona não saturada e/ou aquitarde e seu grau de fraturamento (O); profundidade do nível d’água ou da base confinante do aquífero (D).

Desta forma, o método aplica constantes entre 0 e 1 para cada variável. E o produto entre essas variáveis determina o índice de vulnerabilidade. Sendo que, todos os parâmetros apresentam o mesmo peso de importância sobre o índice final. A estimativa de vulnerabilidade pela metodologia GOD envolve as seguintes etapas (FOSTER et al., 2002):

- Identificar o tipo de confinamento da água subterrânea, com posterior indexação do parâmetro no intervalo de 0,0-1,0;
- Especificar os estratos de cobertura da zona saturada do aquíferos em termos de grau de consolidação levando-se em conta a possível presença ou ausência de permeabilidade por fissuras, e tipos litológicos, considerando indiretamente a porosidade efetiva, permeabilidade da matriz rochosa e teor de umidade da zona não saturada, assinalando-se uma segunda pontuação com intervalos de valores entre 0,4-1,0.
- Estimar a profundidade até o nível freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação entre os intervalos 0,6-1,0.

A equação que define o índice de vulnerabilidade é representada da seguinte forma:

**Índice de Vulnerabilidade GOD**= **Gi * Oi * Di**

Onde, **G O D** correspondem aos parâmetros e o **i** ao índice de classificação de cada parâmetro. A figura 4.1 apresenta o esquema de avaliação utilizado na estimativa da vulnerabilidade de aquíferos.

As classes de vulnerabilidade de aquíferos variam de desprezível à extrema, sendo que sua nomenclatura apresenta definição específica, que reflete a sensibilidade natural dos aspectos hidrogeológicos observados no estudo. Assim, as definições das diferentes classes de vulnerabilidade são apresentadas no quadro 4.2.

Exemplificando-se este processo de multiplicação, a geração do mapa de vulnerabilidade ocorre, partindo-se da álgebra de mapas dos critérios estabelecidos pelo GOD, presentes no modelo da figura 4.2.

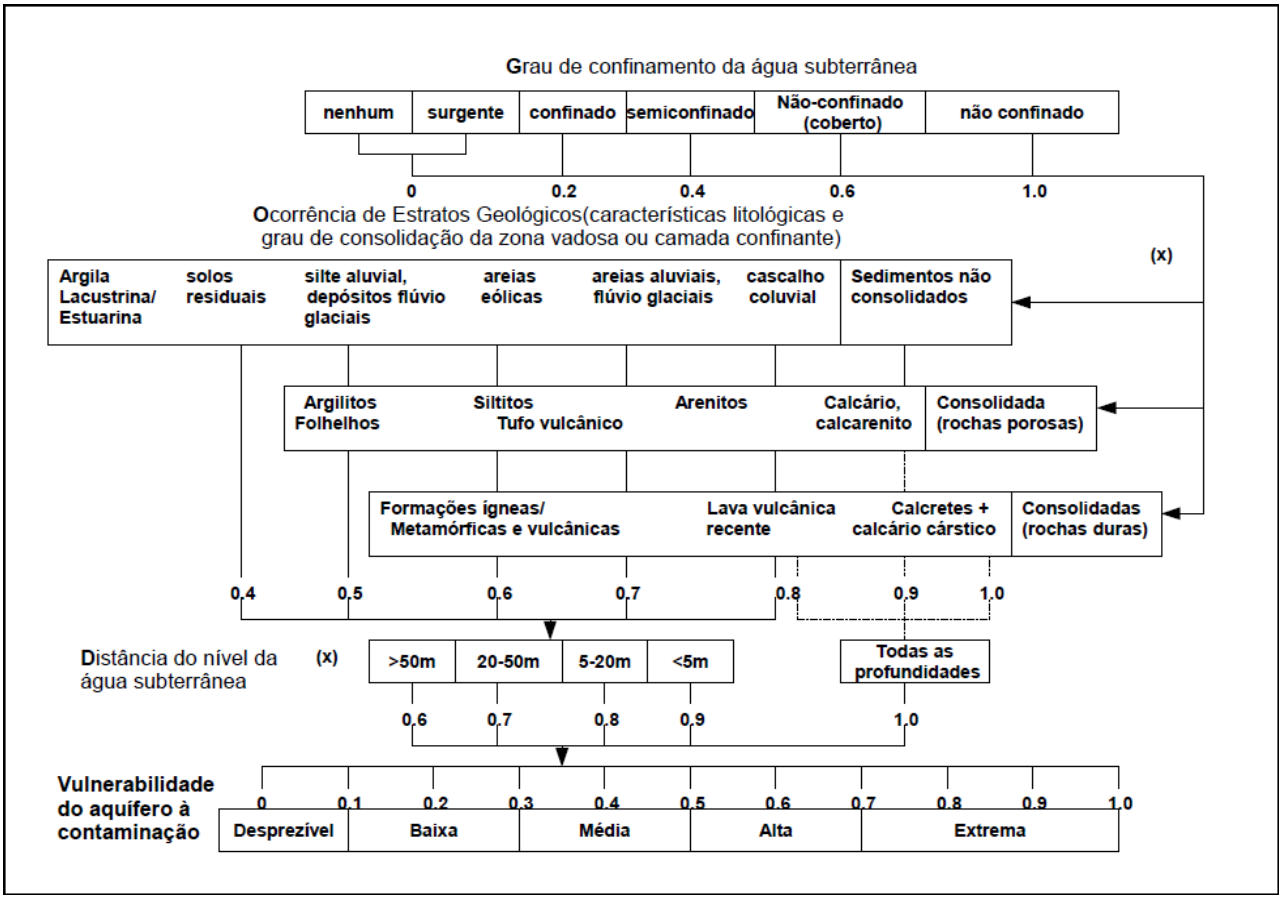



Figura 4.1. Sistema GOD de avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. (FOSTER et al., 2002).

Quadro 4.2. Definição das classes de vulnerabilidade do aquíferos.

| CLASSES DE VULNERABILIDADE | DEFINIÇÃO CORRESPONDENTE |
|---|---|
| **Extrema** | Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação |
| **Alta** | Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação |
| **Moderada** | Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados |
| **Baixa** | Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados |
| **Desprezível** | Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação). |

Fonte: Foster et al ., 2002.

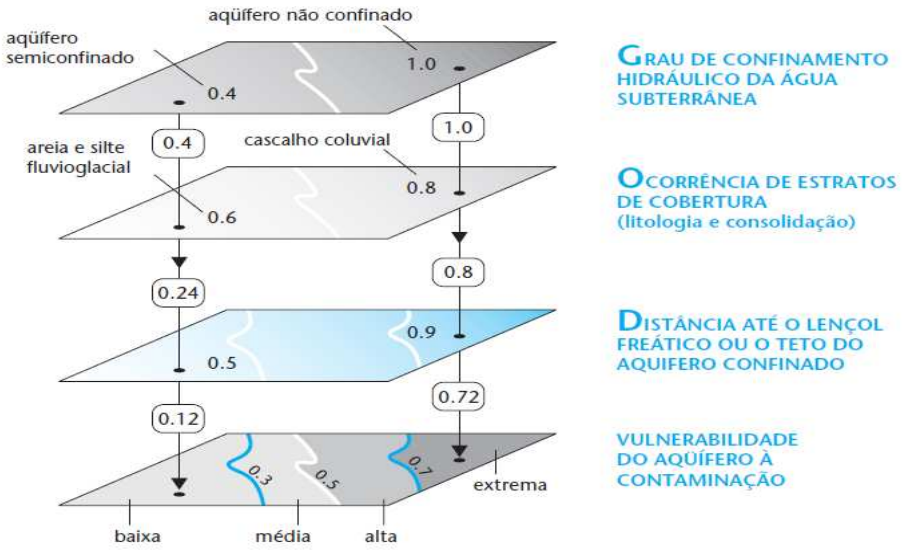



Figura 4.2. Modelo para a produção de mapa de vulnerabilidade utilizando o sistema **GOD** (FOSTER et al., 2002).

O primeiro plano representa as notas atribuídas ao grau de **C**onfinamento hidráulico em cada aquífero: 0,4, para o semiconfinado e 1,0, para o não confinado. No segundo plano, apresentam-se as notas referentes à **O**corrência do substrato litológico: 0,6 para areia e silte fluvioglacial e 0,8 para cascalho coluvial. O terceiro plano trata-se da **D**istância do nível da águas subterrânea: 0,6 para profundidades maiores que 50 metros e 0,9 para profundidades menores que 5 metros. Já o quarto plano, representa a álgebra de mapas (multiplicação) entre os planos de informações dos critérios **GOD**.

### 4.3.1.2 <u>Método POSH</u>

O método POSH *( Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically)* consiste numa metodologia de avaliação das atividades potencialmente contaminantes, pois permite a classificação das fontes potenciais em três níveis qualitativos (Quadro 4.3): elevado, moderado e reduzido. As atividades potenciais de contaminação consideradas mais relevantes para o estudo foram identificadas de acordo com os critérios apresentados em Foster et al. (2002), utilizando imagens de satélite, mapa de uso do solo e visitas no campo. Assim, para a classificação das atividades potencialmente contaminantes foram considerados os tipos de atividades e sua distribuição espacial.

