

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA

Subsídios para o Uso Sustentável
dos Recursos Hídricos



RESUMO EXECUTIVO



SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL – CPRM



ANA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA

Subsídios para o Uso Sustentável dos Recursos Hídricos

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

PRESIDENTE

Jair Bolsonaro

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

MINISTRO DE ESTADO

Ricardo Sales

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA

DIRETORIA COLEGIADA

Diretora Presidente

Christiane Dias Ferreira

Diretor de Hidrologia

Ney Maranhão

Diretor de Gestão

Ricardo Medeiros de Andrade

Diretor de Planejamento

Marcelo Cruz

Diretor de Regulação

Oscar de Moraes Cordeiro Netto

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

MINISTRO DE ESTADO

Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

**SECRETÁRIO DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E
TRANSFORMAÇÃO MINERAL**

Alexandre Vidigal de Oliveira

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor-presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Antônio Carlos Bacelar Nunes

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

José Leonardo Silva Andriotti

Diretor de Administração e Finanças

Juliano de Souza Oliveira

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Fernando Pereira de Carvalho

Chefe do Departamento de Hidrologia

Frederico Cláudio Peixinho

Chefe da Divisão de Hidrogeologia e Exploração

João Alberto Oliveira Diniz

Agência Nacional de Águas – ANA
Ministério do Meio Ambiente

Serviço Geológico do Brasil – CPRM
Ministério de Minas e Energia

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS DA ILHA DE SÃO LUÍS – MA

Subsídios para o Uso Sustentável dos Recursos Hídricos

RESUMO EXECUTIVO

Brasília - DF
ANA | CPRM
2019

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA

Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Blocos “B”, “L” e “M” e “T”.
CEP:70610-200, Brasília - DF - Brasil
PABX: (61) 2109-5400 / (61) 2109-5252
www.ana.gov.br

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

SEDE

Setor Bancário Norte - SBN Quadra 02, Bloco H - Asa Norte
Edifício Central Brasília
CEP: 70040-904, Brasília - DF - Brasil
Tel.: (61) 2108-8400

ESCRITÓRIO RIO DE JANEIRO

Avenida Pasteur, 404 - Urca
CEP: 22290-255, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
Tel.: (21) 2295-0032
www.cprm.gov.br

EDITORAÇÃO

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIVISÃO DE EDITORAÇÃO GERAL – DIEDIG

Valter Barradas

Ricardo Motta

PROJETO GRÁFICO e DIAGRAMAÇÃO

Andréia Continentino

Agmar Alves Lopes

NORMATIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIVISÃO DE DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA – DIDOTE

Maria Gasparina de Lima

Isabel Angela dos Santos Matos

FOTOGRAFIAS

Imagens pertencem ao acervo da CPRM

Contato

Informações, críticas, sugestões, correções de dados.

sip@ana.gov.br

adriana.ferreira@ana.gov.br

© 2019 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

E82 Estudos hidrogeológicos da Ilha de São Luís, MA : subsídios para o
 uso sustentável dos recursos hídricos : resumo executivo /
 Agência Nacional de Águas, Serviço Geológico do Brasil – CPRM.
 -- Brasília : ANA; CPRM, 2019.
 1 recurso eletrônico : PDF

 ISBN 978-65-5664-225-3

 1.Hidrogeologia. I. Agência Nacional de Águas (Brasil).
 II. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. III. Título.

CDD 551.49

EQUIPE DE EXECUÇÃO

COORDENAÇÃO GERAL

João Alberto Oliveira Diniz

GESTOR

Carlos Eduardo Sobreira Leite

HIDROGEOLOGIA

Thiago Luís Feijó de Paula

João Alberto Oliveira Diniz

Carlos Eduardo Sobreira Leite

Viviane Cristina Vieira da Cunha

CADASTRO DE POÇOS E FONTES DE CONTAMINAÇÃO

Breno Augustos Beltrão

Manoel Júlio da Trindade Gomes Galvão

Bruno Eldorff

Cipriano Gomes de Oliveira

Frank José Gurgel Santos

Adão José Gomes

Luís Antônio Rodrigues Almendra

Saulo Moreira

HIDROLOGIA E CLIMA

João H. P. de B. Salgueiro

Éber Pinto de Andrade - Consultor

Alice Silva Castilho - Consultor

Fábio Araújo

José Carlos Souza da Silva

Eduardo da Silveira Wilson

HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS

Tereza Cristina B. Villanueva

Idembergue Barroso Macedo de Moura

Mickaelon Belchior de Vasconcelos

Manoel Imbiriba

Clyvikh Renna Camacho

Liano Silva Veríssimo

Maria Antonieta Alcântara Mourão

Daniele Tokunaga Genaro

GEOFÍSICA

Oderson A. de Souza Filho

Bruce Fabini Franco Chiba

Rafael Ribeiro Severino

Jairo Jamerson Correia de Andrade

Nilo C. Pedrosa Jr

GEOLOGIA

Elem Cristina dos S. Lopes

Gisele Correa dos Anjos

José Paulo dos Santos Melo

Avelino Alves de Moraes

Edilberto Lisboa Leão

Lourenço Cardoso

SOLOS

Edgar Shinzato - Coordenador

Rogério Valença Ferreira

Marta Vasconcelos Ottoni

GEOMORFOLOGIA E USO E OCUPAÇÃO DOS SOLOS

Rogério Valença Ferreira

Marcelo Dantas

GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Roberto Eduardo Kirchhein

Andrea Segura Franzini

Camila Dalla Porta Mattiuzi

Andrea de Oliveira Germano

NIVELAMENTO GEODÉSICO

Rubens Esteves Kenup

Fábio Silva da Costa

SIG E BANCO DE DADOS

Robson de Carlo da Silva

Thiago Luiz Feijó de Paula

Franciele Eunice de Araújo

Rayssa Costa Pedrosa

CONSULTORES

Éber de Andrade Pinto

Alice Silva Castilho

Maria Antonieta Alcântara Mourão

Roberto Gusmão de Oliveira

Wenceslau Teixeira - EMBRAPA

Alba Martins - EMBRAPA

EQUIPE DE GESTÃO, SUPERVISÃO E FISCALIZAÇÃO

CPRM

Frederico Cláudio Peixinho -

Chefe do Departamento de Hidrologia (DEHID)

João Alberto Oliveira Diniz -

Chefe de Divisão de Hidrologia e Exploração (DIHEXP)

ANA

Tibério Magalhães Pinheiro -

Superintendente de Implementação de Planos, Programas e Projetos (SIP)

Flavia Carneiro da Cunha Oliveira (Adjunta)

Fernando Roberto de Oliveira -

Coordenador de Águas Subterrâneas (COSUB/SIP)

Fabício Bueno da Fonseca Cardoso (Substituto)

Adriana Niemeyer Pires Ferreira

Gestora do Projeto

Letícia Lemos de Moraes

Gestora Adjunta

COMISSÃO TÉCNICA DE ACOMPANHAMENTO E FISCALIZAÇÃO - CTAF

Liene Soares Pereira -

SEMA/SRH

Raimundo N. Medeiros da Silva -

SEMA/SRH (*in memorian*)

Breno Ruiz de Lima Verda da Silva

SEMA/SRH

Rebeca Cristina Nascimento Matos

SEMA/SRH

José Augusto dos Santos -

CAEMA (*in memorian*)

Wagner Gonzaga -

CAEMA

Suely Gonçalves da Conceição -

CAEMA

Felipe Negreiros de Moreira -

BRK Ambiental

Helder Dantas

BRK Ambiental

Lucas Pinheiro da Silva -

BRK Ambiental (substituto)

Ricardo Pereira Alves Mamede -

BRK Ambiental (substituto)

Ediléia D. Pereira -

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Jorge Hamilton Souza dos Santos -

Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Alessandro Costa da Silva -

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Jucivan Ribeiro Lopes -

Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Sara de C. Ribeiro -

Serviço Autônomo de Águas de Codó (CERH)

José Ronald Damasceno -

Região dos Lagos (CERH)

Myrcea Araújo Muniz -

Pref. Paço Lumiar

Suzane Andrade -

Pref. Paço Lumiar

Edmar Silva Castro -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Antônio Paulo da Silva Filho -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Flavio Bonfim -

Pref. Paço Lumiar (substituto)

Maria Madalena Xavier -

Pref. São José do Ribamar

Claudio Bastos Figueira -

Pref. São José do Ribamar

José Ribamar P.A. Coimbra -

Pref. São José do Ribamar

Claudio Bastos Figueira Junior -

Pref. São José do Ribamar

Divane Pinheiro da Silva -

Pref. São José do Ribamar



OCEANO ATLÂNTICO

RAPOSA

PAÇO
DO LUMIAR

SÃO LUÍS

SÃO JOSÉ
DE RIBAMAR

BAÍA DE SÃO JOSÉ

BAÍA DO ARRAIAL

DO MARCOS

FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Mapa de localização da área de trabalho..... | 21 |
| Figura 2: Estudos temáticos. | 23 |
| Figura 3: Precipitação e Temperatura Média Compensada (INMET, 2016). | 24 |
| Figura 5: Pluviometria média anual na Ilha de São Luís..... | 27 |
| Figura 4: Estações pluviométricas utilizadas no estudo | 25 |
| Figura 6: Bacias Hidrográficas da Ilha do Maranhão..... | 29 |
| Figura 7: (A) Formação Alcântara; (B) siltitos com estratificação acanalada; (C) intercalações de argilas cinza, calcarenitos e calcirruditos. | 31 |
| Figura 8: Formação Cujupe. | 32 |
| Figura 9: Formação Barreiras. | 32 |
| Figura 10: Depósitos Pós Barreiras. | 32 |
| Figura 11: Depósitos recentes. | 33 |
| Figura 12: Domínios Estruturais da Ilha do Maranhão. | 34 |
| Figura 13: Estrutura extensional tipo horst e gráben em escala de afloramento e Perfil geológico e bloco diagrama esquemático ao longo da Av. Litorânea (Domínio II). | 35 |
| Figura 14: Mapa Hidrogeológico simplificado da Ilha de São Luís. | 37 |
| Figura 15: Mapa Geomorfológico da Ilha de São Luís. | 39 |
| Figura 16: Mapa de Solos da Ilha de São Luís. | 40 |
| Figura 17: Mapa de Uso e Ocupação do Solo. | 42 |
| Figura 18: Infiltrômetro de anel (single disk) | 43 |
| Figura 19: Permeâmetro de Guelph | 43 |
| Figura 20: Capacidade de infiltração dos solos versus bacias hidrográficas, relevo, uso e ocupação da terra; interpolação pelo método do vizinho próximo (natural) | 44 |
| Figura 21: Exemplos de rede de drenagem urbana inadequada e incompatível com o cenário urbano | 45 |
| Figura 22: Exemplos da disposição inadequada dos resíduos sólidos..... | 46 |
| Figura 23: Exemplos de sistemas de esgotamento sanitário na Ilha de São Luis | 47 |
| Figura 24: Sistemas de distribuição de água da Ilha de São Luís. | 49 |
| Figura 25: Cadastro de captações de águas subterrâneas, incluindo poços tubulares, nascentes e escavados..... | 52 |
| Figura 26: Dados estatísticos dos poços e fontes naturais (percentuais aproximados)..... | 53 |
| Figura 27: Volumes explotados de águas subterrâneas..... | 54 |
| Figura 28: Fontes de Poluição Cadastradas na Ilha de São Luís (FONTES: SEMA/MA e CTF/IBAMA/CPRM). | 56 |
| Figura 29: Localização dos levantamentos geofísicos realizados na ilha de São Luís..... | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 30: Exemplo da combinação de dados geológicos e geofísicos na interpretação de seções geológico-geofísicas..... | 60 |
| Figura 31: Pontos de coleta de amostras de água | 61 |
| Figura 32: Distribuição espacial dos grupos de águas..... | 62 |
| Figura 33: Mapa de Zoneamento do Potencial Hidrogeniônico (pH) das águas dos Aquíferos São Luís e Itapecuru e das águas de mistura (período de estiagem - novembro de 2017) | 63 |
| Figura 34: Diagramas de Piper | 64 |
| Figura 35: Diagramas de Stiff - Águas da primeira e da segunda campanha de amostragem. | 65 |
| Figura 36: Mapa de zoneamento do Cloreto (período de estiagem – novembro 2017) | 67 |
| Figura 37: Mapa de zoneamento do Nitrato (período de chuvas – fevereiro 2017)..... | 68 |
| Figura 38: Diagrama de δD x $\delta^{18}O$ do conjunto de amostras coletadas no projeto (símbolos preenchidos). Lançadas também as linhas meteóricas Global e da região Nordeste e as análises realizadas por Pereira et al. (2002 e 2004), em símbolos não preenchidos..... | 70 |
| Figura 39: Tempos de residência das águas subterrâneas indicadas pelo trítio..... | 72 |
| Figura 40: Distribuição dos poços amostrados e idades corrigidas de ^{14}C na Ilha do Maranhão..... | 75 |
| Figura 41: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Theis - Poço P 3A/Pz 01 | 77 |
| Figura 42: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Theis - Poço P 01/Pz 04..... | 78 |
| Figura 43: Curva Rebaixamento X tempo Método de Neuman - Poço P 1BI/Pz 02..... | 78 |
| Figura 44: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Neuman - Poço P 23/Pz 03 | 78 |
| Figura 45: Superfície do Nível da Água Subterrânea e Direções de Fluxo do Aquífero São Luís. Dados da 2ª campanha, que apresentou maior quantidade e qualidade de dados..... | 80 |
| Figura 46: Superfície piezométrica do Aquífero Itapecuru..... | 81 |
| Figura 47: Recargas Totais naturais e urbanas por bacia hidrográfica (Sistema Aquífero São Luís) | 85 |
| Figura 48: Variações dos níveis de água medidos em poços da rede RIMAS (agosto/2018 e abril/2019)..... | 86 |
| Figura 49: Cálculo da Vazão de Escoamento Natural (VEN) | 87 |
| Figura 50: Drenanças verticais entre os aquíferos São Luís e Itapecuru | 89 |
| Figura 51: Espessuras saturadas do Aquífero São Luís | 92 |
| Figura 52: Reservas Aquífero Itapecuru | 93 |
| Figura 53: Espessuras saturadas – Aquífero Itapecuru | 94 |
| Figura 54: Perigo de contaminação das águas subterrâneas (Foster, 1987)..... | 97 |
| Figura 55: Mapa de Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (Método GOD) | 98 |

| | |
|---|-----|
| Figura 56: Mapa de Potencial de Contaminação por fontes difusas | 99 |
| Figura 57: Perigo de contaminação dos aquíferos na Ilha do Maranhão | 100 |
| Figura 58: Mapa de vulnerabilidade a salinização dos aquíferos da Ilha de São Luís – MA. Aquíferos aflorantes (esquerda) e não aflorantes (direita) | 102 |
| Figura 59: Compartimentação dos aquíferos São Luís e Itapecuru na Ilha de São Luís | 103 |
| Figura 60: Mapa de Espessuras do Aquífero São Luís..... | 104 |
| Figura 61: Profundidade da interface água doce x água salgada na Ilha do Maranhão..... | 104 |
| Figura 62: Modelo Hidrogeológico Conceitual da Ilha de São Luís..... | 105 |
| Figura 64: Cenário 2 de simulação - Acréscimo no uso da água subterrânea devido ao aumento populacional..... | 107 |
| Figura 63: Cenário 1 de simulação - Manutenção do bombeamento nas condições atuais até 2050 | 107 |
| Figura 66: Cenário 4 de simulação - Diminuição da exploração das águas subterrâneas | 108 |
| Figura 65: Cenário 3 de simulação - Diminuição da recarga de água subterrânea | 108 |
| Figura 67: Ciclos vicioso e virtuoso na gestão dos recursos hídricos (TUINHOF <i>et al.</i> , 2006) | 110 |
| Figura 68: Programa de Ações Estratégicas – PAE da Ilha de São Luís | 111 |
| (As legendas grafadas em azul, mostram as relações entre as áreas estratégicas e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS, estabelecidos pela Organização das Nações Unidas - ONU) | 111 |
| Figura 69: Proposta de implantação de rede de monitoramento piezométrico na Ilha de São Luís..... | 113 |
| Figura 70: Áreas de restrição de uso das águas subterrâneas na Ilha de São Luís para os aquíferos São Luís e Itapecuru..... | 121 |
| Figura 71: Zona principal de restrição de águas subterrâneas na Ilha de São Luís, determinada pela utilização dos indicadores propostos | 122 |

TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Atividades desenvolvidas no projeto. | 18 |
| Tabela 2: Reuniões da CTAF e principais temas abordados. | 19 |
| Tabela 3: Indicadores socioeconômicos da Ilha do Maranhão (IPEA, 2014). | 22 |
| Tabela 4: Altura de precipitações utilizadas na espacialização para geração das isoietas (mm)..... | 26 |
| Tabela 5: Padrões de relevo mapeados na Ilha de São Luís. | 38 |
| Tabela 6: Produção de água subterrânea nas cidades segundo o cadastro de poços. | 48 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 7: Recargas Urbanas por Bacia Hidrográfica. | 51 |
| Tabela 8: Volumes anuais explotados por bacia hidrográfica | 55 |
| Tabela 9: Variações das resistividades elétricas nos principais litotipos da Ilha de São Luís. | 59 |
| Tabela 10: Percentuais das águas dos Aquíferos São Luís e Itapecuru em relação ao padrão de potabilidade estabelecido pela PRC nº 5 do Ministério da Saúde de 2017 (considerando as duas etapas de análises químicas). | 66 |
| Tabela 11: Resultados das análises de isótopos estáveis Oxigênio 18 e Deutério (^{18}O e ^2H). | 69 |
| Tabela 12: Matriz de correlação entre os parâmetros isotópicos, físico-químicos e químicos | 70 |
| Tabela 13: Resultados (idades aparentes e corrigidas) | 74 |
| Tabela 14: Métodos de análise de fluxo para poços em função do tipo de aquífero e regime de bombeamento | 77 |
| Tabela 15: Quadro resumo dos valores obtidos para o aquífero Itapecuru | 79 |
| Tabela 16: Quadro - resumo dos valores obtidos para o aquífero São Luís | 79 |
| Tabela 17: Recargas naturais anuais médias para as bacias hidrográficas da Ilha de São Luís | 83 |
| Tabela 18: Recargas Totais por Bacia Hidrográfica | 84 |
| Tabela 19: Cálculo das recargas pela variação dos níveis potenciométricos. | 86 |
| Tabela 20: Valores da recarga calculados pelos diversos métodos. | 88 |
| Tabela 21: Reservas renováveis, permanentes e totais do Sistema Aquífero São Luís. | 91 |
| Tabela 22: Reservas drenáveis ou de saturação para o aquífero Itapecuru na Ilha do Maranhão | 93 |
| Tabela 23: Reservas Potenciais Explotáveis por Bacia Hidrográfica - Sistema Aquífero São Luís | 95 |
| Tabela 24: Reservas explotáveis do Aquífero Itapecuru por bacia hidrográfica na Ilha de São Luís | 96 |
| Tabela 25: Parâmetros, intervalos e índices do método GALDIT (Chachadi & Lobo Ferreira) | 101 |
| Tabela 25: Parâmetros, intervalos e índices do método GALDIT (Chachadi & Lobo Ferreira) (continuação) | 102 |
| Tabela 26: Detalhamento dos poços propostos para a rede de monitoramento | 114 |
| Tabela 27: Características das seções medidoras da Ilha do Maranhão | 115 |
| Tabela 28: Linhas de ação | 116 |
| Tabela 29: Indicadores do uso de águas subterrâneas | 117 |
| Tabela 30: Cálculo dos Indicadores do uso de águas subterrâneas na Ilha de São Luís | 118 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. APRESENTAÇÃO | 15 |
| 2. INTRODUÇÃO | 17 |
| 2.1. ATIVIDADES | 17 |
| 2.2. PARTICIPANTES | 18 |
| 2.3. LOCALIZAÇÃO | 21 |
| 2.4. ASPECTOS POLÍTICOS SOCIAIS..... | 22 |
| 3. ESTUDOS TEMÁTICOS..... | 23 |
| 3.1. CLIMA E HIDROLOGIA | 23 |
| 3.1.1. Precipitação e Temperatura..... | 24 |
| 3.1.2. Hidrologia..... | 28 |
| 3.2. GEOLOGIA E TECTÔNICA | 30 |
| 3.2.1. Caracterização Geológica..... | 30 |
| 3.2.2. Tectônica..... | 33 |
| 3.3. HIDROGEOLOGIA..... | 35 |
| 3.4. GEOMORFOLOGIA, SOLOS, USO DA TERRA E TESTES DE INFILTRAÇÃO | 38 |
| 3.4.1. Unidades Geomorfológicas | 38 |
| 3.4.2. Solos | 38 |
| 3.4.3. Uso da Terra | 41 |
| 3.4.4. Testes de Infiltração | 43 |
| 3.5. AVALIAÇÃO DA URBANIZAÇÃO..... | 45 |
| 3.5.1. Sistema de Drenagem Urbana..... | 45 |
| 3.5.2. Resíduos Sólidos | 46 |
| 3.5.3. Sistema de Esgotamento Sanitário..... | 47 |
| 3.5.4. Sistema de Abastecimento de Água | 48 |
| 3.5.5. Impactos da Urbanização nas Águas Subterrâneas - As recargas urbanas..... | 50 |
| 4. LEVANTAMENTO DE DADOS BÁSICOS..... | 52 |
| 4.1. CADASTRO DE PONTOS D'ÁGUA | 52 |
| 4.2. CADASTRO DE FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO..... | 55 |
| 4.3. INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS | 56 |
| 4.4. HIDROGEOQUÍMICA | 60 |
| 4.4.1. Classificação Hidroquímica das Águas..... | 64 |
| 4.4.2. Avaliação da Potabilidade..... | 65 |
| 4.4.3. Análise de Parâmetros Específicos | 68 |
| 4.4.4. Isótopos Estáveis Oxigênio - 18 e Deutério | 69 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.5. Isótopos Radioativos - Trítio e Carbono – 14 | 71 |
| 4.4.5.1. Trítio | 71 |
| 4.4.5.2. Isótopos de Carbono 14 | 73 |
| 4.5. TESTES DE AQUÍFERO | 76 |
| 4.6. POTENCIOMETRIA, NÍVEIS DE ÁGUA E DIREÇÃO DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS..... | 79 |
| 5. AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA..... | 82 |
| 5.1. RECARGAS E BALANÇO HÍDRICO | 82 |
| 5.2. RESERVAS | 90 |
| 5.2.1. Aquífero São Luís | 90 |
| 5.2.2. Aquífero Itapecuru | 92 |
| 5.3. DISPONIBILIDADES | 94 |
| 5.3.1. Aquífero São Luís | 94 |
| 5.3.2. Aquífero Itapecuru | 95 |
| 5.4. PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS..... | 96 |
| 5.5. RISCOS DE INTRUSÕES SALINAS | 101 |
| 5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO | 103 |
| 5.6.1. Modelo Hidrogeológico Numérico | 105 |
| 6. ESTRATÉGIAS DE GESTÃO DA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA ILHA DE SÃO LUÍS | 109 |
| 6.1. ASPECTOS LEGAIS | 109 |
| 6.1.1. Área Estratégica I - Gestão da Informação | 112 |
| 6.1.2. Área Estratégica II - Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos.... | 115 |
| 6.1.3. Área Estratégica III - Pesquisa e Desenvolvimento | 123 |
| 6.1.4. Área Estratégica IV - Fortalecimento Institucional | 124 |
| 6.1.5. Área Estratégica V - Educação, Formação, Mobilização Social..... | 125 |
| REFERÊNCIAS..... | 126 |

1 APRESENTAÇÃO

ESTE RESUMO EXECUTIVO APRESENTA UMA SÍNTESE DOS TRABALHOS realizados no projeto “Estudos Hidrogeológicos da Ilha de São Luís - MA: Subsídios para o Uso Sustentável dos Recursos Hídricos”, elaborado por meio de parceria firmada entre a Agência Nacional de Águas – ANA e o Serviço Geológico do Brasil – CPRM e apresentado em detalhes nos 5 Volumes do Relatório Final, conforme a seguir:

- O Volume I, trata das características gerais da área, incluindo a caracterização geológica e geofísica, geomorfologia, solos e testes de infiltração, além das condições de uso e ocupação do solo na Ilha;
- O Volume II trata da caracterização hidroclimática local, avaliação da urbanização e suas consequências nos recursos hídricos totais, executa o balanço hídrico geral da Ilha e discorre sobre as estimativas de recargas das águas subterrâneas, quer sejam naturais ou oriundas da urbanização (perdas nas redes de distribuição de água, rede de esgotos, etc.);
- No Volume III se apresenta a avaliação hidrogeológica e hidroquímica da Ilha e se apresenta uma análise isotópica sobre as águas subterrâneas existentes;
- No Volume IV, mais direcionado diretamente à gestão dos recursos hídricos, se discorre sobre as condições de vulnerabilidade e perigo de contaminação das águas subterrâneas, dos riscos de salinização, estima suas recargas, reservas, disponibilidades e potencialidades, apresenta-se um modelo matemático de simulação, analisando diversos cenários possíveis até o ano de 2050. Mostra ainda um capítulo sobre a gestão dos recursos hídricos, tecendo comentários e sugerindo estratégias para este fim;
- Finalmente, no volume V se mostram os mapas produzidos nos trabalhos, no formato PDF, mas que também podem ser vistos no Sistema de Informações Geográficas – SIG componente do Relatório Final.

A formalização desta parceria se deu através de assinatura do Termo de Execução Descentralizada 06/2016/ANA, celebrado entre as instituições.

Os trabalhos foram elaborados na escala de 1:50.000, tendo como OBJETIVO GERAL a realização de estudos hidrogeológicos visando fornecer subsídios para a gestão de recursos hídricos, apresentar sugestões de normas e procedimentos de gestão, indicar diretrizes para uma exploração sustentável e a verificar a possibilidade de ampliação do uso das águas subterrâneas como possibilidade de incremento ao sistema de abastecimento na região.

A Ilha de São Luís compreende os municípios de São Luís, Paço do Lumiar, Raposa e São José de Ribamar, abrangendo uma área de aproximadamente 900 km², sendo que o levantamento dos dados primários ocorreu, principalmente, nos anos de 2017 e 2018.

As águas subterrâneas representam o principal manancial de abastecimento público da ilha e pouco se conhecia sobre a sustentabilidade das extrações atuais e a capacidade de suprir as demandas futuras. Havia também preocupação com os impactos nesse manancial frente ao crescimento urbano, principalmente nas áreas de tabuleiros, previamente já reconhecidos pela comunidade acadêmica como importantes áreas de recarga de aquíferos. Além disso, era necessário avaliar a existência de intrusão salina, dado que águas salinizadas já haviam sido detectadas em alguns poços. Na busca de informações mais adequadas à gestão das águas subterrâneas, a SEMA, órgão gestor estadual de recursos hídricos no Maranhão, solicitou à ANA a elaboração desses estudos.

Estes estudos foram desenvolvidos no âmbito da Agenda de Gestão Integrada de Recursos Superficiais e Subterrâneos da ANA, que define suas ações para atendimento ao Programa Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS), do Plano Nacional de Recursos Hídricos. Uma das ações desta agenda é justamente a elaboração de avaliações hidrogeológicas, a qual contempla entre suas atividades “Identificar e elaborar estudos de aquíferos em áreas urbanas onde a água subterrânea é relevante para o abastecimento”.

2 INTRODUÇÃO

OS AQUÍFEROS TÊM GRANDE IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA como fonte atual e futura de suprimento hídrico. A demanda por água subterrânea é cada vez maior, seja de forma complementar ao sistema público de abastecimento, seja de forma exclusiva, sendo utilizada para múltiplos usos, destacando-se a irrigação, abastecimento humano, indústria e lazer.

Embora o uso do manancial subterrâneo seja complementar ao superficial em muitas regiões do Brasil, em outras áreas a água subterrânea representa a principal fonte hídrica. Na Ilha de São Luís, os municípios de Paço do Lumiar, Raposa e São José de Ribamar são totalmente abastecidos por água subterrânea, enquanto o município de São Luís tem mais de 50% do seu abastecimento provenientes desse tipo de manancial.

Em cidades litorâneas, as captações subterrâneas em padrões não sustentáveis podem induzir a salinização das águas devido à intrusão de cunhas salinas causada pelo rebaixamento dos níveis freáticos dos aquíferos. Além disso, em áreas urbanas, baixos índices de cobertura de coleta e tratamento de esgotos tem causado a contaminação das águas subterrâneas, em especial por efluentes domésticos não tratados.

O objetivo principal do trabalho foi proporcionar avanços na gestão dos recursos hídricos totais existentes na Ilha de São Luís, ou Ilha Upaon-Açu, incluindo águas superficiais e subterrâneas, com ênfase nas características hidráulicas e hidroquímicas dos aquíferos existentes, suas relações de interdependência com as águas de superfície, suas reservas e potencialidades. Almejou-se que, a partir das avaliações dos usos da água e das condições de urbanização, fossem criados subsídios para a proposição de diretrizes para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos locais.

2.1. ATIVIDADES

O desenvolvimento deste estudo contou com várias atividades, acompanhadas concomitantemente às suas execuções em campo e/ou escritório, por meio de 9 (nove) relatórios parciais de execução, apresentados à Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF, para análise e aprovação (Tabela 1).



Tabela 1: Atividades desenvolvidas no projeto



2.2. PARTICIPANTES

Este estudo, desenvolvido por meio de cooperação entre a Agência Nacional de Águas – ANA e o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, teve uma participação efetiva da Comissão Técnica de Acompanhamento e Fiscalização – CTAF, composta pelas instituições abaixo nomeadas, em todas as fases de desenvolvimento do projeto.

Foram realizadas 11 reuniões técnicas para apresentações e discussões sobre o andamento dos trabalhos sendo, em cada uma delas, apresentados por técnicos do Serviço Geológico do Brasil, relatórios parciais sobre a evolução dos trabalhos, avaliados por parte dos membros da CTAF (Tabela 2). Todas as reuniões ocorreram em São Luís, no Auditório da SEMA, situado na Rua dos Búzios, Quadra 35, Lote 18, Calhau. Contaram com a participação frequente das seguintes instituições: ANA, CPRM, SEMA, Secretarias Municipais de Meio Ambiente dos municípios de Paço do Lumiar, Raposa e São José de Ribamar, Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Odebrecht Ambiental/BRK Ambiental, CAEMA, UEMA, UFMA, Vale, Alumar, Prefeitura de Paço do Lumiar, Prefeitura de Raposa, Prefeitura de São José de Ribamar, Serviços Autônomos de Abastecimento de Água (SAAE's) dos municípios de Raposa e Paço do Lumiar.



Tabela 2: Reuniões da CTAF e principais temas abordados

| REUNIÕES CTAF | DATA | FINALIDADE |
|--------------------|------------|---|
| 1ª REUNIÃO | 25/10/2016 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação do Escopo dos Estudos |
| 2ª REUNIÃO | 06/12/2016 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 01 – Plano de Trabalho |
| 3ª REUNIÃO | 09/02/2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 02 – Estado da Arte e base de dados secundários, primeiros levantamentos de campo (geologia, geomorfologia, geofísica, solos) |
| 4ª REUNIÃO | 18/04/2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 03 – Geologia, Geomorfologia, Solos, Uso e Ocupação, Geofísica, Clima, cadastro de poços e fontes, Modelo Hidrogeológico preliminar; |
| 5ª REUNIÃO | 27/06/2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 04 – Geologia, geomorfologia, hidrologia e clima, hidrogeoquímica (1ª campanha), fontes de poluição |
| 6ª REUNIÃO | 24/07/2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 05 – Geologia, Geofísica, Hidrogeoquímica, Balanço Hídrico, Vulnerabilidade e Risco de contaminação, Gestão de Recursos Hídricos |
| 7ª REUNIÃO | 27/10/2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Avaliação do 1º Seminário de Gestão |
| 8ª REUNIÃO | 06/02/2018 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 06 – Vulnerabilidade e Perigo de Contaminação, Geofísica, Balanço Hídrico, Perfilagem Geofísica de Poços, Mapa Hidrogeológico, Potenciometria e fluxo (1ª campanha), Risco de Salinização |
| 9ª REUNIÃO | 24/04/2018 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 07 - Nivelamento geodésico de poços, Ensaio de Infiltração e Permeabilidade, Datação por Termoluminescência, Perfuração de piezômetros, Hidrogeoquímica (2ª campanha), Isótopos, Modelo Numérico |
| 10ª REUNIÃO | 24/07/2018 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 08 - Datação por Termoluminescência, Hidrogeoquímica (2ª campanha), Potenciometria e fluxo (2ª campanha), Modelo Numérico, Testes de Aquífero |
| 11ª REUNIÃO | 09/10/2018 | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentação e Discussão do Relatório Parcial 09 - Drenagem Urbana, Balanço Hídrico (Recargas naturais), Recargas Urbanas, Demandas, Gestão dos Recursos Hídricos, Zonas de Proteção de Poços, Testes de Aquífero, Modelo Numérico |

Foram ainda realizados dois “Seminários de Gestão”, o primeiro deles na Federação das Indústrias do Estado do Maranhão - FIEMA, no mês de outubro de 2018 e o segundo em dezembro de 2019, na Federação dos Municípios do Estado do Maranhão - FAMEM, quando foram apresentados os resultados dos trabalhos.





2.3. LOCALIZAÇÃO

A Ilha do Maranhão é constituída pelos municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa. Situa-se na Região Costeira do Estado do Maranhão, limitando-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul, com a baía de São José e o Estreito dos Mosquitos, a leste com a baía de São José e a oeste com a baía de São Marcos, nas coordenadas 02°22'23" e 02°51'00" de Latitude Sul; 44°26'41" e 43°59'41" de Longitude Oeste.

Localiza-se no Golfão Maranhense, na costa brasileira, que constitui um grande um complexo sistema estuarino, destacando-se, ainda, as baías de São Marcos, à oeste, e São José, à leste (Figura 1), abrangendo uma área de cerca de 900 km².

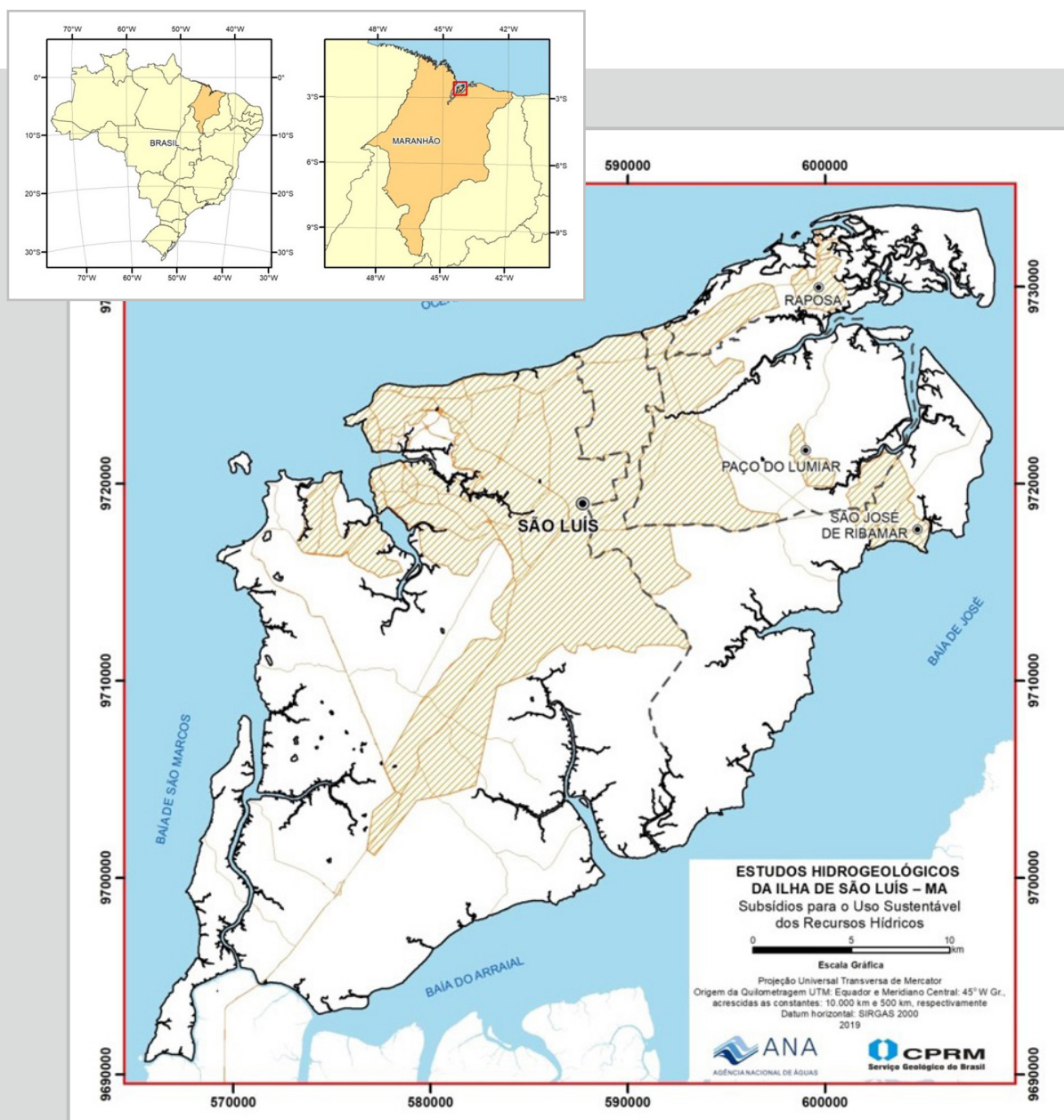


Figura 1: Mapa de localização da área de trabalho

2.4. ASPECTOS POLÍTICOS SOCIAIS

Os principais dados populacionais, sociais e econômicos dos municípios da Ilha de São Luís encontram-se resumidos na Tabela 3 (IPEA, 2014).

Tabela 3: Indicadores socioeconômicos da Ilha do Maranhão (IPEA, 2014)

| | SÃO LUIS | SÃO JOSÉ DO RIBAMAR | PAÇO DO LUMIAR | RAPOSA |
|---|------------|------------------------|-------------------|----------|
| POPULAÇÃO | 1.014.837 | 163.045 | 105.121 | 26.327 |
| ÁREA (km ²) | 834,781 | 388,369 | 124,753 | 64,353 |
| DENSIDADE DEMOGRÁFICA (hab/km ²) | 1.215,69 | 419,82 | 842,63 | 409,1 |
| POPULAÇÃO ALFABETIZADA | 876.826 | 136.694 | 88.750 | 19.606 |
| ÍNDICE DE ANALFABETISMO (%) | 13,60 | 16,16 | 15,57 | 25,53 |
| PIB (R\$) | 15.337.347 | 473.407 | 291.564 | 100.920 |
| PIB PER CAPTA (R\$) | 15.381,99 | 3.394,26 | 2.804,64 | 3.906,01 |

3 ESTUDOS TEMÁTICOS

A Figura 2 apresenta os estudos temáticos executados no âmbito deste projeto.

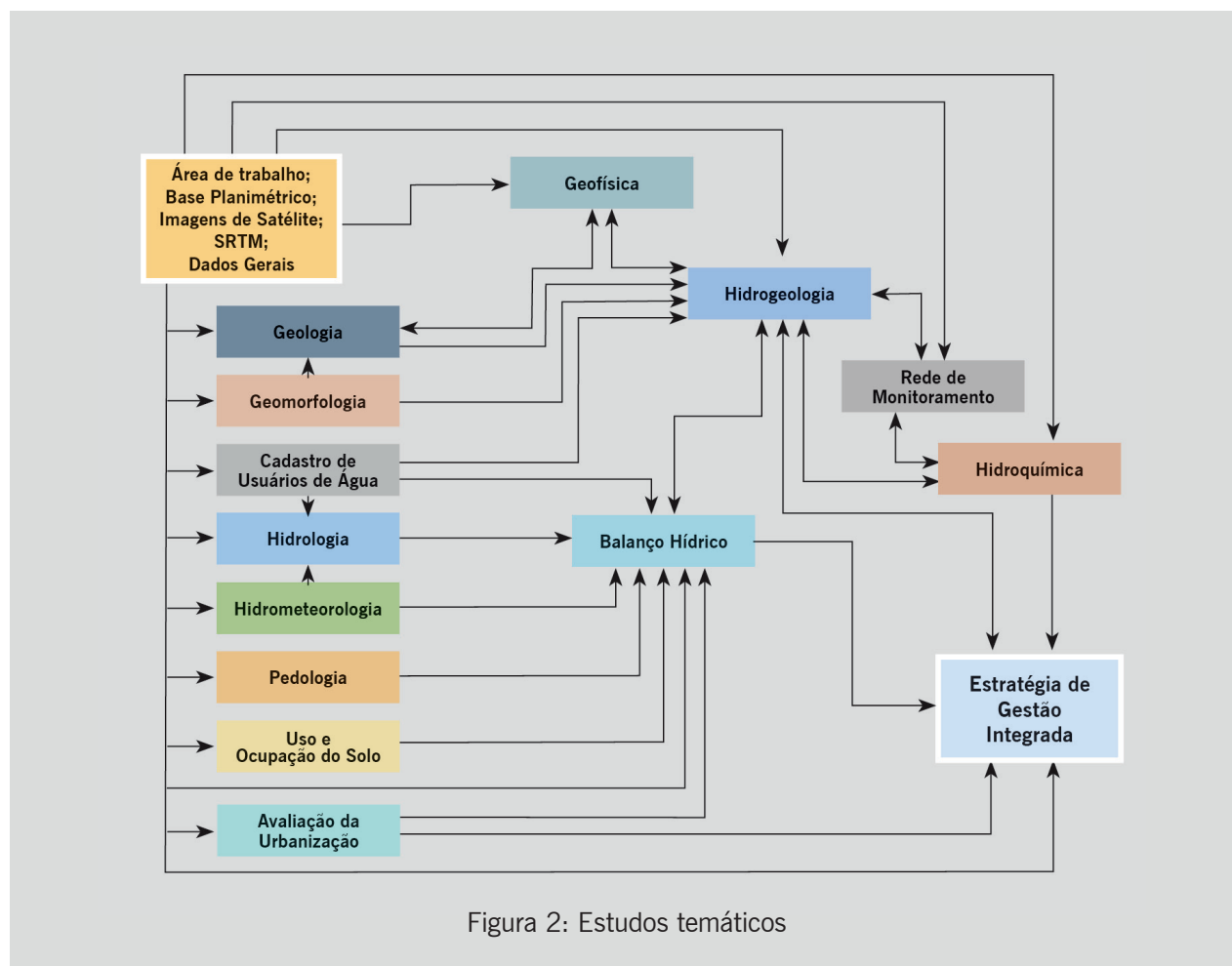


Figura 2: Estudos temáticos

3.1. CLIMA E HIDROLOGIA

A área de estudo fica situada na transição entre os climas superúmido da Amazônia e o semiárido do Nordeste, caracterizando-se por um clima tropical chuvoso (ARAÚJO *et al.*, 2009), com pluviometria anual média de 2.290 mm e predominância de chuvas no primeiro semestre do ano. A evaporação anual média é de 1.020 mm, sendo que os valores mais altos ocorrem no período de agosto a dezembro, durante a estação seca.

Os principais sistemas meteorológicos que influenciam as precipitações são a Zona de Convergência Intertropical, as Linhas de Instabilidade, os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis e as Ondas de Leste (UEMA, 2017).



3.1.1. Precipitação e Temperatura

Observam-se duas estações bem definidas, uma úmida, de janeiro a julho, e a outra seca, de agosto a dezembro. O total pluviométrico anual médio (1961-1990) de São Luís é 2.290,2 mm (Figura 3). O período seco, de agosto a dezembro, corresponde a 6,5% do total anual precipitado. O trimestre mais chuvoso, fevereiro, março e abril, contribui com cerca de 55,8% do total anual precipitado. Já o trimestre mais seco, correspondente aos meses de setembro, outubro e novembro, contribui com 1,8% da precipitação anual.

A temperatura média mensal varia entre 25,6°C, em julho, e 26,9°C, em novembro, com média anual de 26,1°C. O mês mais quente, novembro, apresenta média das máximas de 31,4°C. A média das mínimas do mês mais frio, julho, é de 22,3°C.