Quadro 4.3. Correlação das atividades e potencial de geração de carga contaminante.

| POTENCIAL DE CARGA CONTAMINANTE NO SUBSOLO | Saneamento *in situ* | Práticas Agrícolas | Áreas Industriais | Outras (urbanas) | Mineração e exploração de petróleo |
|---|---|---|---|---|---|
| **Elevado** | Cobertura de rede de esgoto inferior a 25% e densidade populacional superior a 100 pessoas/ha | Culturas comerciais intensivas, geralmente monoculturas em solos bem drenados, em climas úmidos ou com baixa deficiência de irrigação, pasto intensivo em campos intensamente fertilizados | Oficinas de engenharia, refinarias de gás/petróleo, fábricas de produtos químicos/farmacêuticos/ plásticos/pesticidas, curtumes, indústrias eletrônicas, processamentos de metal | | Operações em campos de petróleo, mineração de metais |
| **Moderado** | Intermediário entre elevado e reduzido | Intermediário entre elevado e reduzido | Fábricas de borracha, fábrica de papel e celulose, indústrias têxteis, fábricas de fertilizantes, usinas elétricas, fábricas de detergente e sabão | Postos de gasolina, vias de transporte com tráfico regular de produtos químicos perigosos | Algumas atividades de mineração/extração de materiais inertes |
| **Reduzido** | Cobertura de rede de esgoto superior a 75% e densidade populacional inferior a 550 pessoas/ha | Rotação de culturas, terra para pasto extensivo, sistema de cultivo ecológico, plantações com alta eficiência de irrigação em regiões áridas e semi-áridas | Madeireiras, manufaturas de alimentos e bebidas, destilarias de álcool e açúcar, processamento de materiais não metálicos. | cemitérios | |

Fonte: Adaptado de Foster *et al* (2002).

### *4.3.2 Modelagem da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas*

Na modelagem da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, foram utilizadas como fonte de dados e informações para a aplicação dos índices **G** (grau de confinamento da água subterrânea) e **O** (ocorrência do subtrato geológico), o estudo de Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela (FEITOSA et al.,1998) e as cartas geológicas da Bacia Sedimentar de SERGIPE/ALAGOAS (DNPM/PETROBRAS, 1975), na escala 1:50.000.

Para o índice **D** (profundidade da água subterrânea) foi realizada a interpolação por *krigagem* ordinária dos dados de poços presentes no Projeto Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste- Sergipe (CPRM/SEPLANTEC, 2002), Atlas de Qualidade da Água Subterrânea no Estado de Sergipe, com fins de irrigação (EMBRAPA, 2007) e informações de poços com suas respectivas coordenadas presentes na base de dados desenvolvida por Feitosa et al. (1998). O banco de dados e o mapa dos poços utilizados na pesquisa são apresentados nos anexos 1 e 2.

#### 4.3.2.1 <u>Coleta de Informações sobre os Aspectos Hidrogeológicos</u>

As características hidrogeológicas necessárias para a aplicação do método GOD e modelagem da vulnerabilidade, que indicam a situação dos recursos hídricos subterrâneos da área de estudo, foram obtidas a partir de bases de dados e informações citadas no item anterior.

Uma revisão dos dados foi realizada e identificou-se que 60 poços apresentavam as informações necessárias para a aplicação do método GOD. Desta forma, um novo banco de dados simplificado foi elaborado em ambiente SIG (Anexo 1).

#### 4.3.2.2 <u>Procedimentos Cartográficos</u>

##### 4.3.2.2.1 Mapa Geológico

Para a representação dos aspectos litológicos da área de estudo, foram utilizadas as cartas geológicas da bacia de Sergipe/Alagoas (DNPM/PETROBRAS,

1975). Através de um Scanner, as cartas foram transferidas do meio analógico para o digital. Em seguida, foram realizados procedimentos de georreferenciamento e vetorização dos dados para a criação do mapa geológico da sub-bacia do rio Siriri. O mapa gerado foi reclassificado, sendo que neste processo, o Membro antes individualizado como Aguilhada, foi definido como parte do Membro Maruim devido a novas interpretações dadas por Feijó (1994).

4.3.2.2.2 Mapa de Variação do Nível Estático dos Poços

A técnica utilizada na construção deste mapa corresponde a geoestatística *Krigagem ordinária* que utiliza médias locais estimadas com elementos amostrais vizinhos. O objetivo desta técnica é encontrar um valor em uma certa posição $\mathbf{x_0}$, utilizando-se os **n** dados vizinhos $\mathbf{x_1}$, através de uma combinação linear com ponderadores $\boldsymbol{\lambda_i}$, e é dada pela seguinte equação (SILVA, 2003, p.176):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(x_0) Z(x_i)$$

Através do software ArcGis 9.3® foi realizada a interpolação por *krigagem ordinária* para a geração deste plano de informação e, o modelo de semivariograma adotado foi o linear. Em seguida, os valores gerados com os diferentes níveis estáticos foram reclassificados, atribuindo-se os valores definidos pelo GOD para os intervalos distintos de profundidade da água subterrânea.

4.4.2.2.3 Mapa de Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas (Método GOD)

Para a elaboração do mapa de vulnerabilidade foram estabelecidos os valores indicativos das características litológicas, do grau de confinamento e profundidade do nível da água subterrânea. Os valores determinados para os diferentes **G**raus de confinamento variaram de acordo com a resposta aquífera de cada unidade geológica. Já os valores de **O**corrência litológica, variaram conforme as características litológicas das unidades. A **D**istância do nível da água foi estabelecida de acordo com as diferentes profundidades do nível estático dos poços

de captação de água subterrânea. A figura 4.3 apresenta a modelagem realizada em ambiente SIG.

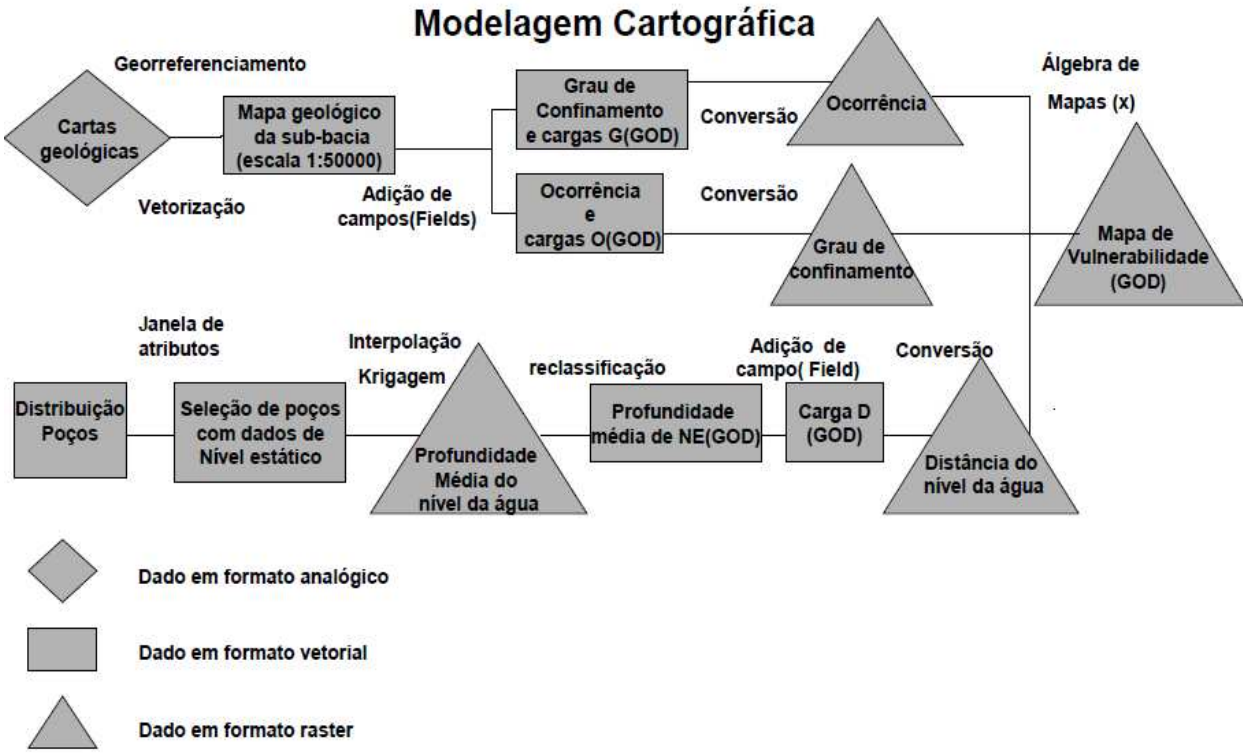



Figura 4.3. Modelagem cartográfica da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.