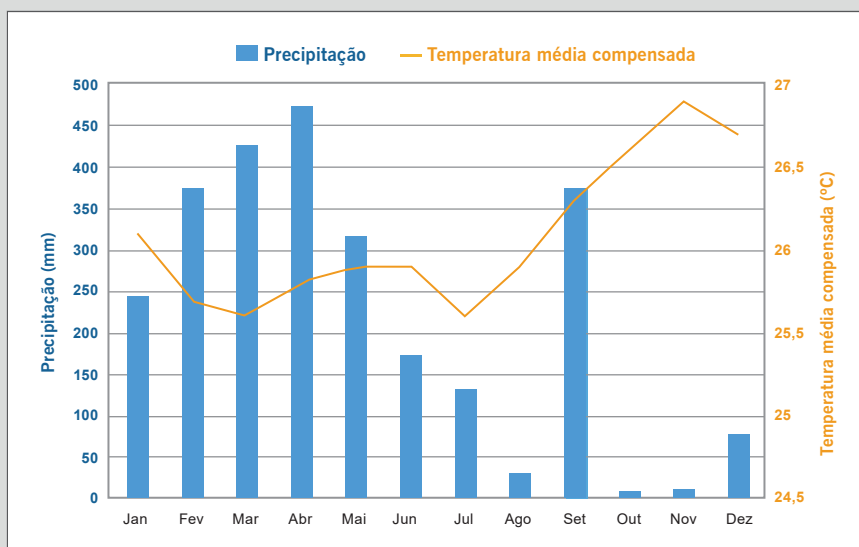
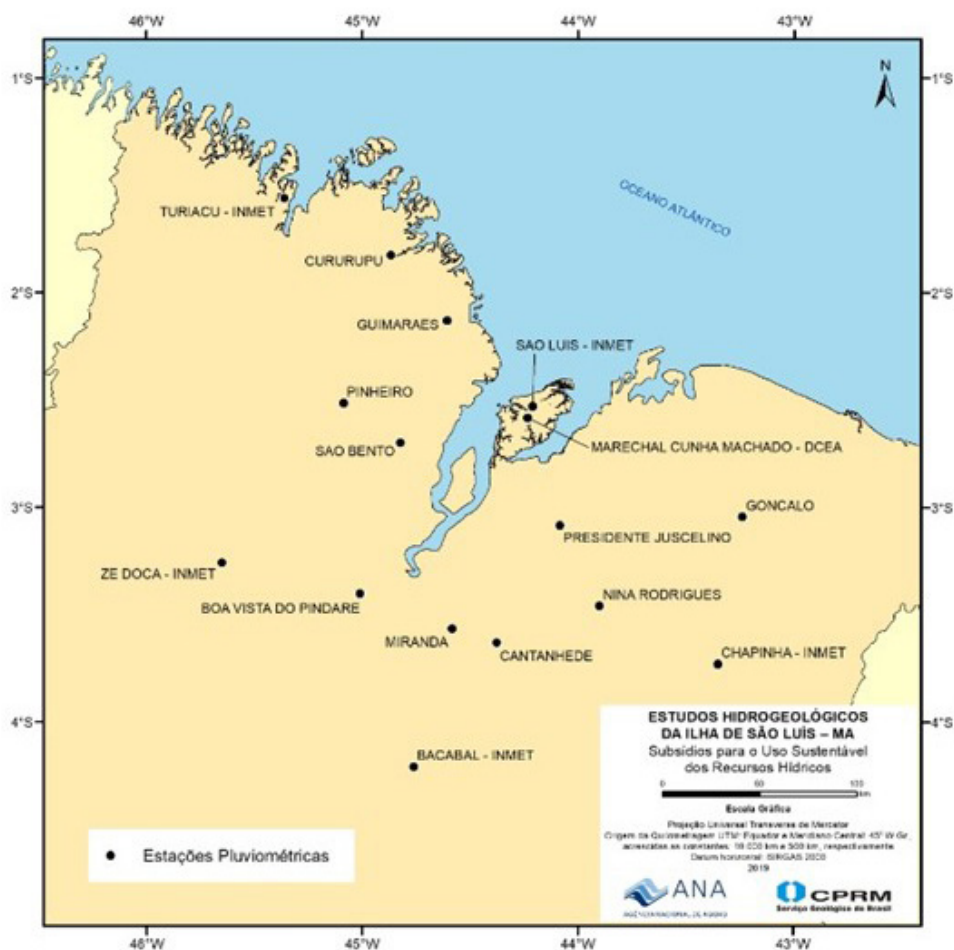


Figura 3: Precipitação e Temperatura Média Compensada (INMET, 2016)

O traçado de isoietas, ou seja, isolinhas de iguais alturas de precipitação, é a melhor forma de avaliar a variação espacial das precipitações, sendo geralmente utilizadas séries temporais longas (não menos de 30 anos). Na Ilha de São Luís, em razão da escassez de séries históricas de dados, foram incluídas estações com registros mais curtos, sendo as médias de longo prazo estimadas pela combinação de precipitações observadas e estimativas de satélites, tomando-se como referência a estação São Luís (código 822280). A Figura 4 mostra as estações pluviométricas utilizadas e a Tabela 4 apresenta as médias obtidas para o traçado das isoietas, considerando um período de 30 anos. Na Figura 5 é mostrado o mapa de isoietas gerado, com a média pluviométrica anual da região.



| N | Código | Estação | Órgão | Lat | Long. | Alt. (m) |
|----|----------|---------------------------------|--------|---------|----------|----------|
| 1 | 82198 | Turiacu | INMET | -1,5600 | -45,3600 | 44,06 |
| 2 | 82280 | São Luís* | INMET | -2,5300 | -44,2100 | 50,86 |
| 3 | 82376 | Zé Doca | INMET | -3,2600 | -45,6500 | 45,28 |
| 4 | 82382 | Chapadinha | INMET | -3,7300 | -43,3500 | 103,50 |
| 5 | 82460 | Bacabal | INMET | -4,2100 | -44,7600 | 25,07 |
| 6 | 00144002 | Cururupu | ANA | -1,8261 | -44,8678 | - |
| 7 | 00244006 | São Luís - Hidroweb* | INMET | -2,5300 | -44,2100 | 50,86 |
| 8 | 00244007 | São Luís - SUDENE * | SUDENE | -2,5300 | -44,2100 | 30 |
| 9 | 00244011 | Guimaraes | ANA | -2,1294 | -44,6069 | - |
| 10 | 00244012 | São Bento | ANA | -2,7011 | -44,8233 | - |
| 11 | 00244032 | Marechal Cunha Machado – DECEA* | DCEA | -2,5833 | -44,2333 | 53 |
| 12 | 00245010 | Pinheiro | ANA | -2,5153 | -45,0856 | - |
| 13 | 00343003 | Nina Rodrigues | ANA | -3,4594 | -43,8989 | 90 |
| 14 | 00343011 | Gonçalo | ANA | -3,0439 | -43,2367 | - |
| 15 | 00344004 | Cantanhede | ANA | -3,6325 | -44,3764 | - |
| 16 | 00344010 | Presidente Juscelino | ANA | -3,0847 | -44,0836 | - |
| 17 | 00344012 | Miranda | ANA | -3,5667 | -44,5833 | - |
| 18 | 00345012 | Boa Vista do Pindaré | ANA | -3,4028 | -45,0106 | - |

Figura 4: Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Tabela 4: Altura de precipitações utilizadas na espacialização para geração das isoietas (mm)

| CÓDIGO | NOME | LATITUDE | LONGITUDE | PERÍODO | N | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | MÉDIA ANUAL | MEDIANA ANUAL |
|----------|-------------------------------|----------|-----------|-----------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------------|---------------|
| 82198 | TURIACU - INMET | -1,56000 | -45,36000 | 1986-2015 | 27 | 201,1 | 293,2 | 437,8 | 422,3 | 305,8 | 217,4 | 156,9 | 46,4 | 12,5 | 8 | 7,6 | 37,7 | 2146,7 | 2231,8 |
| 82280 | SAO LUIS - INMET | -2,53000 | -44,21000 | 1986-2015 | 30 | 217,1 | 302,1 | 444,5 | 433,6 | 313,3 | 184,6 | 126,6 | 28,8 | 5,3 | 5,8 | 10,3 | 59 | 2131 | 2260,9 |
| 82376 | ZE DOCA - INMET | -3,26000 | -45,65000 | 1986-2015 | 28 | 243,2 | 294,9 | 341,5 | 349,9 | 203,2 | 97,6 | 48,5 | 18,2 | 18,8 | 27,3 | 42,4 | 92,6 | 1778,1 | 1798,7 |
| 82382 | CHAPINHA - INMET | -3,73000 | -43,35000 | 1986-2015 | 29 | 212,9 | 267,3 | 356,7 | 328,8 | 203,3 | 74,3 | 35,1 | 8,1 | 3,7 | 16,1 | 31,9 | 82,5 | 1620,7 | 1697,4 |
| 82460 | BACABAL - INMET | -4,21000 | -44,76000 | 1986-2015 | 29 | 248,8 | 285,1 | 377,9 | 348,6 | 206,2 | 59,4 | 20 | 13 | 11,9 | 31,2 | 72,5 | 124,9 | 1799,5 | 1846,4 |
| 00144002 | CURURUPU | -1,82610 | -44,86780 | 1986-2015 | 24 | 168,3 | 305,2 | 490,3 | 433 | 282,9 | 163,9 | 140,7 | 30,5 | 14,7 | 10,6 | 14,8 | 53 | 2107,9 | 2090,6 |
| 00244011 | GUIMARAES | -2,12940 | -44,60690 | 1986-2015 | * | 238,6 | 332 | 488,5 | 476,5 | 344,3 | 202,9 | 139,1 | 31,7 | 5,8 | 6,4 | 11,3 | 64,8 | 2341,9 | 2484,7 |
| 00244012 | SAO BENTO | -2,70110 | -44,82330 | 1986-2015 | 27 | 205,5 | 256,7 | 347,5 | 381,5 | 306,8 | 169,3 | 88,5 | 22,1 | 7,7 | 10,6 | 17,1 | 69,3 | 1882,6 | 1861,4 |
| 00244032 | MARECHAL CUNHA MACHADO - DCEA | -2,58333 | -44,23333 | 1986-2015 | * | 205,2 | 285,5 | 420,1 | 409,8 | 296,1 | 174,4 | 119,6 | 27,2 | 5 | 5,5 | 9,7 | 55,8 | 2013,9 | 2136,6 |
| 00245010 | PINHEIRO | -2,51528 | -45,08556 | 1986-2015 | 28 | 165,1 | 221,6 | 316,7 | 321,3 | 272,2 | 170 | 104 | 33,5 | 9,6 | 5,8 | 18,1 | 46,2 | 1684,1 | 1653,15 |
| 00343003 | NINA RODRIGUES | -3,45940 | -43,89890 | 1986-2015 | 30 | 228,2 | 257,9 | 337,9 | 337,3 | 192,5 | 66 | 39,6 | 7,6 | 8,5 | 21 | 29,3 | 98,3 | 1624,1 | 1564,8 |
| 00343011 | GONCALO | -3,04390 | -43,23670 | 1986-2015 | 29 | 186,3 | 235,3 | 329,1 | 324,5 | 209,5 | 103,5 | 49,2 | 12,3 | 5 | 8,2 | 29,9 | 44,2 | 1537 | 1548,4 |
| 00344004 | CANTANHEDE | -3,63250 | -44,37640 | 1986-2015 | 30 | 265,9 | 274,4 | 370,6 | 329,1 | 212,5 | 66,5 | 32 | 14,4 | 11,9 | 40,2 | 47,8 | 107,3 | 1772,6 | 1796,5 |
| 00344010 | PRESIDENTE JUSCELINO | -3,08470 | -44,08360 | 1986-2015 | 28 | 258,5 | 294,9 | 383,2 | 356,7 | 250,2 | 119,3 | 85,7 | 35,2 | 14,6 | 25,1 | 23,3 | 93,8 | 1940,5 | 2017,25 |
| 00344012 | MIRANDA | -3,56670 | -44,58330 | 1986-2015 | 28 | 248,8 | 266,9 | 363 | 312,7 | 200,6 | 66,8 | 28,8 | 15,7 | 19,5 | 44,3 | 57,5 | 117,3 | 1741,9 | 1800,05 |
| 00345012 | BOA VISTA DO PINDARE | -3,40280 | -45,01060 | 1986-2015 | 27 | 222,1 | 275,3 | 380,5 | 375 | 222,5 | 94,9 | 47,7 | 23,8 | 31,1 | 33,8 | 50,1 | 126,6 | 1883,4 | 1784,2 |
| P33 | P33-MERGE | -2,80000 | -44,20000 | 1986-2015 | 30 | 159,9 | 243,8 | 403,6 | 426,3 | 328,4 | 166,3 | 107,9 | 38,5 | 1,7 | 0 | 0,9 | 72,4 | 1949,7 | 1997 |
| P45 | P45-MERGE | -2,60000 | -44,40000 | 1986-2015 | 30 | 256,8 | 394,9 | 459,3 | 360,9 | 244,8 | 273,2 | 130,2 | 12,8 | 0,4 | 0 | 5,1 | 35,8 | 2174,2 | 2257,5 |
| P46 | P46-MERGE | -2,60000 | -44,20000 | 1986-2015 | 30 | 205,2 | 285,5 | 420 | 409,8 | 296,1 | 174,5 | 119,7 | 27,2 | 1,1 | 0 | 0,7 | 55,8 | 1995,6 | 2050,3 |
| P47 | P47-MERGE | -2,60000 | -44,00000 | 1986-2015 | 30 | 167,9 | 310,5 | 404 | 423,7 | 321,4 | 146,2 | 110,2 | 35,8 | 1,9 | 0 | 4,1 | 66,5 | 1992,2 | 2046,3 |
| P58 | P58-MERGE | -2,40000 | -44,40000 | 1986-2015 | 30 | 188,6 | 552 | 445,1 | 262,5 | 200 | 244,3 | 119,1 | 4 | 0 | 0 | 19,4 | 23,8 | 2058,8 | 2123,6 |
| P59 | P59-MERGE | -2,40000 | -44,20000 | 1986-2015 | 30 | 267,6 | 407,8 | 430,4 | 345,5 | 238,5 | 216,6 | 132,9 | 8 | 0,2 | 0 | 6,5 | 33,4 | 2087,4 | 2156,8 |
| P60 | P60-MERGE | -2,40000 | -44,00000 | 1986-2015 | 30 | 241,9 | 357,5 | 404,5 | 422,6 | 284,6 | 191,4 | 127,1 | 20,5 | 0,9 | 0 | 3,8 | 47,7 | 2102,5 | 2174,3 |

* Calculado considerando a proporção observada em períodos comuns de dados com a estação de São Luís INMET-82280
MERGE: <http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/io/produtos/MERGE/>

Conforme se observa na Figura 5, as chuvas são mais abundantes na porção norte ocidental da ilha, atingindo valores da ordem de 2300 mm anuais, no município de Raposa, decaindo nos sentidos sul e sudeste, em direção ao continente, onde seus valores não ultrapassam os 2000 mm anuais.

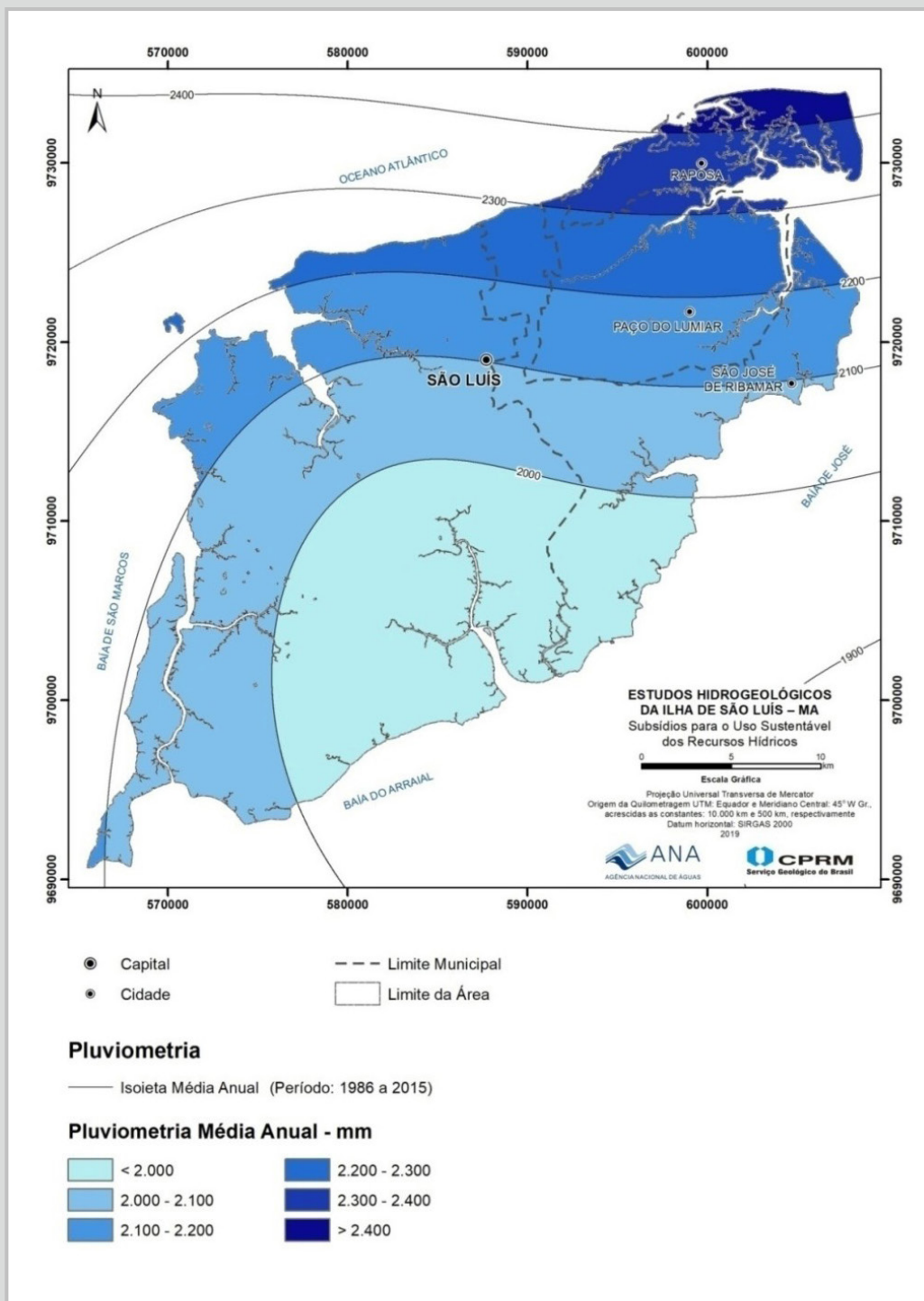


Figura 5: Pluviometria média anual na Ilha de São Luís



Foram também realizadas pesquisas, através de análises e testes estatísticos, visando detectar a existência de tendências e/ou mudanças climáticas abruptas, para se entender o cenário atual e ter uma ideia de um cenário futuro.

Esta análise permitiu, em síntese, as seguintes conclusões:

- Nos últimos 45 anos a temperatura vem aumentando na metrópole, com acentuada elevação entre os anos de 1991 a 2009;
- Está havendo aumento do número de dias secos consecutivos, confirmando a redução de chuva no período seco e, conseqüentemente, o aumento da estiagem, cuja intensificação se deu por volta do ano de 1990;
- Existe influência de *El Niño* e esse fenômeno pode explicar a falta de chuva no período seco;
- Está havendo redução do número de dias úmidos consecutivos;
- Por falta de significância estatística não se pode confirmar resultados do comportamento pluviométrico do semestre úmido;
- Existe influência do Dipolo do Atlântico sobre as precipitações, inclusive as chuvas intensas, principalmente no semestre chuvoso;
- O resfriamento do oceano Pacífico, próximo à costa sul-americana, que dependendo do nível de diminuição da temperatura e a persistência, pode estar associado a *La Niña*, e o resfriamento do norte do oceano Atlântico, são as condições mais favoráveis ao posicionamento da ZCIT, para responder pela maior quantidade de precipitação na região.

Todas as alterações verificadas, tanto na temperatura como na pluviosidade, parecem estar vinculadas ao incremento do uso e ocupação da terra nas últimas décadas na Ilha.

3.1.2. Hidrologia

A hidrografia da Ilha é formada pelos rios Anil, Bacanga, Cachorros, Estiva, Guarapiranga, Ilha, Inhaúma, Itaqui, Jeniparana, Paciência, Praias, Santo Antônio e Tibiri. A Figura 6 mostra o mapa das bacias hidrográficas correspondentes.

As marés chegam a atingir 7 m de amplitude afogando até os médios cursos das principais drenagens, que se encontram em acelerado processo de degradação ambiental, com poluição por esgotos e lixo doméstico, além de efluentes industriais. Parece não haver contribuição expressiva das águas subterrâneas para os fluxos de base dos rios locais.

As bacias dos rios Bacanga, Anil, Paciência, Santo Antônio, Praias encontram-se em grande parte urbanizadas, estando mais susceptíveis a impactos antrópicos, tais como despejos e vazamento de esgotos, deposição de lixo doméstico e inundações pela deficiência de drenagem urbana.

Na bacia do rio Bacanga estão localizados os reservatórios do rio da Prata, Batatã e Mãe Isabel, únicas captações de águas superficiais na ilha destinadas ao abastecimento público.

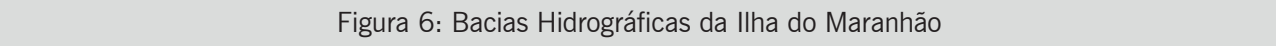


Figura 6: Bacias Hidrográficas da Ilha do Maranhão

No limite entre as bacias dos rios Inhaúma e dos Cachorros, está localizada a “Área de Disposição de Rejeitos de Bauxita – ADRB” pertencente a ALUMAR, com alto potencial de contaminação. Nessa mesma parte também se situam pequenos reservatórios de captação da ALUMAR, Babilônia I e II.

Inexistem séries hidrológicas, ou mesmo medições de vazões instantâneas nesses rios, e a grande influência das marés, cerca de 7 metros em 6 horas, atingindo até pontos mais interiores da ilha, impediram a calibração de modelos hidrológicos para estimar as vazões dos rios.

A ausência de medições de vazões e níveis dos rios na Ilha do Maranhão, juntamente com a grande influência das marés, impediu a construção de modelos hidrológicos para calcular as vazões de referência dos rios locais. Em vista disto, na tentativa de obter dados que fornecessem pelo menos uma ordem de grandeza dos fluxos hídricos superficiais locais, foram realizadas tentativas de medições dessas vazões, através de 3 campanhas de medições hidrométricas, considerando os períodos de marés baixa e alta e considerando os efeitos das marés. No entanto, devido a influência das marés, obteve-se apenas uma estimativa grosseira das vazões nas seções medidas nos diversos cursos d’água da Ilha (dados apresentados no Volume II do Relatório Final).

3.2. GEOLOGIA E TECTÔNICA

3.2.1. Caracterização Geológica

No mapeamento geológico da Ilha do Maranhão foram identificadas unidades pertencentes à Bacia de São Luís (Grupo Itapecuru - Unidade indiferenciada, Formação Alcântara e Formação Cujupe) e Coberturas Cenozóicas (formações Barreiras, Pós-Barreiras e Depósitos Recentes, como mangues, dunas, pântanos salinos, etc.).

O Grupo Itapecuru ocorre praticamente em toda a área, perfazendo pelo menos 80% da Ilha de São Luís, sendo observado em cortes de estradas, morrotes, cavas de extração de areia e falésias. Compõe-se principalmente de arenitos e pelitos intercalados com arenitos finos, bem selecionados, com coloração amarela, roxa, vermelha e esbranquiçada, bem laminados, às vezes ondulados. Com menor expressão ocorrem siltitos vermelhos com estratificações cruzadas acanaladas e truncadas por onda¹, arcóseos, calcirruditos e calcarenitos².

A Formação Alcântara constitui-se de siltitos com estratificação acanalada, às vezes intercalados com argilas cinza e calcarenitos e calcirruditos (Figura 7).

¹ A estratificação cruzada consiste em conjuntos de material estratificado nos quais as lâminas inclinam-se em relação à superfície principal de sedimentação. Estratificação Acanalada – as superfícies limitantes são curvadas, em forma de calha. Estratificação truncada por ondas – depositam-se em montículos baixos e depressões suaves dependendo da energia da onda.

² Arcóseos são arenitos geralmente de granulação grossa, com seleção regular, integrados em sua maior parte por quartzo e feldspato e presumivelmente derivados de um granito ou de outras rochas ígneas ácidas de textura granular. A quantidade mínima de feldspato deve estar em torno de 12,5% (IBGE, 1999). Calcirruditos são carbonatos com a granulometria maior 2 mm. Calcarenitos são carbonatos com granulometria entre 62 µm e 2 mm.

A Formação Cujupe (Figura 8), por sua vez, é composta predominantemente por arenitos intercalados a siltitos e, de forma secundária, conglomerados. Os arenitos são caulínicos, com granulometria fina a muito fina, bem selecionados, de coloração branca ou rósea a amarelada. Os argilitos possuem coloração branca, cinza a violácea e os conglomerados são do tipo intraformacional (origem na Fm. Cujupe), com clastos de argila e matriz arenosa.

A Formação Barreiras (Figura 9) aflora em porção muito reduzida da Ilha, composta por uma sequência de arenitos e pelitos de cores variadas, pintados, mal selecionados, com nível de alteração colunar no topo. Secundariamente são registrados conglomerados, mal selecionados, com grãos subangulosos, ferruginizados.

Sedimentos correlacionáveis aos depósitos Pós-Barreiras (Figura 10) ocorrem por toda a ilha, formando pacotes de até 10m, constituídos por areias de cores vermelho-clara a alaranjada, friáveis a duras, maciças, bioturbadas (formação de estruturas nos sedimentos devido à ação de organismos), de boa a média seleção, granulometria fina a média, localmente grossa a conglomerática, ocorrendo nas cotas mais elevadas e nos relevos de topo plano.

Os Depósitos Recentes (Figura 11) são representados pelas marés lamosas, cordões litorâneos antigos, depósitos de pântanos salinos, mangues, depósitos eólicos litorâneos e aluviões. Ocupam cerca de 9% da área da ilha, com destaque para os manguezais, que ocupam 5% de sua área total.

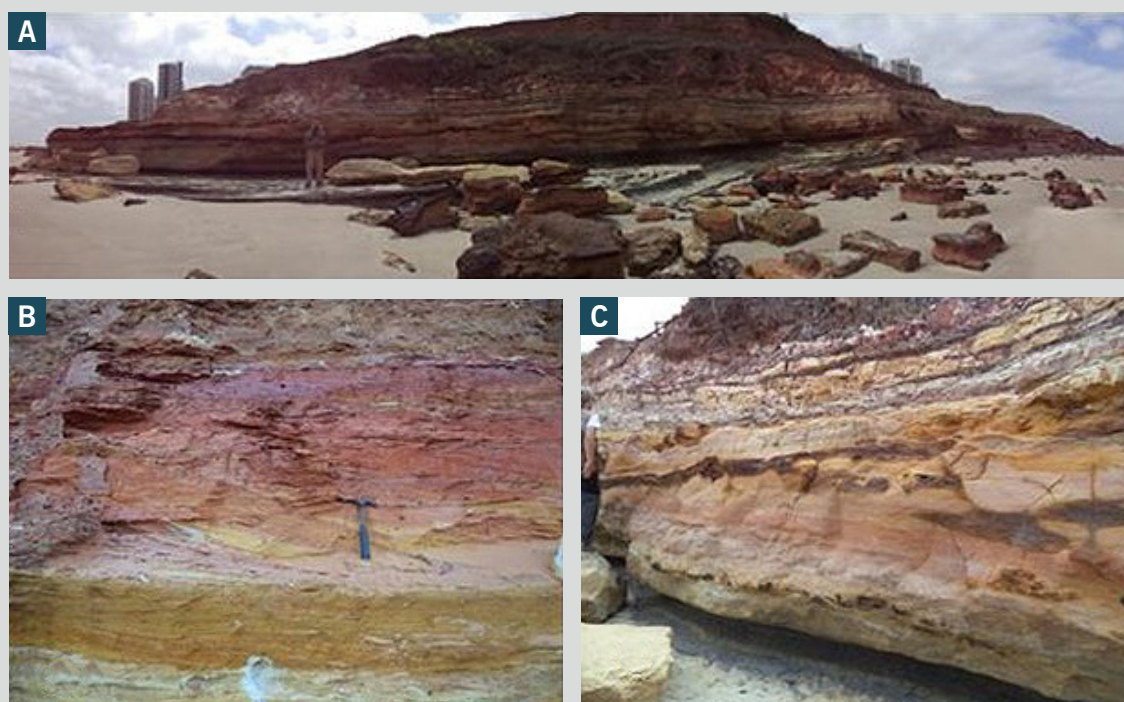


Figura 7: (A) Formação Alcântara; (B) siltitos com estratificação acanalada; (C) intercalações de argilas cinza, calcarenitos e calcirruditos



Figura 8: Formação Cajupe



Figura 9: Formação Barreiras

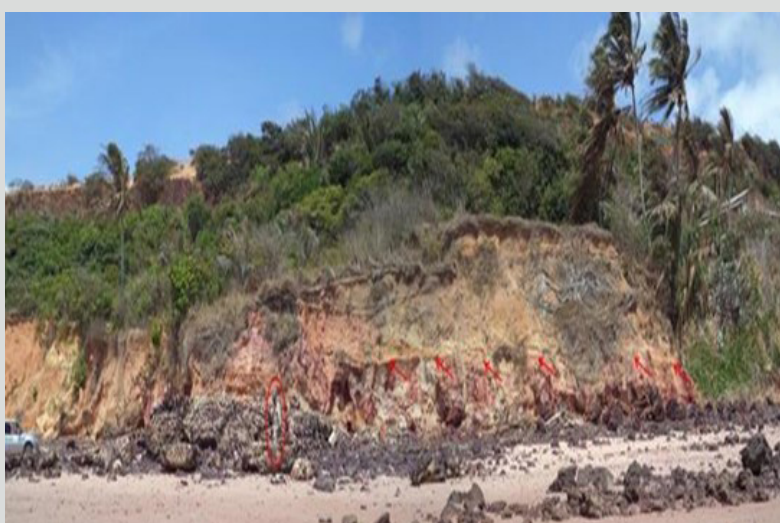


Figura 10: Depósitos Pós Barreiras



Figura 11: Depósitos recentes

3.2.2. Tectônica

Do ponto de vista tectônico, na Ilha de São Luís é possível distinguir dois domínios principais:

- O Domínio I, na porção norte-nordeste; e
- Domínio II, na porção oeste-sudeste (Figura 12).

O Domínio I tem o relevo relativamente plano, cotas mais elevadas (variando de 30 a 60m) e lineamentos de drenagens com direções principais ENE-WSW. Predominam rochas da Unidade Pós-Barreiras, com espessuras em torno de 50m em pacotes contínuos.

No Domínio II o relevo é mais dissecado, exibindo as cotas mais baixas da Ilha (menos de 30m) e os lineamentos de drenagens têm direções principais NW-SE. Predominam as rochas do Grupo Itapecuru, sendo os sedimentos do Pós-Barreiras de menor espessura, em torno de 10 m e menor extensão lateral.

Destaca-se que houve uma forte atuação neotectônica na Ilha de São Luís, tanto em escala regional, quanto de afloramento, cujos movimentos interferiram na continuidade lateral das camadas, fazendo com que camadas de unidades mais antigas ficassem em contato lateral com unidades mais novas como, por exemplo, dunas eólicas lado a lado com unidades de idades entre o Cretácea e o Paleógeno (Figura 12).

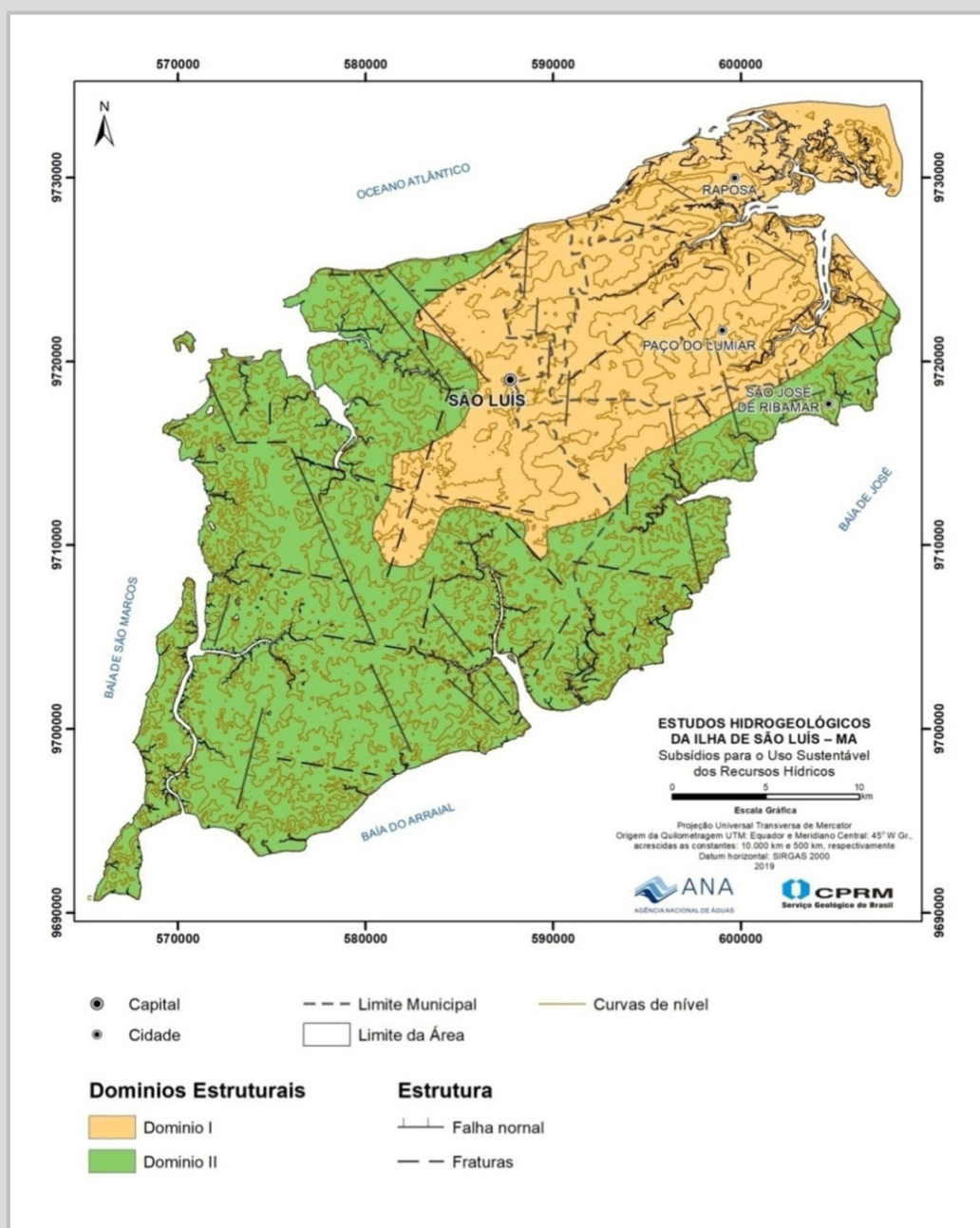


Figura 12: Domínios Estruturais da Ilha do Maranhão

Estes dois domínios se encaixam num modelo denominado Horst e Gráben³ (Figura 13), onde o Domínio I representa um Gráben, no qual foram preservadas as unidades mais jovens (Pós- Barreiras), com as rochas do Grupo Itapecuru situadas em maiores profundidades. No Domínio II, porção tectonicamente mais elevada da Ilha (Horst), a erosão atuou de forma mais severa, deixando o relevo mais dissecado e com resquícios das unidades mais jovens (Pós-Barreiras).

³ Graben e Horst são designações dadas em geologia estrutural e em geografia física a um bloco de território elevado em relação ao território vizinho. A parte que rebaixou é chamada Graben e a parte que se soergueu é chamada Horst.

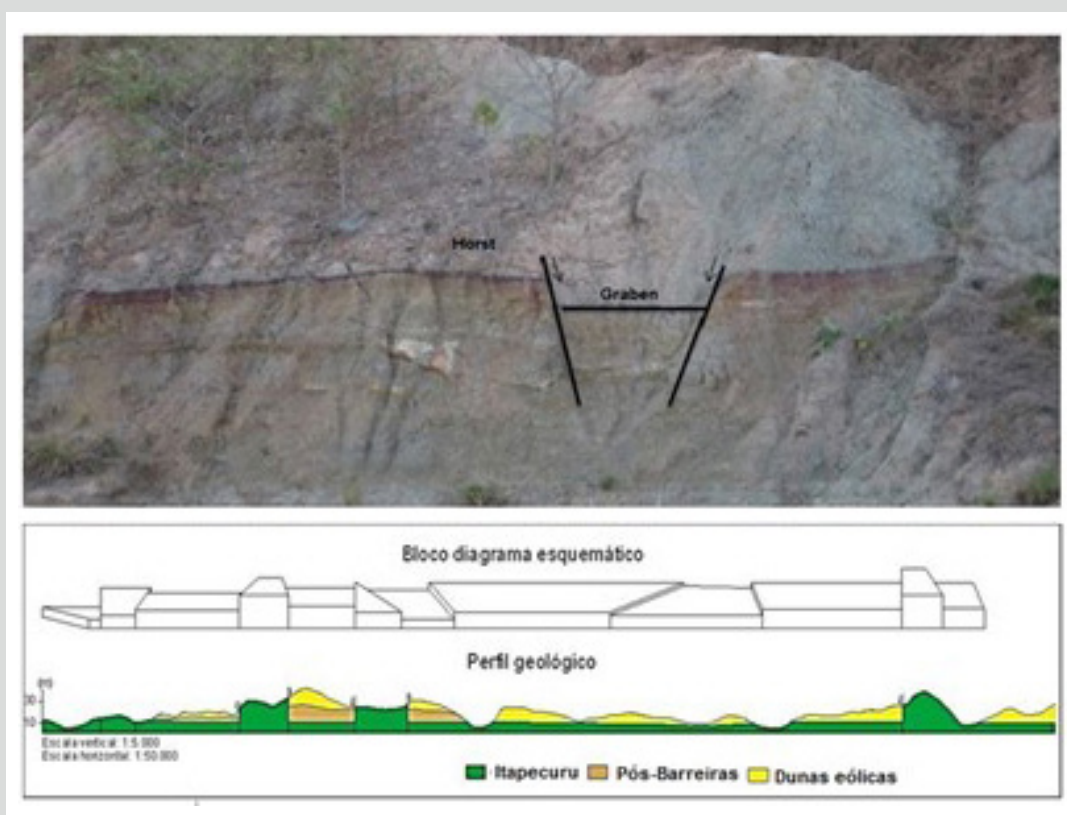


Figura 13: Estrutura extensional tipo horst e gráben em escala de afloramento e Perfil geológico e bloco diagrama esquemático ao longo da Av. Litorânea (Domínio II)

A forte estruturação decorrente desta configuração desempenha importante papel na recarga de águas subterrâneas, uma vez que a infiltração pode ocorrer diretamente através das inúmeras falhas e fraturas existentes.

3.3. HIDROGEOLOGIA

Destaca-se que as diferentes unidades geológicas se unem, de acordo com suas características hidrodinâmicas e com relação ao estado de pressões aos quais estão submetidas. Utilizando o conceito de taxonomia hidrogeológica (DINIZ et al., 2014), estas unidades compõem quatro Unidades Hidroestratigráficas ou Sistemas Aquíferos, apresentadas no mapa hidrogeológico (Figura 14) e descritas a seguir:

a) Sistema Aquífero Itapecuru-Alcântara

Engloba as unidades cretácicas componentes do Grupo Itapecuru, exceto a Formação Cujupe, cuja sedimentação ocorreu até o Terciário. Apresenta espessuras muito elevadas, superiores a 500 m, embora apenas a sua porção mais superficial, de ocorrência em até 100 m abaixo do nível do mar, seja aproveitada como aquífero, devido ao aumento do teor em sais em profundidade.



Em termos de produtividade, na região do Parque Estadual do Bacanga, os valores de vazão se situam entre 50 e 100 m³/h e as vazões específicas entre 1 e 2 m³/h/m. Devido à conformação estrutural da Ilha, aflora de forma restrita em alguns pontos próximos ao litoral como, por exemplo, junto ao farol de São Marcos e nas proximidades do Porto de Itaqui, não sendo representado em mapa na escala deste trabalho. Constitui um sistema semiconfinado e localmente confinado, com recarga por drenança das unidades superiores e, localmente, pelas precipitações pluviométricas.

A transmissividade (T) varia entre 10⁻² a 10⁻³ m²/s nas proximidades do Parque Estadual do Bacanga, região oeste da Ilha. Nas demais porções, os valores oscilam entre 10⁻³ e 10⁻⁴ m²/s. A condutividade hidráulica varia, considerando uma espessura útil média de 100 m para a unidade, entre 10⁻⁴ a 10⁻⁶ m/s e o coeficiente de armazenamento oscila entre 10⁻³ a 10⁻⁴.

b) Sistema Aquífero São Luís

Formado pela associação das unidades Cujupe, Barreiras e Pós-Barreiras. Ocorre na forma de um empilhamento vertical de toda a sequência, ou através de contatos laterais entre elas, conectados por falhas, o que lhes proporciona continuidade hidráulica no sentido horizontal. Pode ocorrer as seguintes combinações:

- ▶ Cujupe + Barreiras + Pós-Barreiras
- ▶ Cujupe + Barreiras
- ▶ Cujupe + Pós-Barreiras

Constitui um sistema aquífero livre, aflorante em toda a Ilha, com recarga direta a partir das abundantes precipitações pluviométricas. Tem como principais zonas de recarga as áreas planas dos tabuleiros, notadamente onde ocorrem matas de vegetação nativa preservada.

Apresenta espessuras normalmente inferiores a 100 m, limitadas em profundidade pela ocorrência das camadas argilosas e calcíferas da Formação Alcântara. Em alguns locais, como nas proximidades das cabeceiras do rio Paciência e na Estrada da Maioba, suas espessuras possam atingir valores maiores. Suas características hidráulicas e de produtividade parecem ser condicionadas em parte por estas variações de espessuras. Alguns poços mostram águas salinizadas, oriundas principalmente de infiltrações a partir dos extensos depósitos de mangues existentes.

As transmissividades (T) variam entre 10⁻² a 10⁻³ m²/s, enquanto a condutividade hidráulica muda constantemente em função das variações de espessura, variando entre 10⁻⁴ e 10⁻⁵ m/s. O rendimento específico oscila entre 10⁻² a 10⁻⁴.

c) Sistema Aquífero Holocênico

Formado por Depósitos Litorâneos, Eólicos e Aluviões. Constitui um aquífero livre, aflorante ao longo da faixa litorânea e preenchendo os principais vales fluviais. Tem espessuras bastante reduzidas, inferiores aos 10 m, exceto no caso dos Depósitos Eólicos, que podem exceder este valor. Tem recarga direta pelas precipitações pluviométricas.

d) Unidade Não Aquífera

Representada pelos depósitos de mangues, com grande teor de finos, matéria orgânica e argilas expansivas que, saturadas por águas salinizadas, não funcionam como aquíferos.