## 4.4 Resultados e Discussão

A aplicação do método GOD permitiu a criação da tabela 4.1, mostrando o índice de vulnerabilidade gerado para cada unidade aquífera e suas respectivas classes. A figura 4.4 apresenta os mapas dos índices GOD para a determinação da vulnerabilidade.

Na análise do mapa (Figura 4.4) gerado pelo GOD, observa-se que os critérios **G**(Grau de confinamento) e **O** (Ocorrência litológicas) tiveram maior influência na feição geral do mapa, devido às diferenças de valores entre as classes dos critérios utilizados. Já o critério **D** (Distância no nível da água), apresentou uma pequena influência na distribuição dos índices ocasionada pela variação dos valores das classes (<5m e entre 5 e 20m).

Tabela 4.1. Valores indicativos da vulnerabilidade de aquíferos a contaminação. ***Sem registro*

| **Grau do Confinamento Hidráulico** | ***G*** | **Características Litológicas** | ***O*** | **Distância do nível da água** | ***D*** | **Índice de Vulnerabilidade** | **Classes de Vulnerabilidade** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sedimentos de praia e aluvião: livre ou não-confinado | **1,00** | Sedimentos não consolidados. Aluviões de origem fluvial constituídos por clásticos, geralmente síltico argilosos. | **0,9** | <5m<br>5-20m | **0,85** | 0,765 | Extrema |
| Formação Barreiras: livre ou não confinado | **1,00** | Clásticos de cores variegadas representados por arenitos caolínico, mal consolidado, cascalho, lentes ou camadas de argila. Na superfície ocasionais, matacões | **0,65** | <5m<br>5-20m | **0,85** | 0,5525 | Alta |
| Formação Riachuelo-Membro Angico: livre à semiconfinado | **0,7** | Arenito branco fino a conglomerático | **0,7** | 5-20m | **0,8** | 0,392 | Média |
| Formação Riachuelo-Membro Maruim: confinado à semiconfinado | **0,3** | Calcário oolítico branco; calcário oolítico e pisolítico cinza-claro a amarelo-claro; calcário creme. Arenitos, siltitos e folhelhos são litologias subordinadas | **0,8** | 5-20m | **0,8** | 0,192 | Baixa |
| Formação Cotinguiba-Membro Sapucari: confinado | **0,2** | Calcário cinza a creme | **0,8** | 5-20m | **0,8** | 0,128 | Baixa |
| Formação Riachuelo-Membro Taquari: nenhum | **0,00** | Folhelhos cinzentos e calcários interestratificados em camadas médias a delgadas | **0,5** | ** | **0,00** | 0,00 | Desprezível |
| Cornubianito Traipu: nenhum | **0,00** | Biotita e granada. Cornubianito ou granada micaxisto, cinza prateado. | **0,6** | ** | **0,00** | 0,00 | Desprezível |

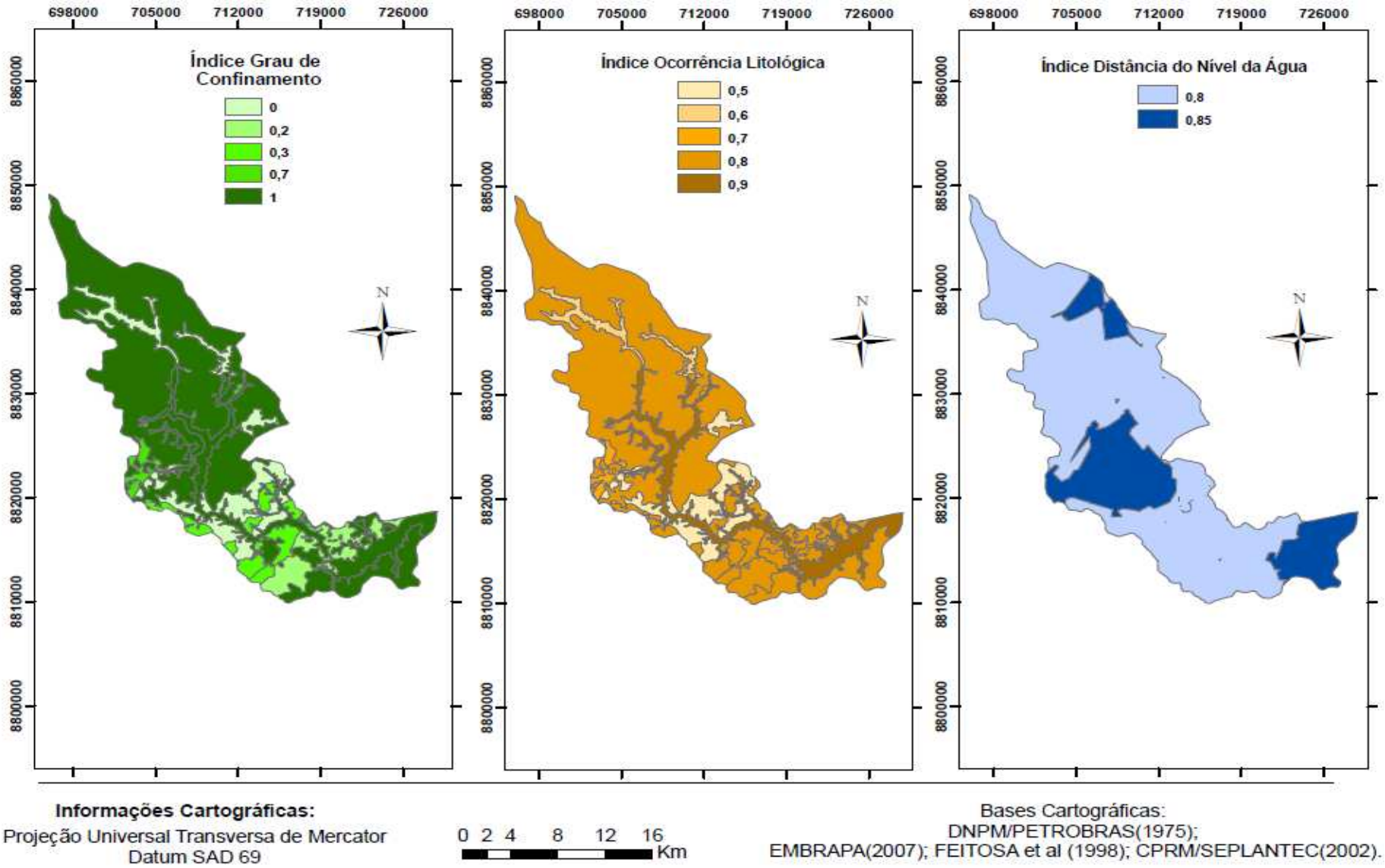



Figura 4.4 Mapas de índices GOD de avaliação de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.