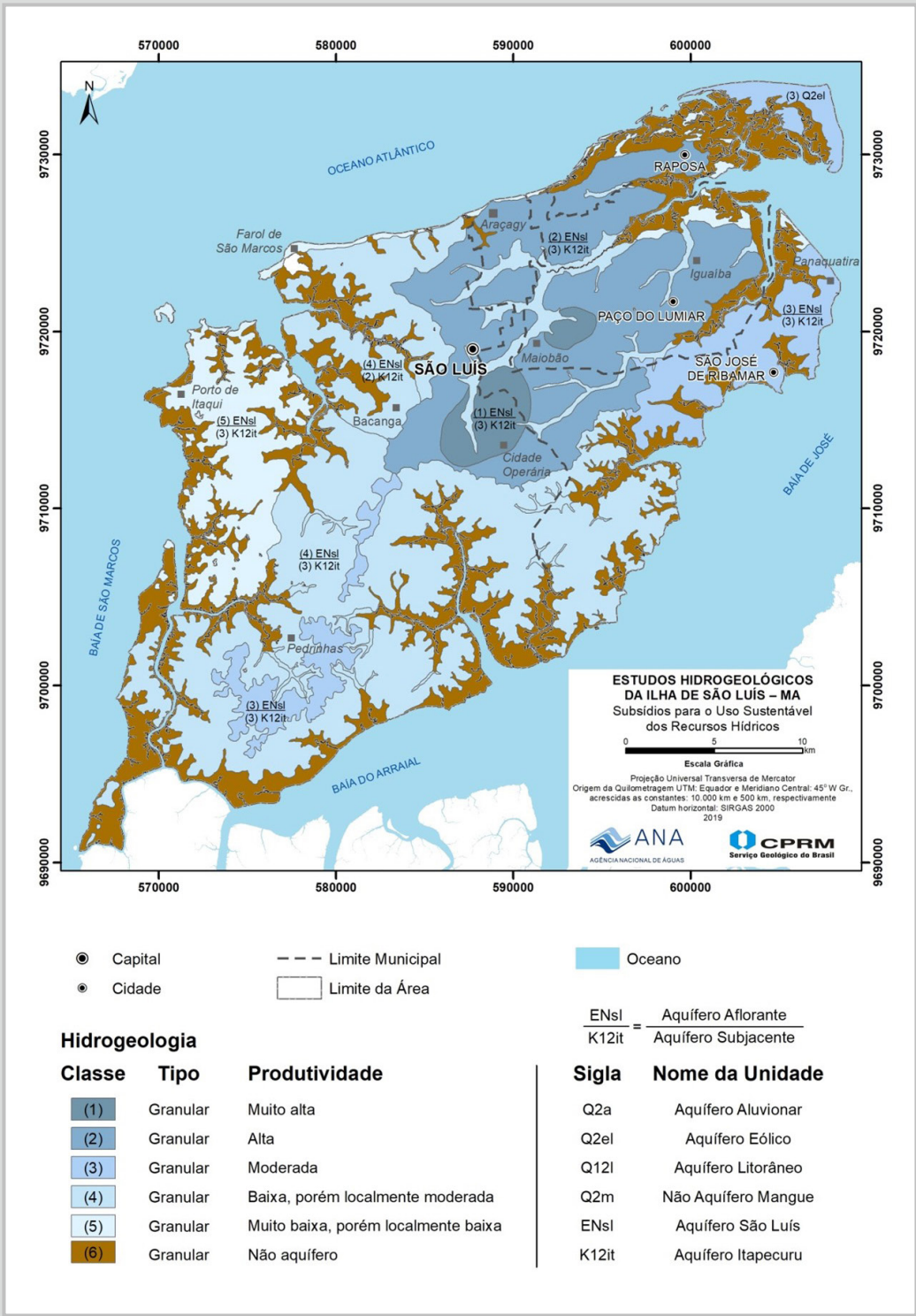


Figura 14: Mapa Hidrogeológico simplificado da Ilha de São Luís

3.4. GEOMORFOLOGIA, SOLOS, USO DA TERRA E TESTES DE INFILTRAÇÃO

3.4.1. Unidades Geomorfológicas

Com base na análise e reconhecimento das Unidades Morfoestruturais e Morfoesculturais⁴, a Ilha do Maranhão foi compartimentada em 07 padrões de relevos distintos para caracterizar a Geomorfologia da Ilha do Maranhão. A Tabela 5 e a Figura 15 descrevem e localizam as unidades de relevo mapeadas.

Tabela 5: Padrões de relevo mapeados na Ilha de São Luís

| SÍMBOLO | TIPO DE RELEVO | DECLIVIDADE (graus) | AMPLITUDE TOPOGRÁFICA (metros) |
|---------|--|---------------------|--------------------------------|
| R1a | Planícies de Inundação (Várzeas) | 0 a 3° | Zero |
| R1d1 | Planícies Fluviomarinhas (mangues) | 0° | Zero |
| R1e | Planícies Costeiras (terraços marinhos e cordões arenosos) | 0 a 5° | 2 a 20 |
| R1f | Campo de Dunas | 3 a 30° | 2 a 40 |
| R1h1 | Depósitos Tecnogênicos (aterros sobre corpos d'água) | 0° | Zero |
| R2a1 | Tabuleiros | 0 a 3° | 20 a 50 |
| R2a2 | Tabuleiros Dissecados | 0 a 3° | 20 a 50 |

3.4.2. Solos

Foram visitados 32 pontos de observação e efetuada análise da dinâmica geológico-geomorfológica e dos padrões de solos aplicada a uma avaliação ambiental integrada com enfoque nos impactos que a expansão e consolidação da metrópole exercem sobre os recursos hídricos da Ilha do Maranhão. Foi tomado, como referência, estudo de solos desenvolvido pela UEMA (GAMA *et al.*, 2012). Ocorrem os seguintes tipos de solos (Figura 16).

- Gleissolos Hápicos tb distróficos: Compreendem solos mal drenados, relacionados às áreas mais deprimidas do terreno, com deficiência de oxigênio, dando ao solo uma coloração acinzentada a azulada, quase sempre implicando em presença de ferro, principalmente devido à condição de redução. Pela proximidade do mar, é comum estarem associados a solos com excesso de sais (solos salinos). Tais solos possuem estruturas prismáticas, comumente colunares, com baixíssima permeabilidade;
- Neossolos Quartzarênicos órticos: Correlacionados principalmente aos tabuleiros da formação terciária do Grupo Barreiras;

⁴ Unidades morfoestruturais: grandes unidades de relevo formadas principalmente pelos fatores endógenos (ligados à dinâmica interna da Terra). Unidades morfoesculturais: estão diretamente relacionadas às semelhanças genéticas e aos padrões do modelado. Diz respeito as formas semelhantes, ou seja, as características fisionômicas e genéticas que individualizam um conjunto de colinas, por exemplo.



- c) Argissolos Vermelho-Amarelos ou Vermelhos distróficos: Desenvolvidos em colinas relacionadas às formações cretáceas do Itapecuru. É bastante comum a ocorrência de lateritas associadas a esses solos;
- d) Solos Indiscriminados de Mangue: Ocorrência restrita às áreas de baixadas.

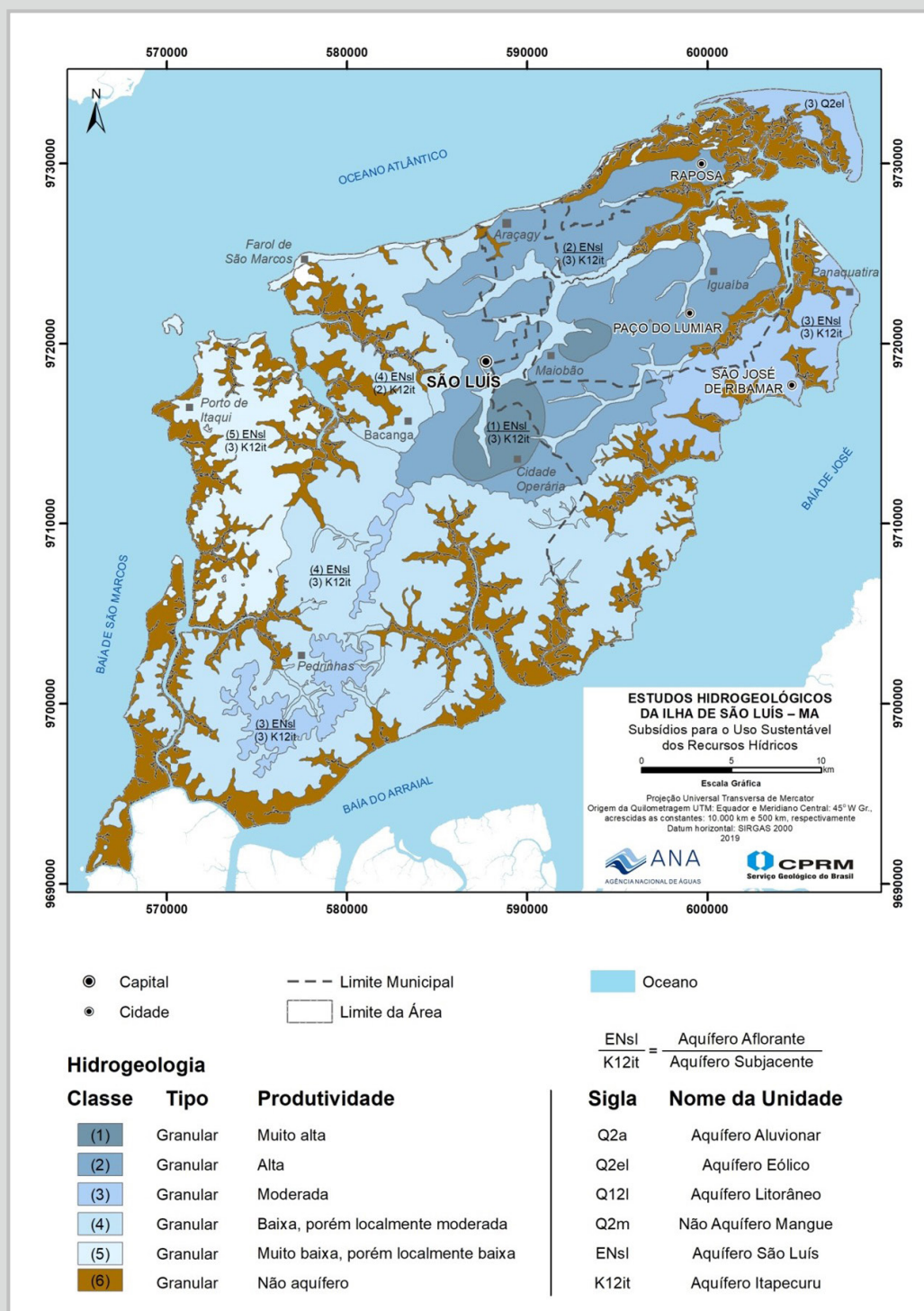


Figura 15: Mapa Geomorfológico da Ilha de São Luís

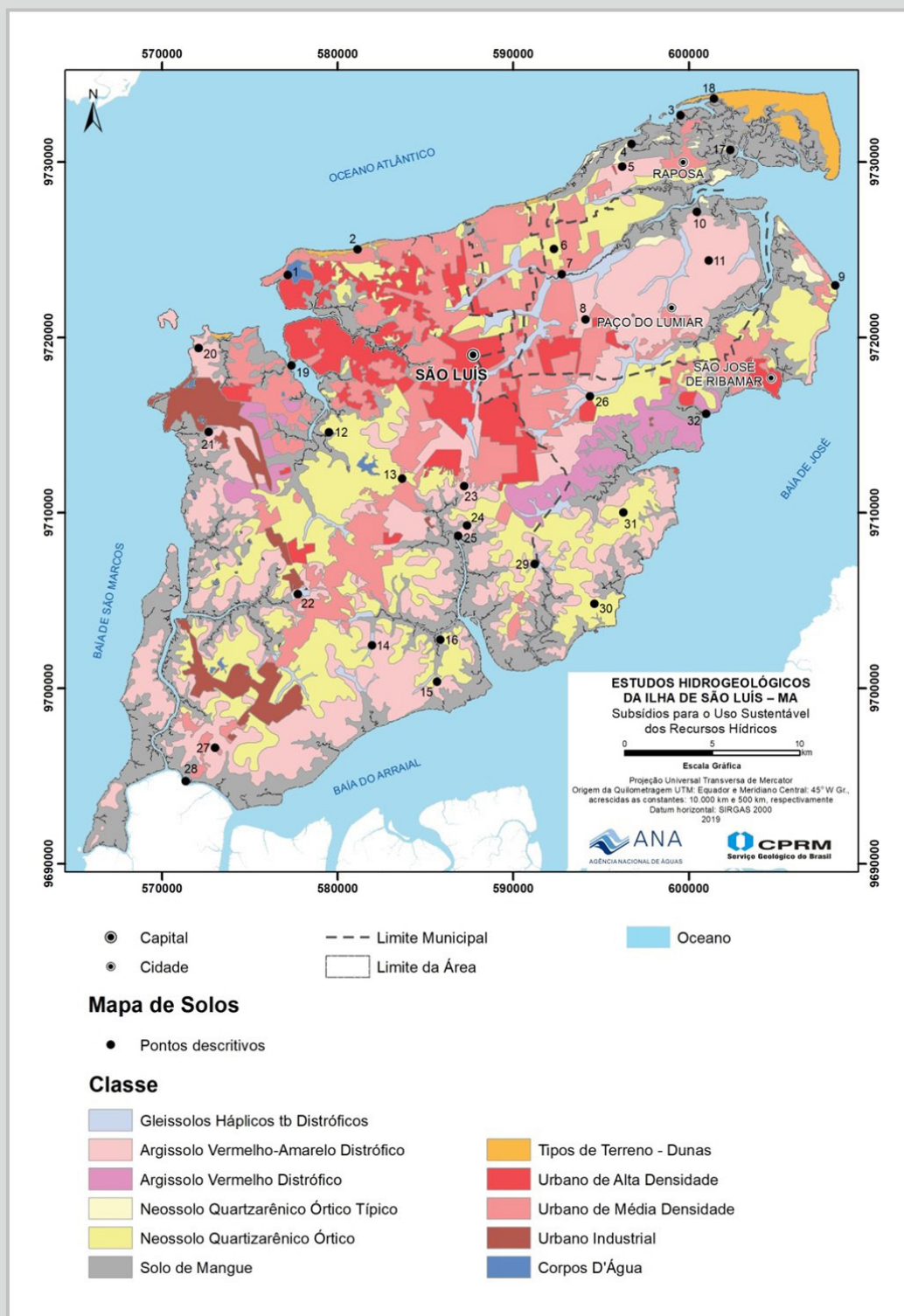


Figura 16: Mapa de Solos da Ilha de São Luís



3.4.3. Uso da Terra

A partir da compreensão histórica da evolução da urbanização na ilha e de seus impactos no meio ambiente local e tomando como base o Mapa de Uso e Ocupação do Solo da UEMA (2016), foi elaborado o mapa mostrado na Figura 17, onde se encontram definidas onze classes de uso e ocupação do solo: mangues, restingas, mata secundária, mata secundária fragmentada, culturas agrícolas, solo exposto, urbano de alta, média e baixa densidade, urbano industrial e corpos d'água.

O mangue é um ecossistema com vegetação assentada em terrenos lamosos, saturados em água salobra e muito ricos em matéria orgânica, resultantes da interface entre os ambientes terrestre e marinho. Os manguezais ocupam uma área de 194,30 Km², que representa 21,53% da Ilha.

As restingas ocorrem associadas a diversos tipos de depósitos sedimentares litorâneos paralelos à linha de costa, como praias, cordões arenosos e campos de dunas, assim como nos estuários dos rios. Ocupam uma área de 15,61 km², representando 1,73% da Ilha.

As matas secundárias, resultantes da degradação das matas ou florestas primárias, caracterizam-se por um maior espaçamento das espécies vegetais, notadamente as de maior porte, do que nas matas primárias. Ocupam uma área total de 120,26 Km², equivalente a 13,32% do território da ilha.

As matas secundárias fragmentadas, resultantes da divisão em fragmentos menores da mata secundária, mostram vegetação ainda mais esparsa, e tendem à modificação de seus padrões de uso e ocupação devido à expansão urbana. Ocupam uma área total de 195,71 Km², perfazendo 21,7% da área.

As áreas de culturas agrícolas são constituídas por pequenas parcelas com cultivos de subsistência, como mandioca, vinagreira, pomares domésticos e hortaliças. Representam 3,48% do território da Ilha, com área de 31,34 km².

As áreas de solo exposto na Ilha do Maranhão estão, em geral, associadas à retirada da cobertura vegetal para implantação de culturas agrícolas, terraplenagem em área industrial e urbana e mineração. As manchas mapeadas ocupam uma área de 7,85 Km², que equivale a 0,88% da Ilha.

As áreas urbanas altamente povoadas, correspondem às nucleações mais adensadas, onde o revestimento e a impermeabilização do solo representam a quase totalidade da superfície. Estão localizadas principalmente em São Luís (Centro Histórico, bairro São Francisco, e no centro de São José de Ribamar). Tem área total de 72,25 Km², que corresponde a 8,0% da Ilha.

As áreas urbanas de média densidade, com alguma vegetação e menor impermeabilização do solo, abrangem 156,78 km², ou 17,37% da área total.

As áreas urbanas de baixa densidade, ocupam uma área de 78,77 km², ou 8,72% da Ilha.



As áreas urbanas industriais da Ilha do Maranhão localizam-se em dois núcleos: o primeiro na porção oeste da Ilha, em torno do Porto de Itaqui e o segundo na parte sul, polarizado pela indústria Alumar. Ocupam uma extensão superficial de 26,80 Km², que corresponde a 2,97% do território da Ilha.

Os corpos d'água superficiais, representados por lagoas, barragens e pequenos lagos, têm na Lagoa da Jansen sua maior expressão. Totalizam uma superfície de 2,77 Km², equivalentes a 0,30% da área da Ilha de São Luís.

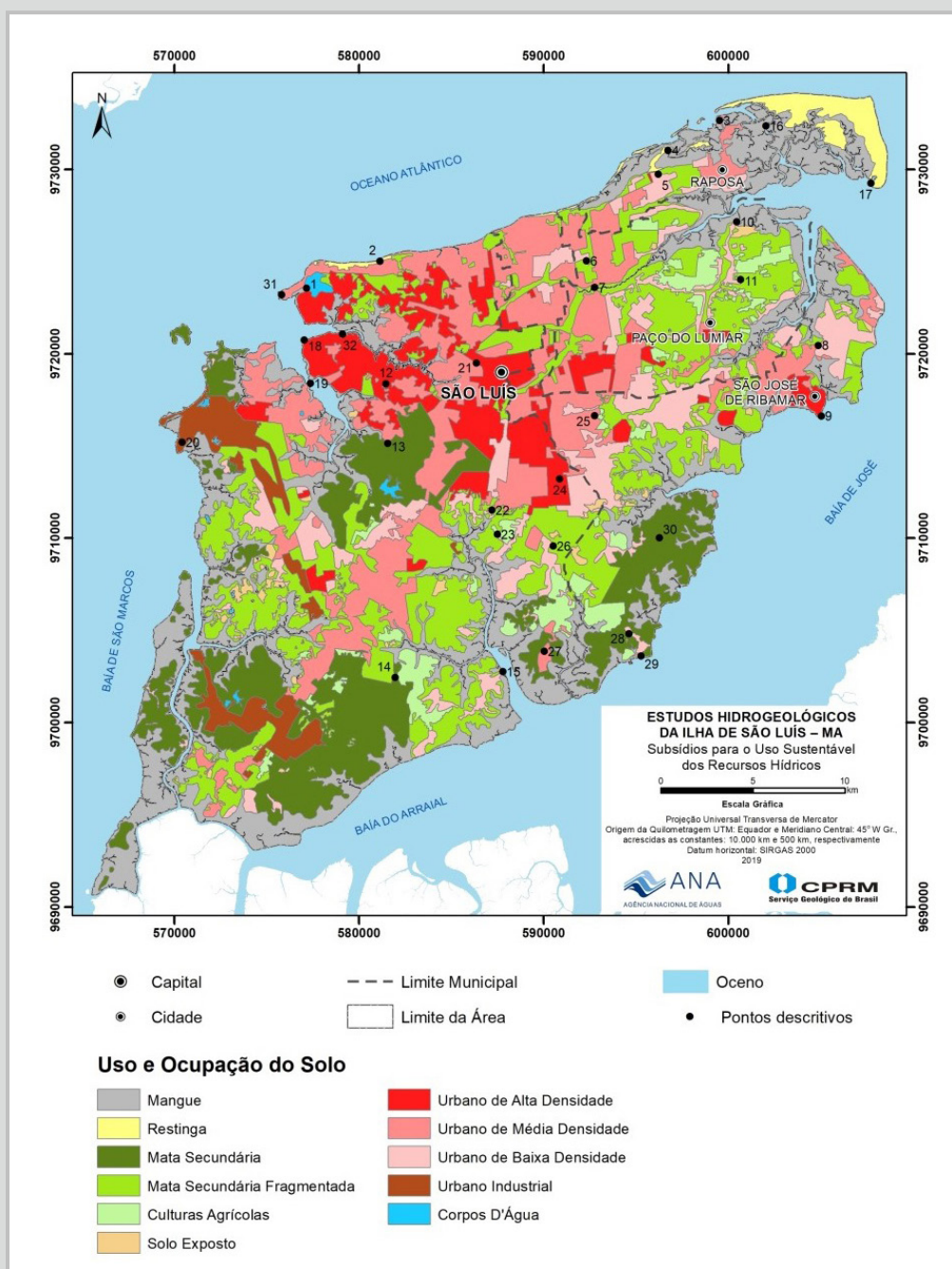


Figura 17: Mapa de Uso e Ocupação do Solo

3.4.4. Testes de Infiltração

Para a execução dos testes de infiltração, foram utilizados os seguintes equipamentos: Permeâmetro de Guelph, a 20 e 60 cm de profundidade, com cargas hidráulicas de 5 e 10 cm e cargas combinadas; Infiltrômetro de Anel e Infiltrômetro de Tensão (Mini Disk - Decagon). Foram realizadas 12 avaliações (três ensaios de infiltração com três repetições em cada ponto – 9; mais três ensaios de permeabilidade e condutividade hidráulica insaturada – 12) em cada uma das 13 áreas selecionadas, atingindo, no total, 156 avaliações.

Os resultados obtidos, considerando a elevada correlação encontrada entre os valores da Kfs utilizando a carga hidráulica de 10 cm, mostraram os resultados mais coerentes no universo dos dados obtidos.



Figura 18: Infiltrômetro de anel (single disk)



Figura 19: Permeâmetro de Guelph

Dados secundários de testes de infiltração, produzidos por Santos e Pereira (2013), na Subbacia do rio Maracanã, utilizando o método do duplo anel, foram também analisados conjuntamente com os dados primários produzidos neste trabalho.

Os resultados, considerando as duas autorias relacionadas, mostram que, nos locais onde foram realizados os testes, a infiltração ocorre de forma mais efetiva nas seguintes situações:

- 1) Na Bacia do rio Paciência, com valores de Kfs oscilando entre 1,4 e 11,9 cm/h; um valor mais elevado, oscilando entre 11,9 e 32,9, foi verificado em uma falésia na praia de Araçagi;
- 2) Nas áreas planas dos topos dos tabuleiros (Sistema Aquífero São Luís/Pós-Barreiras);
- 3) Nas classes de uso e ocupação do solo das matas secundárias fragmentadas e urbano baixo;

Na bacia do rio Paciência também foram obtidos valores próximos de zero em uma área intensamente urbanizada localizada no Maiobão.