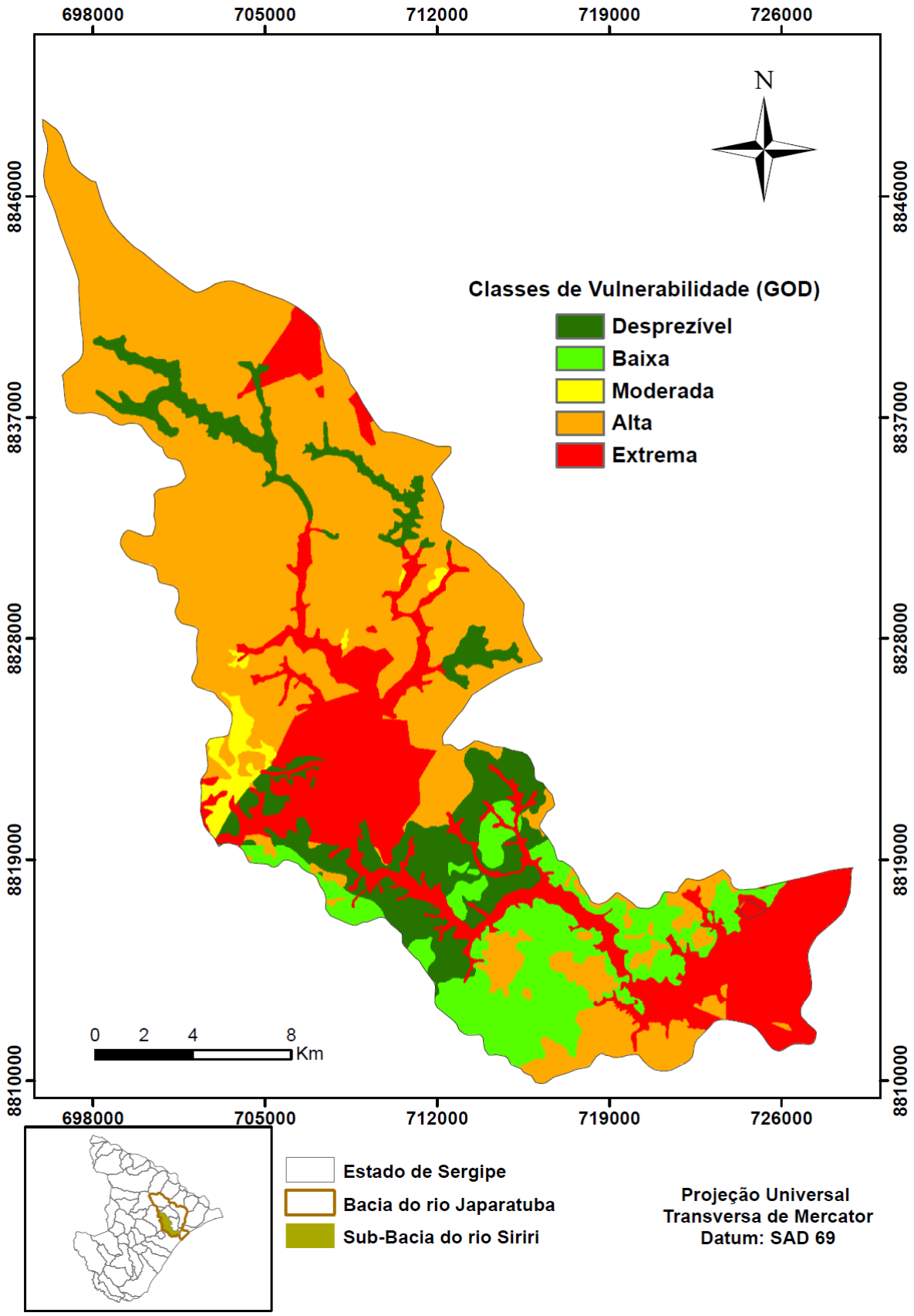



Figura 4.5. Mapa de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas a partir do método GOD.

Observou-se que os aquíferos livres formados pelos sedimentos de praia e aluvião e a formação Barreiras apresentam os maiores índices de vulnerabilidade (extrema e alta respectivamente), em razão de suas características litológicas, ao confinamento livre e as profundidades rasas do nível da água.

O aquífero Angico mostra-se com vulnerabilidade média, em decorrência do seu grau de confinamento, que varia de não confinado a semiconfinado, e a profundidade do nível da água. Já os aquíferos Sapucari e Maruim, possuem uma vulnerabilidade baixa devido ao tipo de confinamento (semiconfinado a confinado) dessas unidades.

O membro Taquari da Formação Riachuelo e o Cornubianito Traipu apresentam vulnerabilidade desprezível, uma vez que suas características litológicas representativas de rochas com permeabilidade/porosidade praticamente nulas não permitem o armazenamento de água.

Partindo para as classes de vulnerabilidade alta e extrema, verificou-se que elas envolvem cerca de 75,1% (Tabela 4.2) da área total da sub-bacia, sendo, então, vulneráveis à grande parte dos contaminantes, o que implica a necessidade de estudos de qualidade da água subterrânea e planejamento de uso e ocupação do solo. Já as classes baixa e moderada abrangem 23,33% da área, com características vulneráveis a determinados contaminantes, quando lançados continuamente, no caso da moderada; e a longo prazo, na baixa. A classe desprezível representa 12,25% da área total e, devido à presença de camadas confinantes, não apresenta riscos de contaminação.

Tabela 4.2. Classes de vulnerabilidade e suas respectivas áreas de abrangência.

| Classes de Vulnerabilidade (GOD) | Área $Km^2$ (%) |
|---|---|
| **Desprezível** | 51,00 (12,25%) |
| **Baixa** | 46,12 (11,08%) |
| **Moderada** | 6,51 (1,56%) |
| **Alta** | **213,75 (51,35%)** |
| **Extrema** | **98,88 (23,75%)** |

### *4.4.1 Perigo de Contaminação das Águas Subterrâneas*

O perigo de contaminação trata da integração entre a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas e a carga potencialmente contaminante que poderá atingi-la. A classificação das fontes potenciais de contaminação foi realizada a partir do método POSH (FOSTER et al., 2002), que considera fontes de contaminação tais como: áreas industriais, mineração, exploração de petróleo, práticas agrícolas, atividades urbanas etc.

Para a aplicação da metodologia, foi utilizado o mapa de uso do solo da área de estudo na escala 1:25.000 e imagens do satélite Landsat 5 TM (data do imageamento: 03 de abril de 2009). Além disso, foram identificadas no campo fontes potenciais de contaminação.

A partir do mapa de uso do solo e das imagens de satélite, identificaram-se pontos com elevado potencial de gerar carga contaminante, como a exploração de petróleo. No campo, foram classificados pontos com elevado potencial, tais como: a presença de dejetos plásticos em riacho próximo a nascente do rio, no município de Siriri, lançamento de esgoto diretamente no rio e dutos enterrados nas proximidades do manancial no município de Rosário do Catete.

A figura 4.6 mostra a distribuição das atividades com elevado, moderado e reduzido potencial de gerar carga contaminante. É importante destacar que devido às dimensões da área, deu-se prioridade a identificação de áreas com elevado potencial, de acordo com a metodologia POSH, como também a presença de grandes propriedades (fazendas) que dificultaram a identificação de outras atividades com potencial de gerar carga contaminante. O mapa de uso do solo em escala de detalhe (1: 25.000) permitiu o reconhecimento espacial das atividades potencialmente contaminantes.

As áreas representativas do cultivo da cana-de-açúcar foram identificadas com potencial moderado, uma vez que representam cultivo de irrigação com categoria de distribuição difusa e sobrecarga hidráulica moderada. As pastagens foram classificadas com potencial reduzido, tendo em vista a utilização da terra para o pasto extensivo. Já a exploração mineral, apresentou potencial elevado em decorrência das operações dos campos de petróleo e mineração de metais, na área de estudo. Também foram classificadas como fontes de potencial elevado, a

presença de lixo e esgoto sendo lançados diretamente no manancial no município de Rosário do Catete.

A interação entre a vulnerabilidade e as atividades com carga potencial de contaminação (Figura 4.7) mostram um resultado negativo nas áreas representativas da formação Barreiras e dos sedimentos de praia e aluvião, em razão da presença de atividades com elevado potencial, como a extração mineral e esgoto despejados diretamente no rio.

Quanto ao cultivo da cana-de-açúcar, apresenta moderada capacidade de geração de contaminantes, porém sua localização em áreas de alta vulnerabilidade eleva o perigo de contaminação.

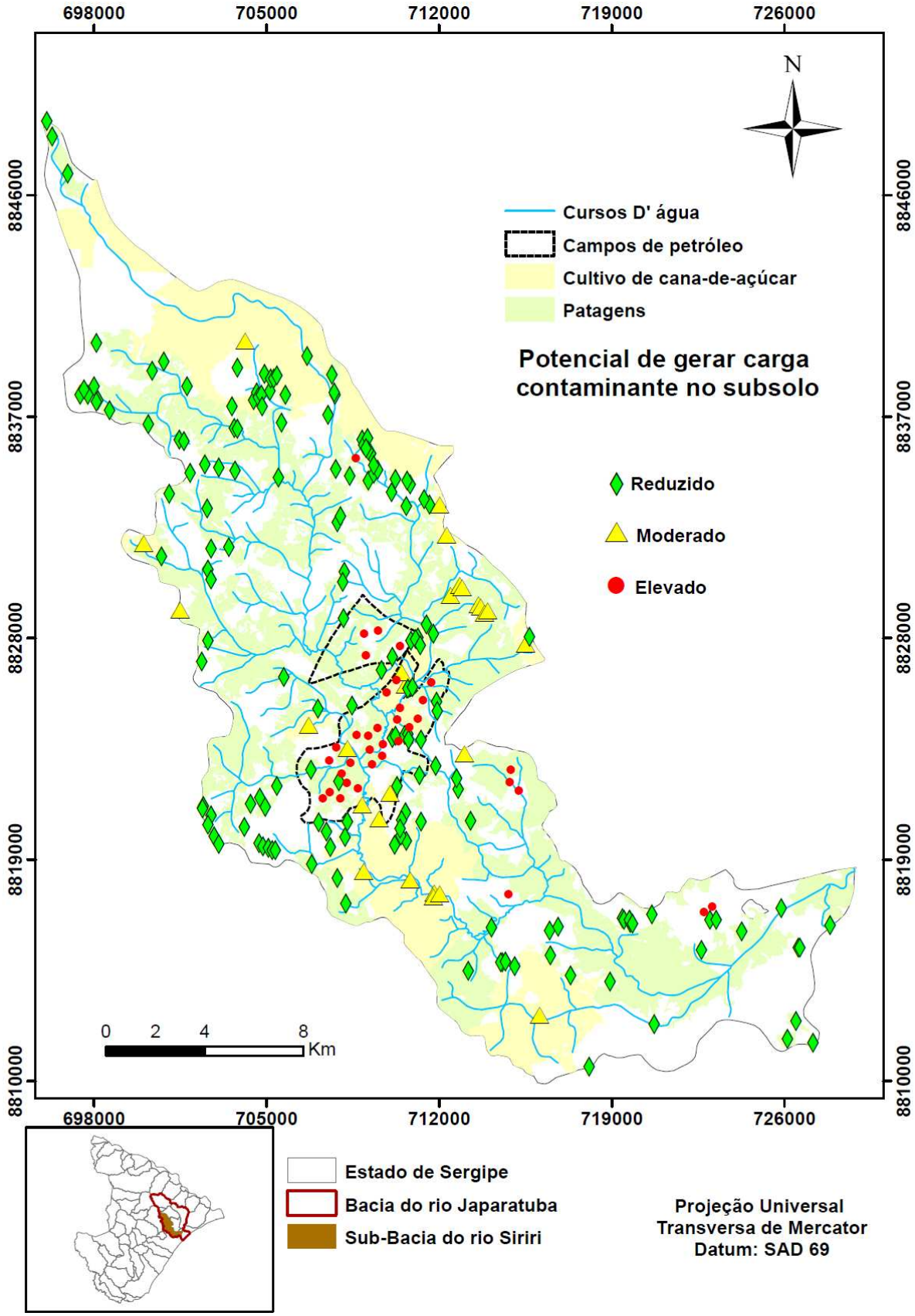



Figura 4.6 Atividades com carga potencial de contaminação.

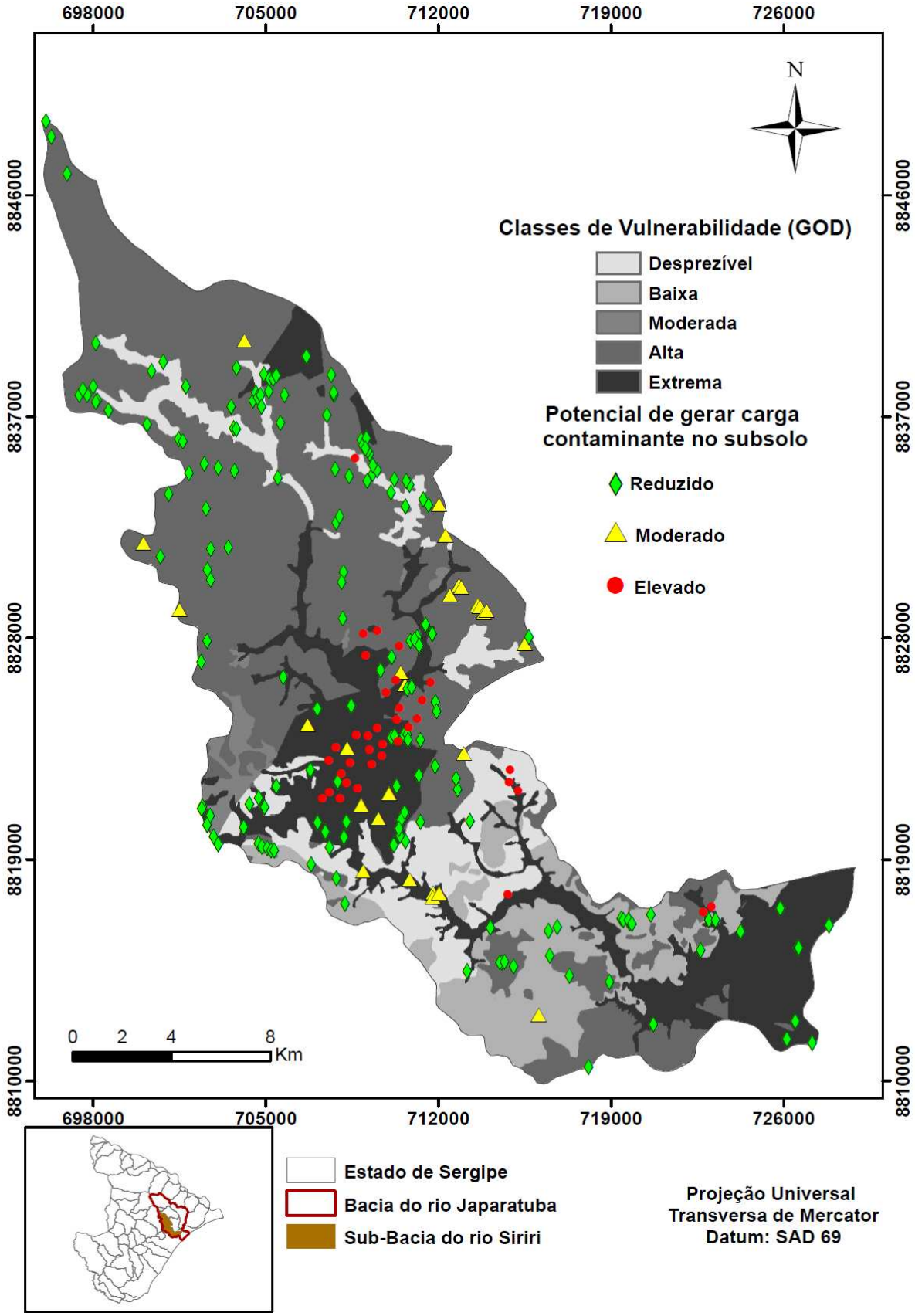



Figura 4.7 Cruzamento dos mapas das atividades com potencial de contaminação e a vulnerabilidade das águas subterrâneas.

# 5 CONCLUSÕES

Para organizar as bases de dados necessárias ao entendimento da potencialidade hídrica e vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, foi criado um cadastro de poços simplificado a partir de dados obtidos (anexo 1), como também foi construída uma base de dados cartográfica contendo os planos de informações referentes aos critérios utilizados nas modelagens. O cruzamento dessas informações em ambiente SIG permitiu a definição dos modelos de vulnerabilidade e potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri.

A potencialidade hidrogeológica observada na sub-bacia do rio Siriri revela as heterogeneidades potenciais das diferentes unidades aquíferas, geradas a partir das características de permeabilidade das rochas e dos aspectos físicos da sub-bacia, que permitem a infiltração da água precipitada para os reservatórios subterrâneos. Neste sentido, destacam-se os aquíferos Sapucari e Barreiras com as maiores vazões. Este último, apresenta o maior número de poços de captação de água subterrânea. Logo, requer maior atenção no que diz respeito à vulnerabilidade e perigo de contaminação.

Os Sistemas de Informações Geográficas e as técnicas de Sensoriamento Remoto têm sido constantemente utilizados na pesquisa hidrogeológica. A sua aplicação em estudo de bacias hidrográficas, particularmente na sub-bacia do rio Siriri, auxilia no desenvolvimento de uma gestão de recursos hídricos subterrâneos sustentável, uma vez que promove a interação do ambiente subterrâneo com o superficial.

A elaboração do mapa de vulnerabilidade constitui uma das etapas, na qual as atividades de gestão e proteção da água subterrânea possam apoiar-se, orientando os profissionais de planejamento ambiental e territorial, no que diz respeito à criação de estudos de monitoramento dos perigos de contaminação e de qualidade da água, com posterior definição de áreas de proteção e controle de utilização das águas subterrâneas.

A partir dos dados gerados na pesquisa, observa-se que a metodologia GOD demonstra potencial na análise da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, uma vez que permitiu com auxílio de um sistema de informações

geográficas, a delimitação das áreas mais susceptíveis a contaminação, além de despertar a preocupação com relação à possibilidade de contaminação das águas dos aquíferos freáticos ou não confinados, especialmente as áreas em que a zona vadosa é pouco espessa e o nível freático é raso, como a dos aquíferos representativos da formação Barreiras e dos sedimentos de praia e aluvião classificados com vulnerabilidade alta e extrema, respectivamente.

Assim, conclui-se que o mapa gerado na modelagem da vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas pode auxiliar na tomada de decisões que objetivem a proteção da qualidade das águas, frente às limitações técnicas e financeiras para a remediação de possíveis contaminações. Além disso, permitem uma melhor avaliação por parte dos profissionais relacionados ao planejamento ambiental e territorial.

Recomenda-se nas áreas classificadas com vulnerabilidade extrema, alta e moderada, a tomada de ações e precauções que evitem a infiltração de possíveis contaminantes relacionados à exploração mineral e as atividades agrícolas, como também devem ser instalados sistemas adequados de tratamento de efluentes domésticos, uma vez que a carga potencialmente contaminante pode ser controlada ou alterada, enquanto que a vulnerabilidade do aquíferos é fundamentalmente determinada por suas características hidrogeológicas.

Os mapas de vulnerabilidade e perigo de contaminação gerados nesta pesquisa fornecem uma estrutura geral de apoio à proteção dos recursos hídricos subterrâneos, porém, não deve ser excluída a necessidade de detalhamento das atividades potencialmente contaminantes, no que diz respeito à confirmação de contaminações frente ao monitoramento de qualidade da água, antes de serem decididas políticas públicas. Tais mapas foram elaborados com base nas melhores informações disponíveis no período da pesquisa e, necessita de atualizações periódicas, tendo em vista o crescente número de perfurações de poços e de atividades potencialmente contaminantes.

Assim, a partir do que foi apresentado, torna-se importante o desenvolvimento de pesquisas em detalhes sobre os sistemas aquíferos, principalmente de monitoramento qualiquantitativo desses mananciais, e estudos para a delimitação de áreas de controle de uso das águas subterrâneas frente à vulnerabilidade e o perigo de contaminação das águas subterrâneas, como também de ações e programas de

educação ambiental que objetivem a conservação, o uso e controle dos recursos hídricos.