Foram feitas interpolações (Kfs com o uso da carga hidráulica de 10 cm), utilizando o método do vizinho natural (natural neighbor) cujos resultados ressaltam a tendência da ocorrência de maior infiltração nos solos dos topos dos tabuleiros da Ilha de São Luís. A Figura 20 mostra os resultados obtidos.

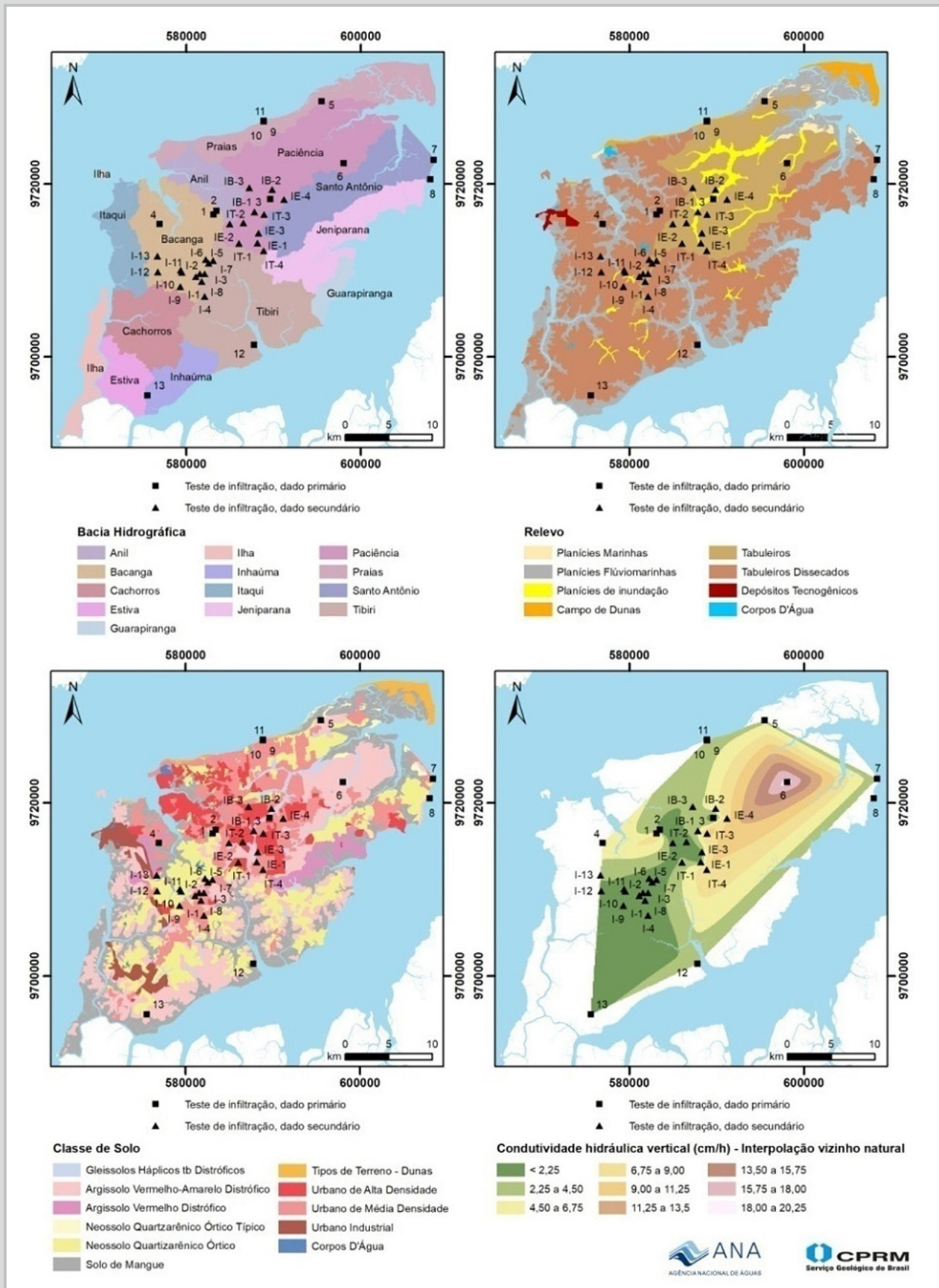


Figura 20: Capacidade de infiltração dos solos versus bacias hidrográficas, relevo, uso e ocupação da terra; interpolação pelo método do vizinho próximo (natural)

3.5. AVALIAÇÃO DA URBANIZAÇÃO

Os efeitos do grande crescimento populacional e industrial na Ilha de São Luís nas últimas décadas refletem-se diretamente nas questões relativas ao saneamento básico que, de acordo com a Política Nacional de Saneamento Básico - Lei Federal nº 11.445 (2007), tem como fundamentos, a universalização do acesso e a integralidade dos serviços de saneamento básico, entendendo esses como sendo o abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais.

3.5.1. Sistema de Drenagem Urbana

A ocupação desordenada da área, impulsionada principalmente pelos empreendimentos industriais, intensificou o surgimento de vários problemas de cunho social, econômico e ambiental, com destaque para a capital maranhense, que se transformou em um polo atrativo de mão de obra.

Grande parte da vegetação natural deu lugar a expansão imobiliária, ampliando cada vez mais as áreas impermeabilizadas, acarretando a minimização da infiltração e o aumento das vazões escoadas superficialmente. São constantes as ocorrências de alagamentos em toda a região. Em levantamento *in loco* realizado conjuntamente com órgãos públicos dos quatro municípios da ilha, foram constatados mais de 90 pontos principais de frequentes alagamentos.

Ressalta-se a necessidade da elaboração de um “Plano Diretor de Drenagem Urbana” para a Ilha, a implantação de redes de monitoramento hidrológico, a criação de séries históricas hidrometeorológicas, a implantação de sistemas de alerta de inundações, o combate à poluição dos recursos hídricos e a educação da sociedade para seu uso e preservação.

A implantação de uma rede de drenagem urbana adequada e compatível com o cenário urbano, diretamente influenciado pelo abrupto crescimento populacional, se constitui em medida prioritária.



Figura 21: Exemplos de rede de drenagem urbana inadequada e incompatível com o cenário urbano



3.5.2. Resíduos Sólidos

De acordo com estimativas, apenas o município de São Luís produz cerca de 1.400 toneladas de detritos diariamente (LIMA, 2013), que deveriam ser recolhidos de maneira adequada, mas terminam, em grande parte, se acumulando em praças, canteiros e terrenos baldios na Ilha.

A situação é tão séria que o Dr. Lúcio Macedo, Professor de Saneamento Ambiental nas Universidades Federal e Estadual do Maranhão, em entrevista no ano de 2013, chegou a afirmar que em São Luís existiria um lixão para cada bairro, com distâncias médias de 2 km entre si, classificando a situação como crítica e afirmando que 60% dos 350 bairros não tinham estrutura para lidar com o montante de resíduos descartados.



Figura 22: Exemplos da disposição inadequada dos resíduos sólidos

A partir do estabelecimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, o Governo do Maranhão elaborou o Plano Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos do Estado do Maranhão (PEGRS-MA, 2012) e, a Prefeitura de São Luís promulgou a Lei Municipal nº 6.321/2018, visando “fortalecer a Gestão de Resíduos Sólidos - GRS, e estabelecer/organizar o sistema de limpeza urbana do município, incluindo a gestão integrada de resíduos sólidos...”.

Foram desativados grandes lixões existentes, como o do bairro Iguaíba em Paço do Lumiar e o do Canavieira em São José de Ribamar. Atualmente o descarte dos resíduos dos municípios da ilha ocorre preferencialmente na Estação de Tratamento de Resíduos localizado no município de Rosário, já fora da área insular.

3.5.3. Sistema de Esgotamento Sanitário

Uma das questões mais sérias que afeta a qualidade de vida, o meio ambiente e os recursos hídricos na Ilha de São Luís é, sem dúvidas, a questão do esgotamento sanitário. Possuidora de uma rede de esgotos antiga e mal dimensionada para o grande crescimento que ocorreu na área, os vazamentos da rede de esgoto são frequentes, permitindo infiltrações de águas contaminadas que podem atingir os aquíferos, visto conterem matérias orgânicas e inorgânicas nas formas dissolvida, coloidal e em suspensão que constituem os principais contaminantes das águas subterrâneas em zonas urbanas. Além dos vazamentos nas redes de saneamento, ocorrem, também infiltrações por esgotos depositados *in situ*, no caso de fossas sépticas e sumidouros.

Diante desta difícil situação, o Governo do Estado do Maranhão, por meio da CAEMA vem enviando esforços e fazendo investimentos significativos, tanto na aumento da cobertura sanitária local, quanto na modernização e melhoria do sistemas de esgotamento já existentes, por meio da ampliação e aperfeiçoamento dos cinco sistemas de esgotamento existentes: as ETEs de Vinhais, Bacanga, São Francisco, Jaracati e Anil.



Figura 23: Exemplos de sistemas de esgotamento sanitário na Ilha de São Luis

Apesar disso, ainda se pode observar lançamentos de esgoto a céu aberto em grande quantidade de logradouros e corpos hídricos, totalmente desprovidos de tratamentos sanitário.

De acordo com Atlas Esgoto (ANA, 2017), em 2013 a situação do esgotamento sanitário na Ilha de São Luís era entendida como extremamente grave, com 51,6% do esgoto coletado, mas apenas 11,1% coletado e tratado. Cabe ressaltar que a ETE Vinhais ainda não estava em operação à época.



3.5.4. Sistema de Abastecimento de Água

O abastecimento de água na Ilha do Maranhão baseia-se na utilização conjunta de águas superficiais e subterrâneas.

As águas superficiais são representadas pelos reservatórios da barragem do Batatã (Sistema Sacavém) e, na maior parte, pelo sistema produtor do rio Itapecuru (sistema ITALUIS), fora da Ilha de São Luís. A água subterrânea é obtida pela exploração dos aquíferos Itapecuru e Barreiras.

As águas subterrâneas são exploradas de forma compartilhada pela CAEMA, pela BRK Ambiental e por Serviços Autônomos de Água e Esgoto – SAAE dos municípios. A BRK Ambiental opera as captações de águas subterrâneas nos municípios de São José de Ribamar e Paço do Lumiar, e a segunda desempenha o mesmo trabalho em Raposa. Em São Luís, a exploração das águas subterrâneas é de responsabilidade da CAEMA.

De acordo com informações da CAEMA, a produção total média mensal de água tratada na cidade de São Luís em 2018 foi de 10.442.258,05 m³. Deste total, 5.045.958,25 m³/mês (48% do total) representa a parcela superficial, captada no Sistema Italuís, enquanto 5.396.300,00 m³/mês (52%) representa a contribuição subterrânea (Bacanga + Saída EEAT/ Paciência + Cidade operária + Sistemas isolados).

Já a produção total de água subterrânea na ilha, incluindo os dados obtidos de produção da BRK Ambiental, SAAE e poços privados, foi estimada em 8.669.567 m³/mês, e se distribui conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Produção de água subterrânea nos municípios segundo o cadastro de poços

| CAPTAÇÃO | MUNICÍPIO | ID | SISTEMA OPERACIONAL | VOLUME PRODUZIDO/ SISTEMA (m³/mês) | VOLUME PRODUZIDO/ MUNICÍPIO (m³/mês) | OPERAÇÕES ARITMÉTICAS (Ref. ID) |
|--|---------------------|-----------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| Subterrânea (Poços tubulares) | Raposa | 1 | BRK (15,5%) | 15.330,00 | 98.892,98 | (1 + 2 + 3) |
| | | 2 | SAAE (63,5%) | 62.807,25 | | |
| | | 3 | Outros (21%)* | 20.755,73 | | |
| | Paço do Lumiar | 3 | BRK (46%) | 865.339,57 | 1.879.646,28 | (3 + 4 + 5 + 6) |
| | | 4 | SAAE (7,5%) | 141.589,58 | | |
| | | 5 | CAEMA (34,5%)** | 649.378,80 | | |
| | | 6 | Outros (11,9%)* | 223.338,33 | | |
| | São José de Ribamar | 7 | BRK (70,7%) | 1.399.509,77 | 1.978.308,46 | (7 + 8 + 9) |
| | | 8 | CAEMA (10,8%)** | 212.916,67 | | |
| | | 9 | Outros (18,5%) | 365.882,02 | | |
| | São Luís | 10 | CAEMA (57,4%) | 2.704.743,68 | 4.712.719 | (10 + 11) |
| 11 | | Outros (42,6%)* | 2.007.975,29 | | | |
| Produção total de águas subterrâneas | | | | | 8.669.566,69 | (1 + ... + 11) |
| Águas Subterrâneas destinadas a São Luís | | | | | 5.575.014,44 | (5 + 8 + 10 + 11) |

* Particular, indústria, comunitário, instituições públicas, etc.

** Volumes fornecidos ao sistema Paciência I e II de São Luís. Estes volumes não são destinados aos municípios de Paço Lumiar e São José do Ribamar.



O consumo mensal de água na Ilha de São Luís como um todo foi estimado com base nos índices de consumo *per capita* em 5.549.214 m³.

Na Figura 24 se mostra o mapa dos sistemas de distribuição de água implantados na Ilha. Perdas nas redes de distribuição, estimadas pelas próprias concessionárias locais, CAEMA e BRK, como superiores aos 60%, prejudicam o atendimento à demanda da população e representam imensas perdas financeiras e de água. As diferenças entre os volumes produzidos e consumidos na ilha estão coerentes com tal índice de perdas. As perdas nas redes de abastecimento, juntamente com aquelas advindas da rede de esgotos e galerias pluviais, somam-se aos volumes infiltrados a partir das chuvas, participando das recargas dos aquíferos locais.

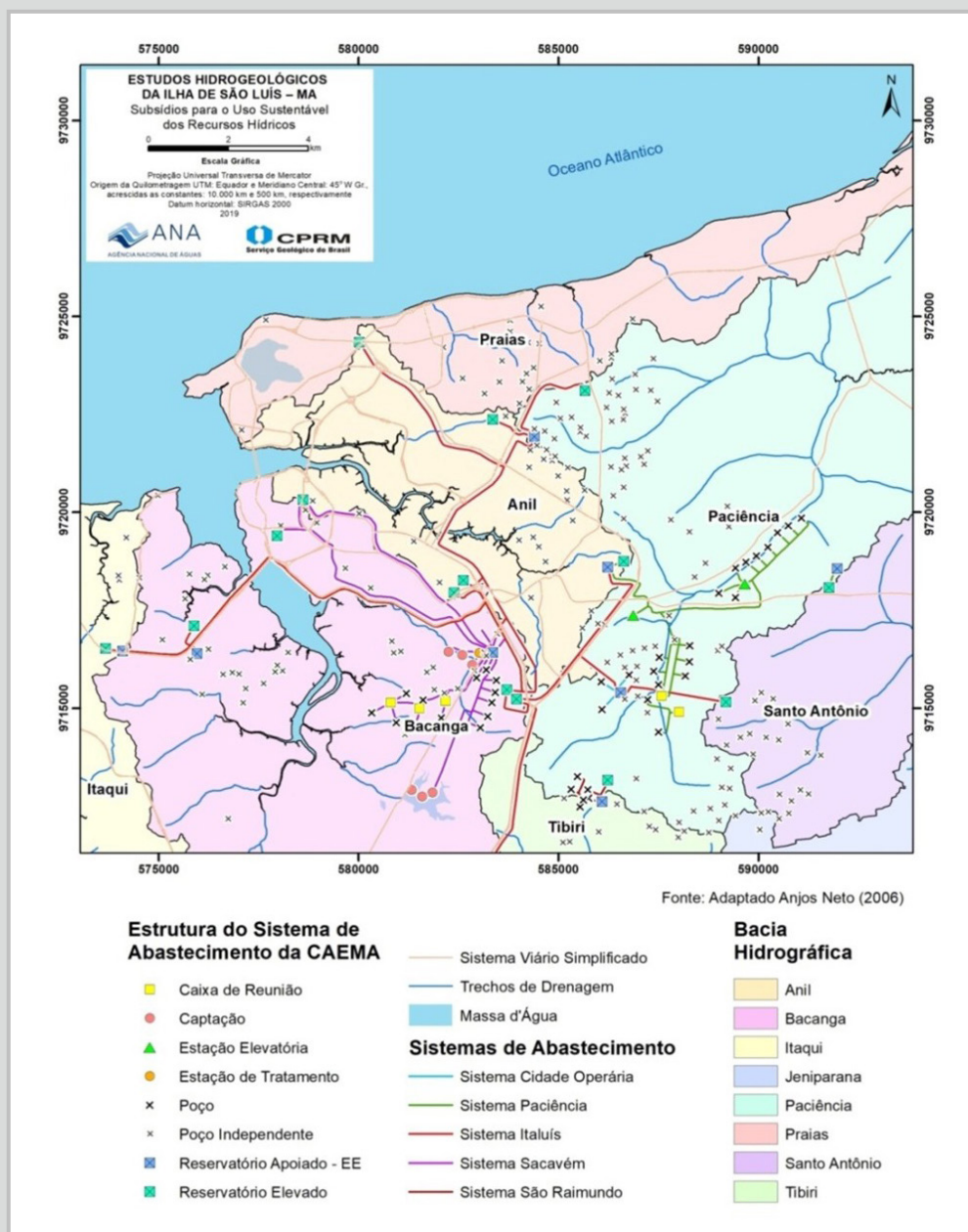


Figura 24: Sistemas de distribuição de água da Ilha de São Luís



3.5.5. Impactos da Urbanização nas Águas Subterrâneas - As recargas urbanas

Nas zonas urbanas a recarga dos aquíferos pode ser classificada em natural e artificial. A recarga natural compreende a recarga difusa (infiltração direta da chuva), a recarga linear (induzida de rios) e a recarga pontual (a partir de corpos superficiais isolados). As recargas artificiais são aquelas originadas por vazamentos de redes de água e de esgotos, de estruturas de drenagem e por fossas, além de irrigações de parques e jardins.

Os vazamentos advindos de infiltrações de fossas sépticas ou de redes de esgoto tendem a contaminar de forma significativa, as águas subterrâneas em áreas urbanizadas, principalmente por nitratos e coliformes fecais.

No caso das redes de distribuição de água, a perda real *per capita* foi calculada por município dividindo o volume anual de perda real pela população total atendida com abastecimento de água, informação obtida no SNIS para o ano de 2018. O índice de perdas reais foi considerado como a metade do índice de perdas na distribuição divulgado no SNIS e variou, por município, entre 33,12% (São Luís) e 34,65% (São José de Ribamar).

As redes coletoras de esgotos, ainda que com menor significância quantitativa que as redes de distribuição de água, no tocante à recarga subterrânea, desempenham importante papel, visto que podem se constituir em importantes fontes de contaminação dos aquíferos. Os volumes de esgotos coletados dos municípios da Ilha de São Luís também foram obtidos no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (<http://www.snis.gov.br/>). Neste caso, foi adotada uma perda média de 10% do volume coletado de esgotos, da mesma forma que considerado em trabalhos anteriores conduzidos pela ANA em Natal - RN e Belém - PA. As perdas *per capita* foram obtidas por município e, então, foram aplicadas aos dados da população atendida com coleta de esgotos por bacia hidrográfica.

No caso dos esgotos não coletados, descartados em fossas, valas negras, sumidouros ou sarjetas, o cálculo da recarga foi realizado a partir da estimativa do volume de retorno de 80% da água utilizada pela população desprovida de rede de coleta de esgotos, a estimativa desta população e os volumes de água por ela recebidos.

Para o cálculo das recargas, aos volumes das perdas da rede de água, das perdas da rede de esgoto e de esgotos não coletados, foi aplicado um percentual entre 22 e 59%, variável por bacia hidrográfica de acordo com relação entre os dados de infiltração e recarga natural obtidos no balanço hídrico do solo.

A Tabela 7 resume os volumes de recarga para cada uma dessas situações, por bacia hidrográfica.

Tabela 7: Recargas Urbanas por Bacia Hidrográfica

| BACIA | RECARGAS URBANAS | | | | | | | |
|---------------|------------------|-------|---------------------------|------|-----------------------|------|-------------------------|-------|
| | REDE DE ÁGUA | | REDE DE COLETA DE ESGOTOS | | ESGOTOS NÃO COLETADOS | | RECARGAS URBANAS TOTAIS | |
| | hm³/ano | mm | hm³/ano | mm | hm³/ano | mm | hm³/ano | mm |
| Anil | 6,144 | 165,4 | 0,435 | 11,7 | 2,987 | 80,4 | 9,566 | 257,6 |
| Bacanga | 4,272 | 44,3 | 0,303 | 3,1 | 2,077 | 21,6 | 6,652 | 69 |
| Cachorros | 0,259 | 3,8 | 0,019 | 0,3 | 0,126 | 1,9 | 0,404 | 6 |
| Estiva | 0,223 | 6,5 | 0,016 | 0,5 | 0,108 | 3,2 | 0,347 | 10,2 |
| Guarapiranga | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ilha | 0,015 | 0,5 | 0,001 | 0 | 0,007 | 0,2 | 0,023 | 0,8 |
| Inhaúma | 0,009 | 0,3 | 0,001 | 0 | 0,004 | 0,1 | 0,014 | 0,4 |
| Itaqui | 0,644 | 14,2 | 0,046 | 1 | 0,313 | 6,9 | 1,003 | 22,2 |
| Jeniparana | 0,804 | 10,5 | 0,061 | 0,8 | 0,31 | 4 | 1,175 | 15,3 |
| Paciência | 8,963 | 59,9 | 0,617 | 4,1 | 4,715 | 31,5 | 14,295 | 95,5 |
| Praias | 2,037 | 24,7 | 0,139 | 1,7 | 1,112 | 13,5 | 3,288 | 39,8 |
| Santo Antônio | 4,29 | 44,2 | 0,304 | 3,1 | 2,076 | 21,4 | 6,67 | 68,7 |
| Tibiri | 0,864 | 6,3 | 0,061 | 0,4 | 0,418 | 3,1 | 1,343 | 9,8 |
| TOTAIS | 28,524 | | 2,003 | | 14,253 | | 44,78 | 49,7 |

4

LEVANTAMENTO DE DADOS BÁSICOS

4.1. CADASTRO DE PONTOS D'ÁGUA

Foram levantadas informações de 1.426 pontos, entre os quais 1.400 poços tubulares (98,18% do universo amostrado), 18 poços escavados (1,26% do total) e 8 nascentes (0,56% do total) mostrados na Figura 25.