Por fim, a caracterização da potencialidade, disponibilidade, vulnerabilidade, fontes de contaminação e do uso e ocupação do solo são fatores essenciais para o uso sustentável das águas subterrâneas. A realização de estudos de reconhecimento hidrogeológico, que incluam a vulnerabilidade natural e o perigo de contaminação, são requisitos importantes para o desenvolvimento de uma gestão de recursos hídricos, ambiental e territorial de qualidade.

# 6 BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Diagnóstico da Oferta de água bruta e avaliação preliminar de alternativas técnicas no Estado de Sergipe- Parte B** . Brasília-DF, 2005a. 76p.

ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cadernos de Recursos Hídricos- Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília-DF, 2005b. 80p.

ALLER, L., LEHR, Jay H., PETTY, R. DRASTIC: **A Standardized system of evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings**. United States: EPA, 1987. Disponível em:< http://info.ngwa.org/GWOL/pdf/860138698.PDF> Acesso em: 5 jun. 2009.

ALBINET, M.; MARGAT, J. 1970. **Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine**. *Bulletin BRGM 2ndSeries* 3(4): 13–22. Orleans, França.

BARBOSA J.S.F., NASCIMENTO, Sérgio A. de M. **Qualidade da Água do Aquíferos Freático no Alto Cristalino de Salvador, Bacia do Rio Lucaia, Salvador, Bahia**. Rev. Bras. De Geologia, 2006, v.35. p. 543-550.

BARAÇAS, Francisco. J. L.; MACHADO, João. P. A. **A ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA TOMADA DE DECISÃO – O MÉTODO ANALÍTICO HIERARQUICO DE T.L.SAATY: PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS E SEU DESENVOLVIMENTO.** Instituto Politécnico de Coimbra-Departamento de Engenharia Civil, 2006.

BONHAM-CARTER, Graeme F. **Geographic information systems for geoscientists :** modelling with GIS. New York: Pergamon, c1994. 398 p.

BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Águas Subterrâneas** In: AQÜIFERO GUARANI. Curitiba, 2004. Disponível em:< http://www.abas.org.br > Acesso em: 19 mar. 2009.

BRANDÃO, R. L.; GOMES, F.E.M. **Técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas na avaliação do potencial higrogeológico da folha Iraucuba**. Revista de Geologia, Fortaleza, v. 16. n. 1, 2003.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. 1988.

BRASIL. LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, 1997.

BURROUGH, P.A.; McDONNEL, R. A. **Principles of geographical information systems: Spatial Information Systems and Geoestatistics**. Oxford. Oxford University Press, 2000, 333 p.

CARVALHO, M.E.S.; FONTES, A.L. **CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA ZONA COSTEIRA DO ESTADO DE SERGIPE.** In: Simpósio Nacional de Geomorfologia/ Regional Conference on Geomorphology, VI, 2006, Goiás.

**CETESB** - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Variáveis de Qualidade das Águas.** Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp Acesso em: 11 jul. 2010.

CLEARY, Robert. W. **Águas Subterrâneas**. Ed. Marques-Saraiva. Clean Environment Brasil, Princeton Groundwater, INC, 1989. 112 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) /COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL DE SERGIPE (CODISE). **Mapa Geológico do Estado de Sergipe**. Brasília, 1997.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)/ SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (SEPLANTEC). **Projeto Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste- Sergipe**. Aracaju: CPRM, 2002.

CRHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo. Ed. Edgard Blucher,1999.

CROSTA, Álvaro, P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**.ed.rev.Campinas, SP. IG/UNICAMP, 1993,1992.

COSTA, W. D. **Uso e Gestão das Águas Subterrâneas**. In: FEITOSA, Fernando. C (org). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro:CPRM:LABHID, 2008. 812p.

CRUZ, M. A. S.; RESENDE, R. S.; AMORIM, J. R. A. **Regionalização de parâmetros de qualidade das águas subterrâneas para irrigação no estado de Sergipe**. Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2008. 58 p.

CUSTODIO GIMENA, Emilio. **Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución.** In: II Seminario Hispano – Argentino

sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica # 11:99-122. San Miguel de Tucumán: 1995.

DECANINI, Mônica. M. S. DTM (Digital Terrain Models) **Modelo Digital do Terreno e Hillshading (Sombreamento).** Disponível em: < www2.fct.unesp.br/cartografia/cartografiaII/.../HILLSHADING2.pdf>. Acesso em: 03 out. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL- DNPM/ PETROBRAS-Petróleo Brasileiro S.A/. **Cartas Geológicas da Bacia Sergipe/Alagoas**. 1975.

DUARTE,U. **Geologia ambiental da área de São Pedro, SP: vetor águas subterrrâneas**, 1980. 73p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Brasília, CNPS, 1999. 412p.

EMBRAPA. **Atlas de Qualidade da Água Subterrânea no Estado de Sergipe com Fins de Irrigação**. Aracaju, 2007. CD-Room.

EVANS, M. John. **The Water Cycle**. U.S. Geological Survey. Disponível em: <http ://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>. Acesso em: 04 out. 2009.

FEIJÓ, Flávio J. **Bacias de Sergipe e Alagoas.** In: Boletim de Geociências da PETROBRAS, nº 1, Vol. 8. PETROBRAS/CENPES/SINTEP, Rio de Janeiro, jan/mar/1994, p. 149-161.

FEITOSA, Edilton. C(Coord.).; FILHO, J. M., DEMÉTRIO, J. G. A., SANTOS, R.Q., SANTOS, M. A. V., AGUIAR, N. F., DEMÉTRIO, J. A. **Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela**. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE.PETROBRAS, 1998. 175 p.

FILHO, J. M. **Ocorrência das Águas Subterrâneas**. In: In: FEITOSA, Fernando. C (org). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro:CPRM:LABHID, 2008. 812p.

FILHO, Clódis de, O, A.; FONSECA, Leila, M, G. **Lineamentos Estruturais a partir de imagens Landsat TM e dados SRTM**. In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV, 2009, Rio Grande do Norte. Anais...INPE, p. 3151-3158.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Determinação do Risco de Contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

FOSTER, S. S. D. ; SKINNER, A. C. **Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning**. *Groundwater Quality: Remediation and Protection* (Proceedings of the Prague Conference, May 1995). IAHS Publ. no. 225, 1995.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. (2002). **Groundwater Quality Protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies**. Washington, D.C, The World Bank, 2002. 114 p.

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 agricultural pollution: the susceptibility index**. In: 3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk, Lisboa (Portugal), 25 - 27 Jun., 2001.

GOIÁS (Estado)- SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO/SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia, 2006. 232 p.

GOMES, F. E. M. **Geoprocessamento em Ambiente SIG aplicado a Hidrogeologia**. In: FEITOSA, Fernando. C(org). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.812 p.

GONÇALVES, D.; CAMPOS, J. E. G. BATISTA, T.; DINIZ, N.; TARGA, M. S. **Metodologia para elaboração de mapas hidrogeológicos: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio da Palma, DF, Brasil**. Rev. Ambi-Água, Taubaté, v.2, n.2, p. 47-68, 2007.

HIRATA, R. **Os Recursos Hídricos Subterrâneos e as Novas Exigências Ambientais**. Revista do Instituto Geológico, SÃO PAULO, v. 1, n. 14, p. 39-62, 1993.

HIRATA, R. REBOUÇAS, A. C. **La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. 2001. Disponível em: http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/technology/857.html**. Acesso: 21 jun. 2010.

HIRATA, R. FERNANDES, J.A. **Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos.** In: FEITOSA, Fernando. C (org). Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Rio de Janeiro:CPRM:LABHID, 2008. 812p.

INSTITUTO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA); SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO

(SEPLAN). **Mapa: Qualidade e Disponibilidade de Águas Subterrâneas da Folha Aracaju: SC.24.Z-B-IV**. Aracaju, 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

Krishnamurthy, J .; Venkatesa Kumar, N.; Jayaraman, V.; Manivel, M. 1996. **An Approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and a geographical information system**. International Journal of Remote Sensing, 7, 1867-1884.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspective em recursos terrestres.** Tradução por José Carlos Neves Epiphanio (coordenador). São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

LEITE, Lilian Vanderley. 1976. Climas de Sergipe e classificação climática. In: *Zoneamento Ecológico Florestal do Estado de Sergipe* (CAP. I) Aracaju: SUDENE/CONDESE.

MARTINI, P.R. **Imagens para mapeamento geológico e levantamento de recursos minerais: resumo para uso dos centros de atendimento a Usuários-atus do Inpe**. In: Sensoriamento Remoto no Estudo do Meio Ambiente. São Paulo. INPE, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Recursos Hídricos-Programa Nacional de Águas Subterrâneas. Brasília. MMA, 2009. 52p.

MIRANDA, E. E. DE; (Coord). Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em:http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br. Acesso em: 3 abr.2010.

MUSA, K, A .; JUHARI, M, A.; ABDULLAH, I. **Groundwater Prediction Potential Zone In Langat Basin Using the Integration of Remote Sensing and GIS**. IN: Conferência Asiática de Sensoriamento Remoto, 21.,2000, Taiwan.Disponível em:<http://www.remotesensing.gov.my/tmspublisher/images/default/bulletin02_khairulanam.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2009.

NETO, O. P. de A. C., LIMA, W. S., CRUZ, F. E. G. **Bacia de Sergipe-Alagoas**. In: Boletim de Geociências da Petrobras, n. 2, Vol. 15. Rio de Janeiro, 2007. p. 405-415.

NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto:** Princípios e Aplicações. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, Everton de.; SOUZA, J. C. S. de. **Água Subterrânea.** In: As Ciências da Terra e sua importância para a Humanidade: A contribuição brasileira para o Ano Internacional do Planeta Terra-AIPT. São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia, Livros Textos, 2008. p. 14-34.

REBOUÇAS, A. C.; FEITOSA, Fernando A. C.; DEMÉTRIO, José G. A. **Elementos de Hidrologia Subterrânea**. In: GIAMPÁ, C. E.Q.; GONÇALES, V.G(org). Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos. São Paulo: Editora Signus, 2006. 502p.

REBOUÇAS, A. C. **Águas Subterrâneas**. In: GIAMPÁ, C. E.Q.; GONÇALES, V.G(org). Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos. São Paulo: Editora Signus, 2006. 502p.

RIBEIRA, F. Calidad. **Contaminación y protection de acuíferos in III Curso Hispanoamericano de Hidrologia Subterránea**. 4 de octubre al 3 de diciembre de 2004, Montevideo-UY.

ROCHA, João, C.; CORREIA, Cibele de, O.; ROCHA, Sérgio, L. **Bacia Hidrográfica do rio Japaratuba: Uma visão da Gestão de Recursos Hídricos Frente ao Uso e Ocupação da Terra**. In: II ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE. Aracaju, 2009.

RUSSO, Alexandre de Silvio. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informação geográfica e geoestatística- UGRHI-PCJ.** São Paulo, 2009. 75 p. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).

SAMIZAVA, T.M., KAIDA, R.H., IMAI N.N., NUNES, J.O.R. **SIG aplicado à escolha de áreas potenciais para instalação de aterros sanitários no município de Presidente Prudente-SP**, 2008. *Revista Brasileira de Cartografia,* 60: 43-55.

SATTY, Thomas L. **How to make a decision: The Analitic Hierarchy Process**. European Journal of Operational Research, North-Holland, 1990, Vol.48, p. 9-26.

SEMARH (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Sergipe). **Planilha de Outorga da Bacia do rio Japaratuba**. Aracaju-SE, 2010.

SEMARH/PROJETEC/ TECHNE. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Sergipe- SEMARH/ Projetos Técnicos Ltda- PROJETEC/ Engenheiros Consultores Ltda- TECHNE. **ELABORAÇÃO DOS PLANOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS JAPARATUBA, PIAUÍ E SERGIPE- Diagnóstico Integrado da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba**. Aracaju-SE, Abril de 2010a, Vol. 1, p.69.

SEMARH/PROJETEC/ TECHNE. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Sergipe- SEMARH/ Projetos Técnicos Ltda- PROJETEC/ Engenheiros Consultores Ltda- TECHNE. **Relatório de Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Sergipe- Diagnóstico do Atual Estado da Arte da Gestão**. Aracaju-SE, Agosto de 2010b, p.69.

SERGIPE. Lei Nº 3.870 DE 25 DE DEZEMBRO DE 1997. POLÍTICA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, cria o Fundo Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências, 1997.

Secretaria de Planejamento e da Ciência e Tecnologia (SEPLANTEC)/Superintendência de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH). **Atlas Digital de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju, 2004. CD-Room.

SETTI, A. A. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos**. FREITAS, M. A.V.(org.)., LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M.; PEREIRA, I.C. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001, 226 p.

SILVA, Ardemírio Barros. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora da Unicamp, 2003.

SILVA, C.; Amir, Y.; Penna, Y. 1980. **Controle de poluição das águas subterrâneas na região do Vale do Paraíba**. In: CONG. BRAS. DE ÁGUAS SUBTERR., 1. Anais…Recife, ABAS.

SILVA, Ivo Lucio Santana Marcelino da. **Mapa preliminar da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação no estado de Sergipe**. Aracaju: UFS, 2007. ( Monografia de especialização, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe).

SILVERMAN, B.W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 1986.176p.

SpatialTechniques. **Easy Calculate 5.0**. Disponível em:< http://csi.cgiar.org/index.asp>, Acesso em: 14. out.2010.

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas(SP)**. São Paulo: USP Instituto de Geociências, 1972.(Publicação avulsa, n.1)

THIRUMALAIVASAN, D; KARMEGAM, M. **Aquifer Vulnerability Assessment Using Analytic Hierarchy Process and Gis For Upper Palar Watershed**. 22nd

Asian Conference on Remote Sensing. Singapure. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing(CRISP), 2001. Disponível em: http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/267THIRU.PDF.

WARD, A.D.; ELLIOT, W.J. **Environmental Hidrology**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 462p.

# ANEXO 1

# CADASTRO SIMPLIFICADO DE POÇOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

| Coordenada N (UTM) | Coordenada E (UTM) | MUNICÍPIO | BASE DE DADOS | AQUÍFEROS | VAZÃO (L/h) | NÍVEL ESTÁTICO (m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8841925,47 | 699272,00 | Nossa Senhora das Dores | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 6046 | 0,84 |
| 8841130,00 | 698346,00 | Nossa Senhora das Dores | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | ** | 14,30 |
| 8841042,00 | 697645,00 | Nossa Senhora das Dores | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 1486 | 28,10 |
| 8840660,00 | 699864,00 | Nossa Senhora das Dores | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 3684 | 14,00 |
| 8838938,77 | 699107,90 | Nossa Senhora das Dores | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 1633 | 1,50 |
| 8836868,00 | 702000,00 | Nossa Senhora das Dores | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 6230 | 0,84 |
| 8836188,00 | 702725,00 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 1430 | 13,89 |
| 8831334,58 | 699327,39 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 5539 | 33,70 |
| 8832220,75 | 700730,48 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 6000 | 5,00 |
| 8836651,56 | 706232,08 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 400 | 7,00 |
| 8834251,54 | 709038,27 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 260 | 0,68 |
| 8833876,00 | 709037,00 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 995 | 4,90 |
| 8831637,00 | 703246,00 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 1610 | 5,60 |
| 8829377,64 | 702908,96 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 4000 | 4,00 |
| 8830817,65 | 705198,22 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 5110 | 12,64 |
| 8828417,62 | 703278,20 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 3000 | 16,00 |
| 8827014,53 | 705161,30 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 995 | 4,90 |
| 8822887,00 | 707054,00 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 9659 | 0,00 |
| 8824063,00 | 710558,00 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 3960 | 9,78 |
| 8824694,12 | 710751,75 | Siriri | Feitosa et al. (1998) | Aquífero Barreiras | ** | 2,91 |
| 8832212,67 | 712267,92 | Capela | Feitosa et al. (1998) | Aquífero Barreiras | ** | 6,39 |
| 8828458,00 | 715511,00 | Capela | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 689 | 19,04 |
| 8822450,78 | 707843,32 | Divina Pastora | PETROBRAS | Aquífero Barreiras | 8160 | 4,81 |
| 8822398,21 | 707869,60 | Divina Pastora | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 8165 | 3,30 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8822235,00 | 708023,00 | Divina Pastora | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 8165 | 3,30 |
| 8817347,50 | 708950,57 | Maruim | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim | 1800 | 2,27 |
| 8820226,67 | 714930,74 | Rosário do Catete | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 16000 | 4,00 |
| 8817687,60 | 714058,42 | Rosário do Catete | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim | 2000 | 16,00 |
| 8816806,00 | 716196,00 | Rosário do Catete | EMBRAPA | Aquífero Maruim/Aguilhada | 2089 | 3,70 |
| 8813881,00 | 712379,00 | Rosário do Catete | EMBRAPA | Aquífero Maruim | 6236 | 13,22 |
| 8815164,11 | 718030,58 | Rosário do Catete | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 2800 | 2,00 |
| 8817033,36 | 718046,16 | Rosário do Catete | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 25000 | 10,00 |
| 8816396,65 | 720906,50 | General Maynard | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 130000 | 10,00 |
| 8816537,94 | 721204,05 | General Maynard | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 15840 | 10,40 |
| 8816637,00 | 723338,00 | General Maynard | EMBRAPA | Aquífero Sapucari | 2955 | 3,50 |
| 8817259,72 | 724421,57 | General Maynard | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 2955 | 3,50 |
| 8814972,48 | 725747,90 | Santo Amaro das Brotas | Feitosa et al. (1998) | Aquífero Barreiras | 58200 | 1,72 |
| 8813991,12 | 725283,50 | Santo Amaro das Brotas | Feitosa et al. (1998) | Aquífero Barreiras | 79200 | 1,08 |
| 8811294,00 | 717923,00 | Santo Amaro das Brotas | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 2380 | 10,00 |
| 8829349,67 | 698804,98 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 3000 | 3,80 |
| 8827272,73 | 696894,19 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 400 | 2,00 |
| 8824074,23 | 701712,70 | Siriri | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 1430 | 13,89 |
| 8816746,07 | 704976,97 | Divina Pastora | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim | 8000 | 5,00 |
| 8813295,74 | 706840,16 | Maruim | Feitosa *et al* (1998) | Aquífero Barreiras | 5250 | 22,83 |
| 8813198,26 | 707472,62 | Maruim | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 16000 | 12,00 |
| 8813710,48 | 708652,95 | Maruim | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim | 25000 | 20,26 |
| 8808275,59 | 719865,21 | Santo Amaro das Brotas | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 4400 | 18,30 |
| 8808566,36 | 720841,38 | Santo Amaro das Brotas | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 10285 | 1,00 |
| 8815067,21 | 728256,08 | Santo Amaro das Brotas | Feitosa et al. (1998) | Aquífero Barreiras | 85500 | 2,94 |
| 8818341,64 | 724905,06 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 5300 | 8,00 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8818505,20 | 725360,69 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 40000 | 5,00 |
| 8817979,47 | 719823,03 | General Maynard | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim/Aguilhada | 30000 | 3,00 |
| 8829306,26 | 718988,89 | Capela | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 1810 | 40,60 |
| 8.809.668,45 | 711.788,15 | Santo Amaro das Brotas | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 7200 | 19,00 |
| 8.822.010,39 | 719.167,30 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim | 11314 | 24,40 |
| 8.821.781,93 | 720.143,47 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Maruim/Aguilhada | 3500 | 13,00 |
| 8.821.283,46 | 721.119,63 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 12185 | 4,40 |
| 8.809.603,01 | 718.462,49 | Santo Amaro das Brotas | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Barreiras | 10285 | 3,55 |
| 8.831.350,02 | 703.219,80 | Siriri | EMBRAPA | Aquífero Barreiras | 269 | 27,70 |
| 8.818.465,36 | 724.942,92 | Carmópolis | CPRM/SEPLANTEC | Aquífero Sapucari | 9000 | 10,00 |
| 8815944 | 721145 | Rosário do Catete | EMBRAPA | Aquífero Sapucari | 158840 | 10,40 |
| 723.221 | 8.821.476 | Carmópolis | SRH | Aquífero Maruim | 27000 | ** |
| 709.882 | 8.823.131 | Rosário do Catete | SRH | Aquífero Maruim | 16000 | ** |
| 721.207 | 8.816.692 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 125000 | ** |
| 720.933 | 8.816.423 | Rosário do Catete | SRH | Aquífero Sapucari | 125000 | ** |
| 720.230 | 8.816.184 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 170000 | ** |
| 719.459 | 8.815.910 | Rosário do Catete | SRH | Aquífero Sapucari | 104100 | ** |
| 8.840.682 | 8.840.682 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 8000 | ** |
| 707.417 | 8.837.998 | Siriri | SRH | Aquífero Barreiras | 10000 | ** |
| 709.548 | 8.836.216 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 38000 | ** |
| 706.760 | 706.760 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 18000 | ** |