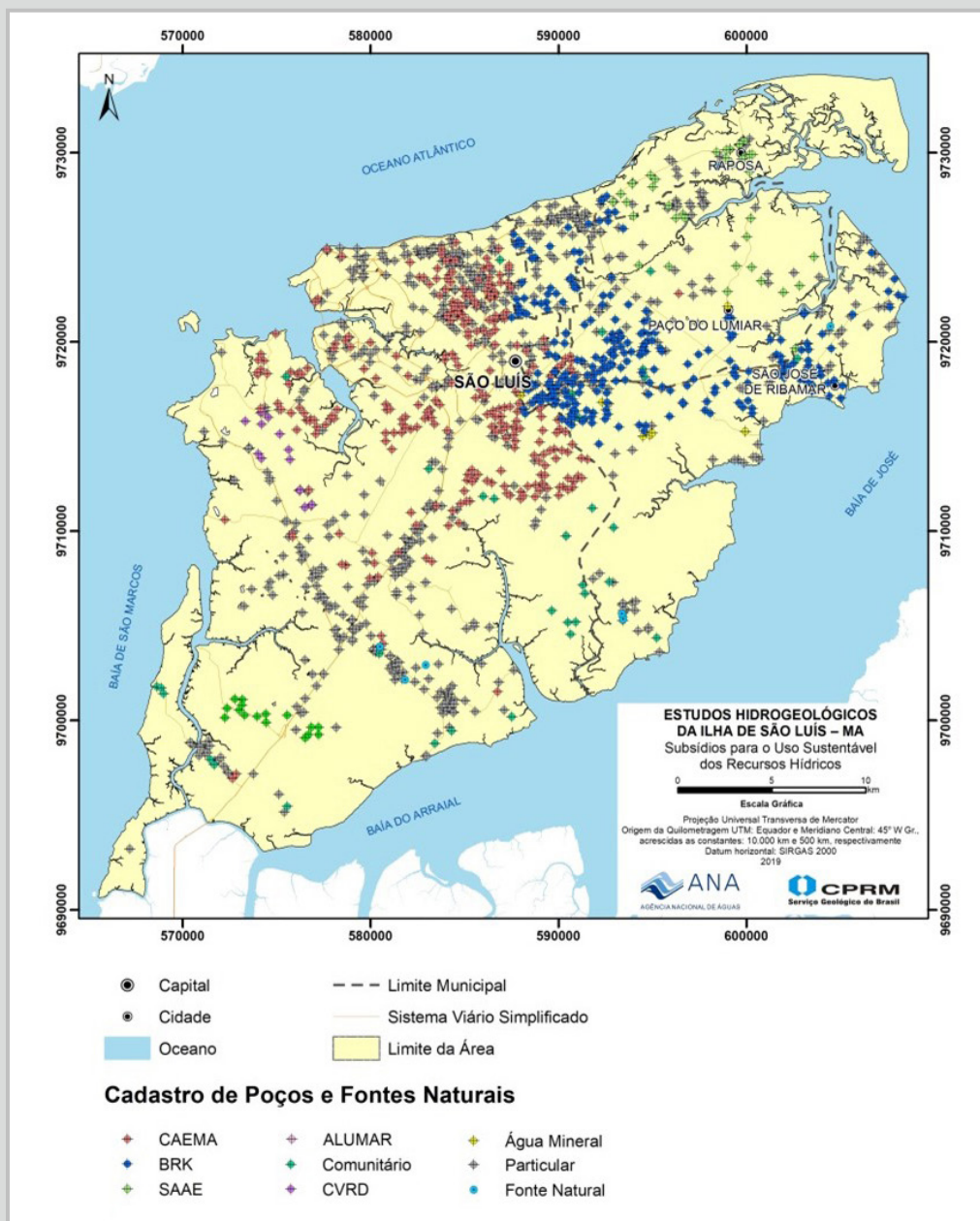


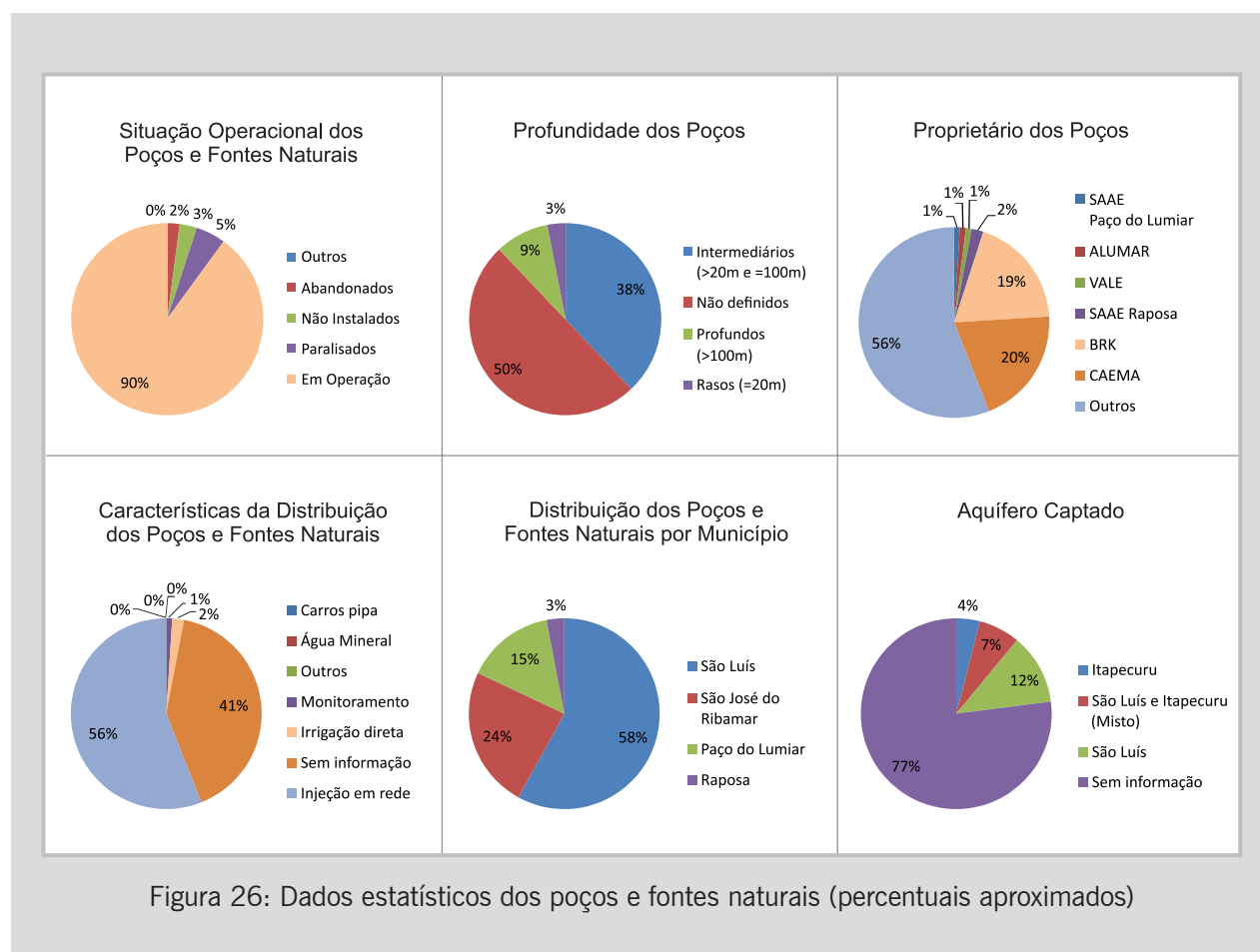
Figura 25: Cadastro de captações de águas subterrâneas, incluindo poços tubulares, nascentes e escavados

A grande maioria dos poços, 1.288 ou cerca de 90% do total se encontrava em funcionamento, sendo 1276 poços tubulares, 9 poços escavados e 3 fontes naturais. 31 pontos estavam abandonados, sendo 29 poços tubulares e 2 poços escavados; 68 pontos estavam paralisados, dentre eles 67 poços tubulares e 1 poço escavado; 38 pontos não estavam instalados, sendo 6 poços amazonas, 5 fontes naturais e 27 poços tubulares; e 1 poço ainda se encontrava em perfuração.

No município de São Luís, foram cadastrados 825 pontos, dentre eles 813 poços tubulares, 3 fontes naturais e 9 poços amazonas; São José de Ribamar somou 343 pontos, sendo 329 poços tubulares, 5 fontes naturais e 9 poços amazonas; em Paço do Lumiar foram cadastrados 215 poços tubulares, enquanto em Raposa foram registrados 43 poços tubulares.

Os bombeamentos são feitos com injeção direta nas redes de distribuição, principalmente nos poços da CAEMA, BRK e SAAE's representando aproximadamente 42% do total. A CAEMA é proprietária de 285 poços, ou 20% do total, enquanto a BRK detém outras 266 captações (19%). Os sistemas autônomos de abastecimento de água (SAAE's) de Paço do Lumiar e Raposa são responsáveis respectivamente por 16 poços e 26 poços, que conjuntamente correspondem a aproximadamente 3% do total de poços.

A Figura 26 resume os dados estatísticos das captações.



O volume estimado de exploração de água subterrânea em toda a Ilha de São Luís é de 104 milhões de metros cúbicos por ano, sendo as maiores extrações nas bacias dos rios Paciência e Bacanga, onde se localizam as baterias de poços da CAEMA, produzindo, respectivamente 36,45% e 18,75% das vazões. A seguir aparecem as bacias dos rios Santo Antônio, Praias e Jeniparana com 12,95%, 10,75% e 8,33% da produção total de água subterrânea, respectivamente. O mapa da Figura 27 mostra a distribuição dos volumes de exploração na Ilha de São Luís e a Tabela 8 apresenta os volumes por bacia hidrográfica.

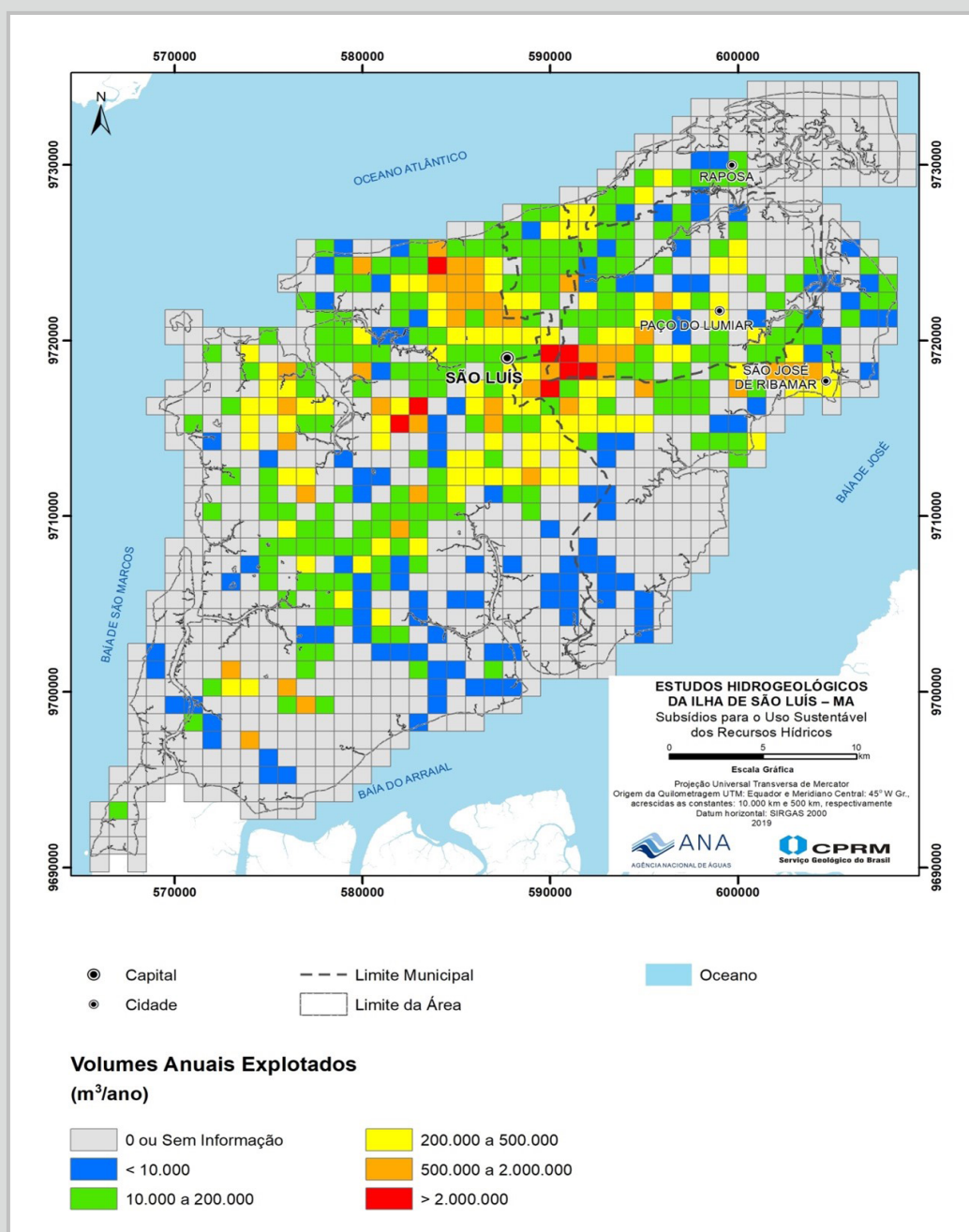


Figura 27: Volumes explorados de águas subterrâneas

Tabela 8: Volumes anuais explotados por bacia hidrográfica

| BACIA HIDROGRÁFICA | PRODUÇÃO EFETIVA (m³/ano) | PERCENTAGEM DO TOTAL |
|--------------------|---------------------------|----------------------|
| Paciência | 37.924.774,609 | 36,45% |
| Bacanga | 19.508.246,233 | 18,75% |
| Santo Antônio | 13.476.880,399 | 12,95% |
| Praias | 11.182.194,753 | 10,75% |
| Jeniparana | 8.669.361,013 | 8,33% |
| Cachorros | 4.481.013,751 | 4,31% |
| Anil | 3.407.196,158 | 3,27% |
| Tibiri | 2.741.343,446 | 2,63% |
| Itaqui | 1.437.136,400 | 1,38% |
| Estiva | 1.174.898,500 | 1,13% |
| Ilha Tauá-Mirim | 24.601,000 | 0,024% |
| Inhaúma | 5.840,000 | 0,006% |
| Guarapiranga | 1.314,000 | 0,001% |
| Ilha do Medo | 0,000 | 0,000% |
| TOTAL | 104.034.800,261 | 100,00% |

4.2. CADASTRO DE FONTES POTENCIAIS DE POLUIÇÃO

Os principais contaminantes de águas subterrâneas incluem produtos químicos, metais pesados, solventes orgânicos, óleos, pesticidas e fertilizantes, contaminantes microbiológicos (bactérias fecais e vírus), nitratos, compostos orgânicos como alcanos e alquenos clorados e microrganismos patogênicos. Foram cadastrados na área 1.119 pontos de contaminação, entre fontes difusas e pontuais. Distribuem-se entre indústrias, lavras minerais, postos de combustível, oficinas mecânicas, etc. (Figura 28).

Essas fontes foram a base para a elaboração do mapa de perigo de contaminação dos aquíferos (apresentado mais à frente neste Resumo Executivo).

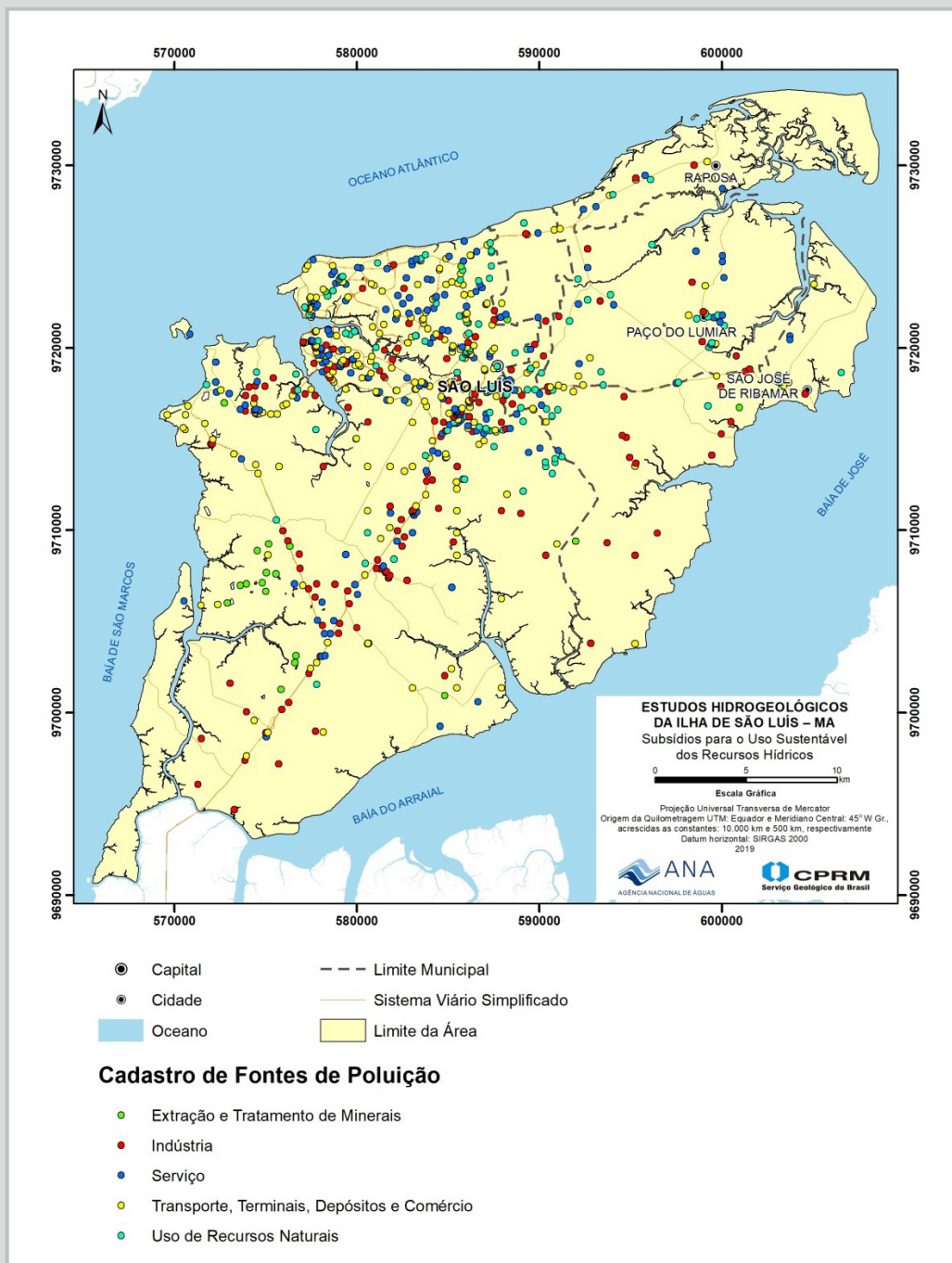
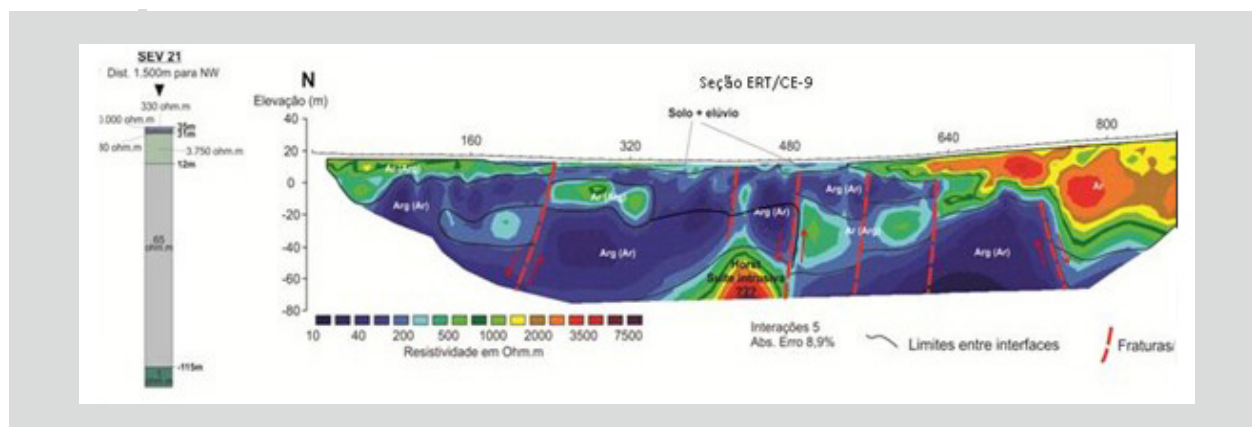


Figura 28: Fontes de Poluição Cadastradas na Ilha de São Luís
(FONTES: SEMA/MA e CTF/IBAMA/CPRM)

4.3. INVESTIGAÇÕES GEOFÍSICAS

Os levantamentos geofísicos tiveram o objetivo de auxiliar na caracterização das unidades geológicas que compõem os sistemas aquíferos da Ilha de São Luís, fornecer as informações para a elaboração de mapas de espessuras (isópacas) e de profundidade do nível estático do Aquífero São Luís e estimar as profundidades do contato água doce/água salgada, com vistas a avaliar a possibilidade de intrusão salina na região. Foram utilizados métodos elétricos (Sondagem Elétrica



Vertical - SEV e Caminhamento Elétrico – CE) e eletromagnéticos (Caminhamento Magnético – CEM). O ambiente urbano trouxe limitações à profundidade de investigação, pois esta depende do arranjo dos eletrodos e sensores utilizados na investigação, cuja posição foi limitada pelo espaço e obstáculos encontrados.