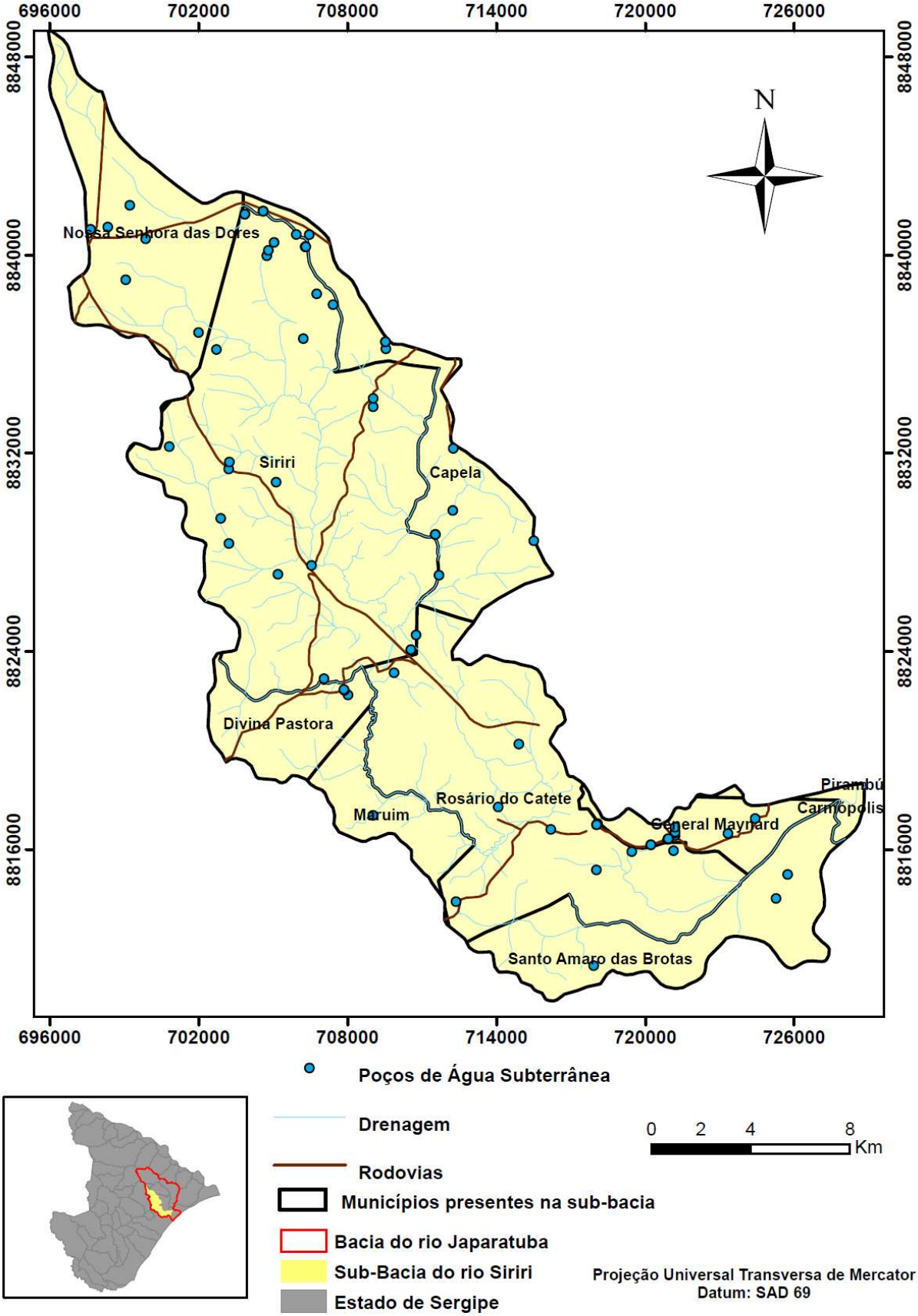
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 706.321 | 8.840.340 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 98000 | ** |
| 706.460 | 8.840.818 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 18000 | ** |
| 709.536 | 8.836.494 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 28000 | ** |
| 705.939 | 8.840.828 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 19000 | ** |
| 706.305 | 8.840.338 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 48000 | ** |
| 703.860 | 8.841.656 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 38000 | ** |
| 704.606 | 8.841.768 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 45000 | ** |
| 704.814 | 8.840.192 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 12000 | ** |
| 704.749 | 8.839.972 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 7000 | ** |
| 705.047 | 8.840.506 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 9000 | ** |
| 706.305 | 8.840.338 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 49900 | ** |
| 703.860 | 8.841.656 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 80000 | ** |
| 704.606 | 8.841.768 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 8000 | ** |
| 706.305 | 8.840.338 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 49900 | ** |
| 703.860 | 8.841.656 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 80000 | ** |
| 704.606 | 8.841.768 | Capela | SRH | Aquífero Barreiras | 80000 | ** |
| 718.045 | 8.816.997 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 15000 | ** |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 721.207 | 8.816.891 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 150000 | ** |
| 720.933 | 8.816.423 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 150000 | ** |
| 720.229 | 8.816.183 | General Maynard | SRH | Aquífero Sapucari | 170000 | ** |

***** Sem dado***

# ANEXO 2

# MAPA DOS POÇOS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DA SUB-BACIA DO RIO SIRIRI


696000
702000
708000
714000
720000
726000
8848000
8840000
8832000
8824000
8816000
N
Nossa Senhora das Dores
Siriri
Capela
Divina Pastora
Maruim
Rosário do Catete
General Maynard
Pirambú
Carmópolis
Santo Amaro das Brotas
Poços de Água Subterrânea
Drenagem
Rodovias
Municípios presentes na sub-bacia
Bacia do rio Japaratuba
Sub-Bacia do rio Siriri
Estado de Sergipe
0 2 4 8
Km
Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum: SAD 69