A Ilha de São Luís foi dividida em 53 blocos de 5 km x 5 km, nas quais foram distribuídas 40 SEVs de forma a cobrir regularmente a área. A profundidade máxima de investigação foi de 80 metros. Os dados das SEVs foram combinados com informações de poços e com o conhecimento geológico para a construção de seções geológico-geofísicas. Nove caminhamentos ou tomografias elétricas foram levantados, totalizando 10 km lineares. A profundidade máxima de investigação foi de 95 metros. Elas se localizaram preferencialmente próximas ao litoral para investigar a influência de intrusão salina.

Adicionalmente, foram ainda realizados 10 caminhamentos eletromagnéticos, totalizando mais 7 km de caminhada geofísica e profundidade de investigação pouco superiores a 50 metros.

O mapa da Figura 29 mostra a localização dos levantamentos geofísicos realizados no projeto.

Algumas SEVs foram selecionadas e processadas conjuntamente com informações de poços tubulares com descrições litológicas apropriadas, formando dois perfis lito-geofísicos seccionando toda a Ilha. Como resultado desses procedimentos foram produzidos 79 km de caminhamentos geofísicos em toda a Ilha (CE, CEM e perfis lito-geofísicos).

Os conhecimentos adquiridos com os levantamentos geofísicos fornecem suporte aos demais temas deste projeto. As informações existentes são suficientes para caracterizar as principais formações geológicas de importância para a água subterrânea e indicar a extensão e profundidade da influência de águas salobras ou intrusões marinhas no subsolo de setores da Ilha. Quando possível, foram estimados os contatos das principais unidades geológicas e aquíferas em subsuperfície, o nível de água e inferidas estruturas tectônicas (falhas e fraturas).

Avaliando as seções geológico-geofísicas, algumas formações têm localmente espessuras superiores às descritas na literatura. A Formação Pós-Barreiras pode alcançar 25 m no centro da Ilha e a Formação Cujupe pode alcançar 50 m em diversos setores.

Em alguns casos, a influência da neotectônica ficou clara, como em imagens de vários caminhamentos e na constituição das seções geológico-geofísicas, com excelente correspondência com os afloramentos de areias Pós-Barreiras da Praia de Panaquatira.

Algumas SEVs detectaram a possibilidade de poluição urbana nos primeiros metros abaixo do solo, com detecção de intervalos pouco resistivo, que podem indicar água misturada com efluentes urbanos.

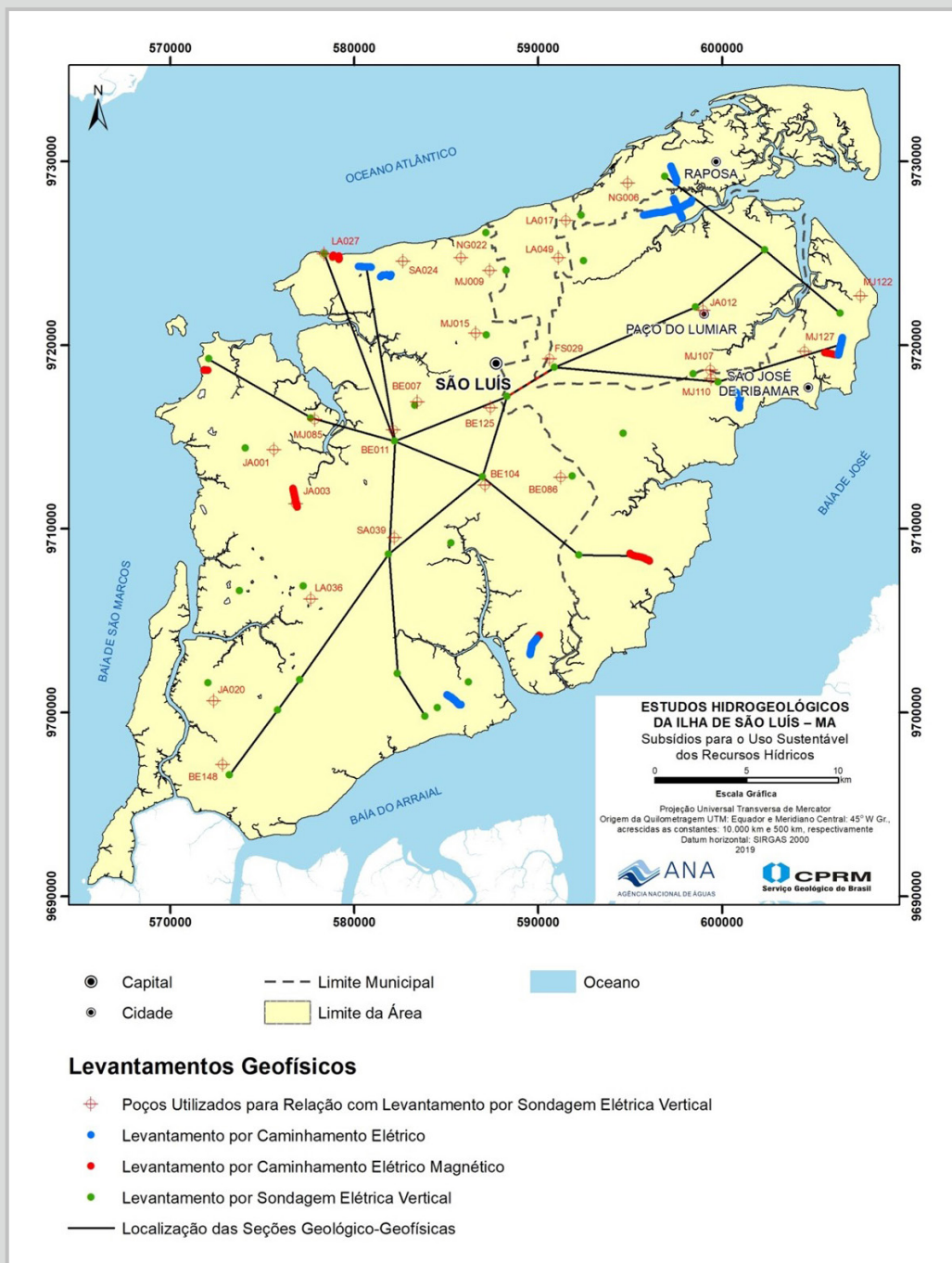


Figura 29: Localização dos levantamentos geofísicos realizados na ilha de São Luís

No Bairro Cumbique em Paço do Lumiar foi identificado um modelo de interação da cunha salina com as rochas sedimentares. Foram levantados riscos de entrada de águas mais salgadas em poços distantes até 2 km do litoral ou principalmente àqueles localizados próximos aos mangues. Testemunhos de proprietários em Panaquatira, Cumbique, Av. Litorânea e os modelos gerados apontam essa possibilidade quando há seção filtrante entre o nível do mar e a cota de -15 m. Outros levantamentos apontam para camadas muito condutivas no centro da Ilha, mas que necessitam maiores investigações e correlações com poços.

A Tabela 9 mostra as assinaturas geofísicas das principais unidades litológicas locais.

Tabela 9: Variações das resistividades elétricas nos principais litotipos da Ilha de São Luís

| FORMAÇÃO GEOLÓGICA | LITOTIPO | CONDIÇÕES GEOLÓGICAS | RESISTIVIDADE (Ohm.m) |
|--|---|--|--|
| Solo agricultável: espessura < 1 m | Areia, matéria orgânica, silte e argila | Irrigação e arado | Irrigado ~ 200 seco ~ 1300 |
| Lateritas colunares do Neógeno e Cascalho, | Arenito litificado, concreção ferruginosa; cascalho variegado | Espessuras ~ 2,5 m; em geral não saturadas | > 1500, por vezes 3000 a 15000 |
| Depósitos de Dunas | Areia quartzosa média | Inconsolidadas | 400 a 15000 |
| Depósitos Litorâneos | Areias quartzosas, silte. | Inconsolidadas, subsaturadas a saturadas | Maré seca ~ 1 a 5 |
| Areias Pleistocênicas, Pós-Barreiras | Areia quartzosa, selecionada, pouca argila | Inconsolidados; espessura até 25 m; | 400 a 10000 |
| Grupo Barreiras (sem aquisição) | Areia c/ matriz argilosa | Analogia a areias argilosas não saturadas | ≤ Areias Pós-Barreiras |
| Formação Cajupe | Arenito fino e argilito | Espessura de estratos 0.5 m a 6 m | Não saturado: 350 a 1500 Saturado: 20 a 450 |
| Formação Alcântara | Arenito fino a médio, com siltito e argilito | Em geral subaflorante ou confinado | Aflorante: 400 a 1700 Confinado 30 a 150 |
| Grupo Itapecuru | Argilitos em geral | Espessura ~ 2 m; | Saturado em água salobra ou salgada: 1 a 15 |

A Figura 30 mostra um exemplo da associação de informações geológicas para interpretação dos dados geofísicos.

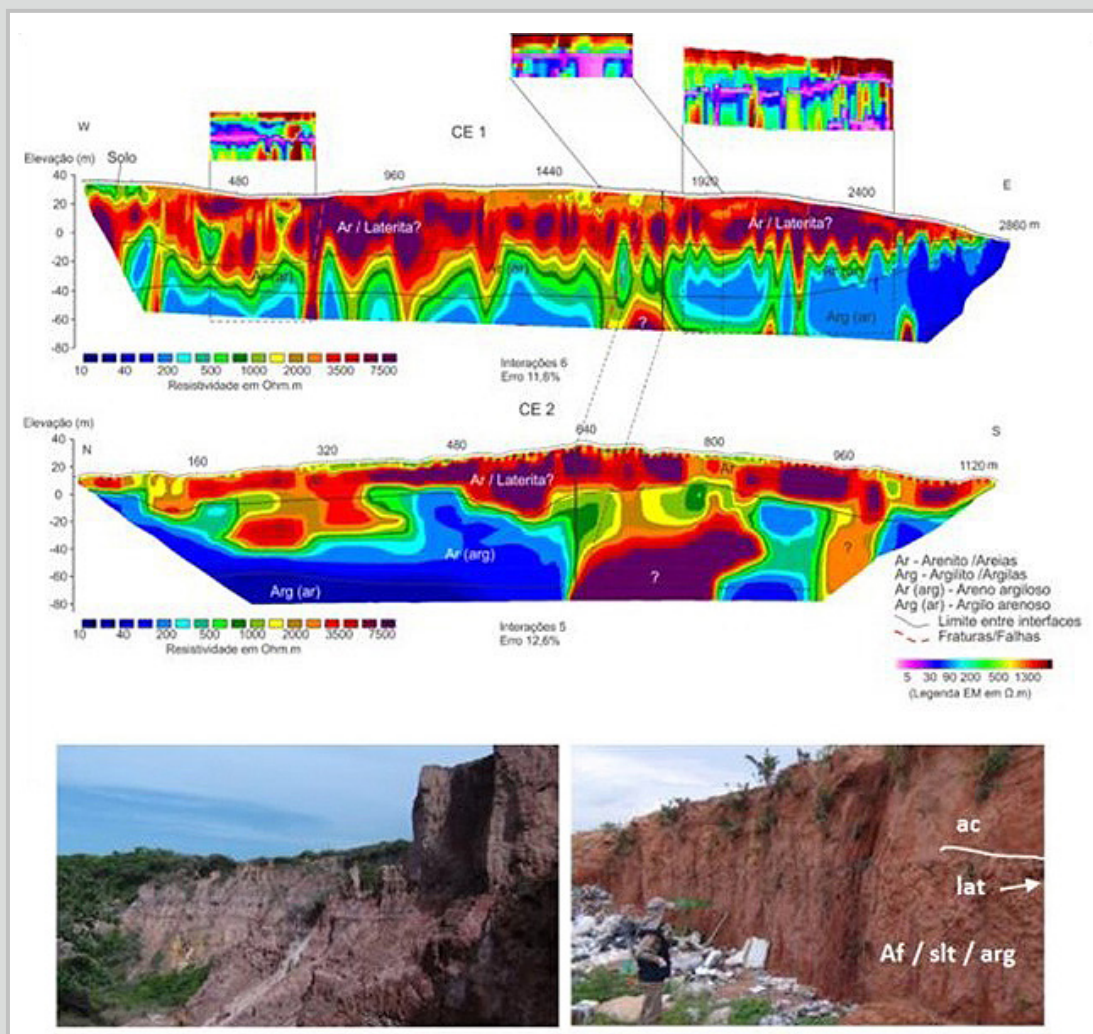


Figura 30: Exemplo da combinação de dados geológicos e geofísicos na interpretação de seções geológico-geofísicas

4.4. HIDROGEOQUÍMICA

Para a caracterização hidroquímica das águas dos principais Sistemas Aquíferos locais (São Luís e Itapecuru), foi estabelecida, a partir de considerações geológicas, geofísicas, de uso e ocupação do solo e hidrogeológicas, uma rede para coleta de amostras de água, distribuída por toda a ilha e captando as duas unidades aquíferas (Figura 31).

Foram realizadas duas campanhas de amostragem, durante os períodos úmido e seco (fevereiro e novembro), no ano de 2017, perfazendo um total de 34 dias de campo, sendo coletadas 100 amostras de água em cada período.

As 200 amostras coletadas (100 por período de coleta) foram submetidas a análises laboratoriais de parâmetros físicos e químicos: condutividade elétrica, STD, pH, cor, turbidez, dureza, Na, K, Ca, Mg, Cl, CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Fe, Mn, NO_3^- , NO_2^- , NH_3 . No período de chuva (fevereiro de

2017), foram realizadas 1900 análises (19 parâmetros). Já no período de estiagem (novembro de 2017), foram realizadas 6840 análises (79 parâmetros), incluindo entre estas, análises isotópicas (trítio, carbono 14, oxigênio e deutério), amônio (NH_4^+), elementos-traço, Elementos Terras Raras, análises microbiológicas e de voláteis.

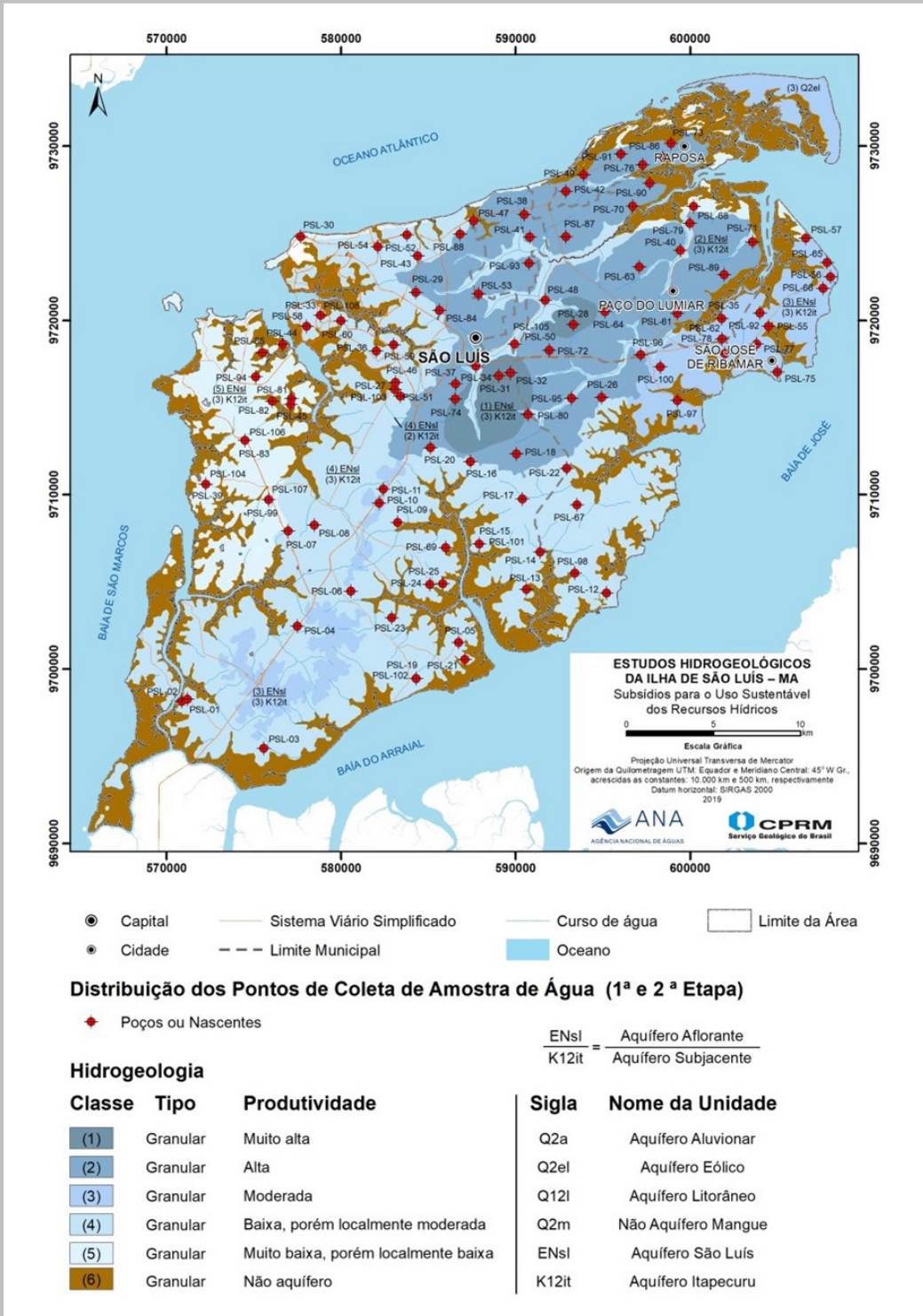


Figura 31: Pontos de coleta de amostras de água

Os resultados mostraram que existe uma separação nítida dos diferentes aquíferos com relação às suas características físico-químicas. Numa análise de agrupamento das águas segundo as similaridades químicas, os grupos resultantes refletiram a distribuição dos aquíferos, conforme ilustra a Figura 32. Na principal área de ocorrência do Aquífero São Luís (centro norte da ilha), predominam águas de um grupo (Grupo 01), enquanto na área de ocorrência do aquífero Itapecuru, nas proximidades das bacias do Itaqui/Bacanga, predominam águas de outro (Grupo 06).

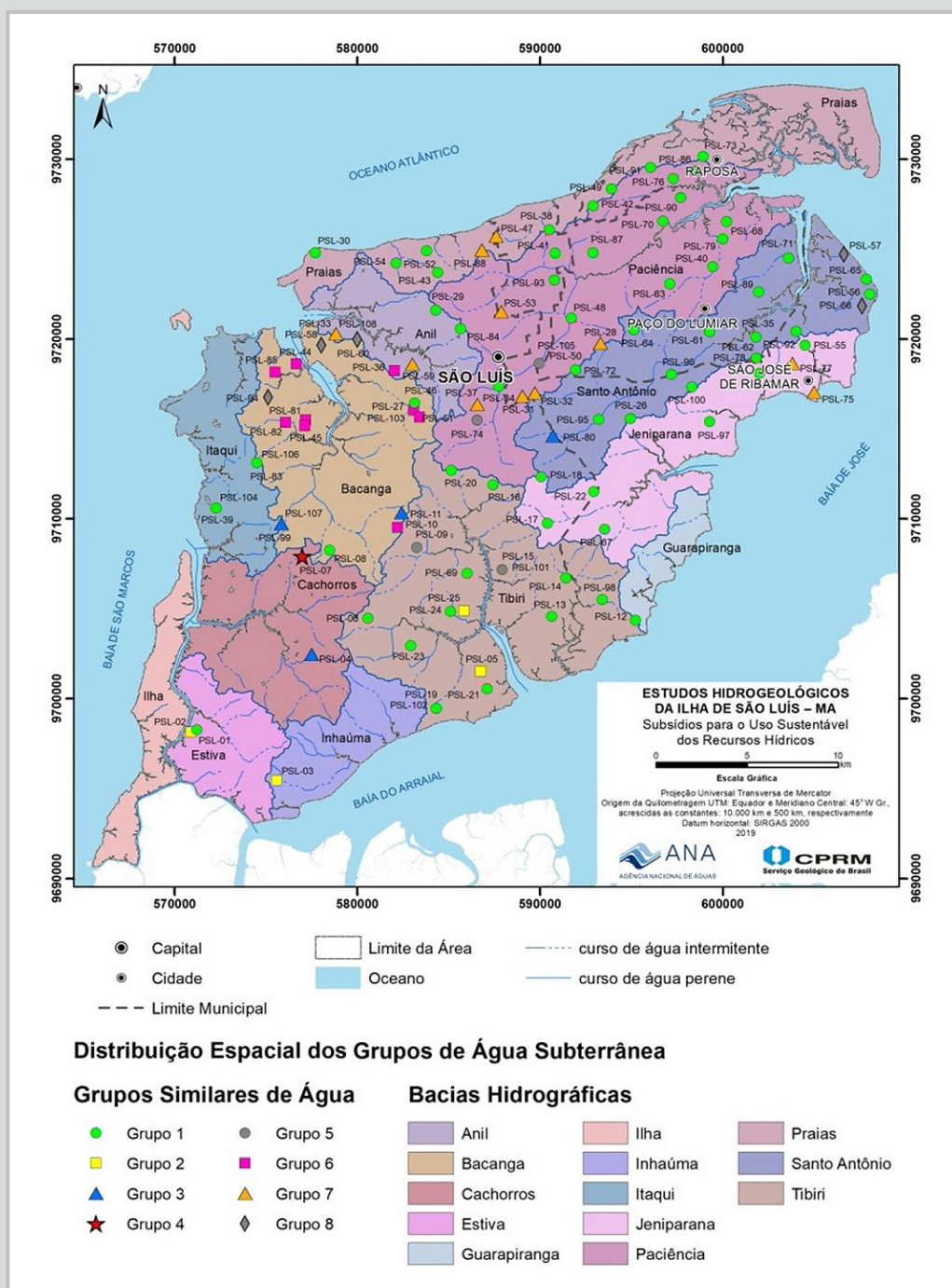


Figura 32: Distribuição espacial dos grupos de águas

Outros grupos estão associados a águas de mistura das duas unidades, ou até mesmo alterações na característica natural das águas devido a atividades antrópicas.

De uma maneira geral, pode-se afirmar que águas ácidas se relacionam com o Sistema Aquífero São Luís, enquanto aquelas mais básicas ou carbonatadas se relacionam com o Aquífero Itapecuru, conforme zoneamento do pH apresentado na Figura 33.

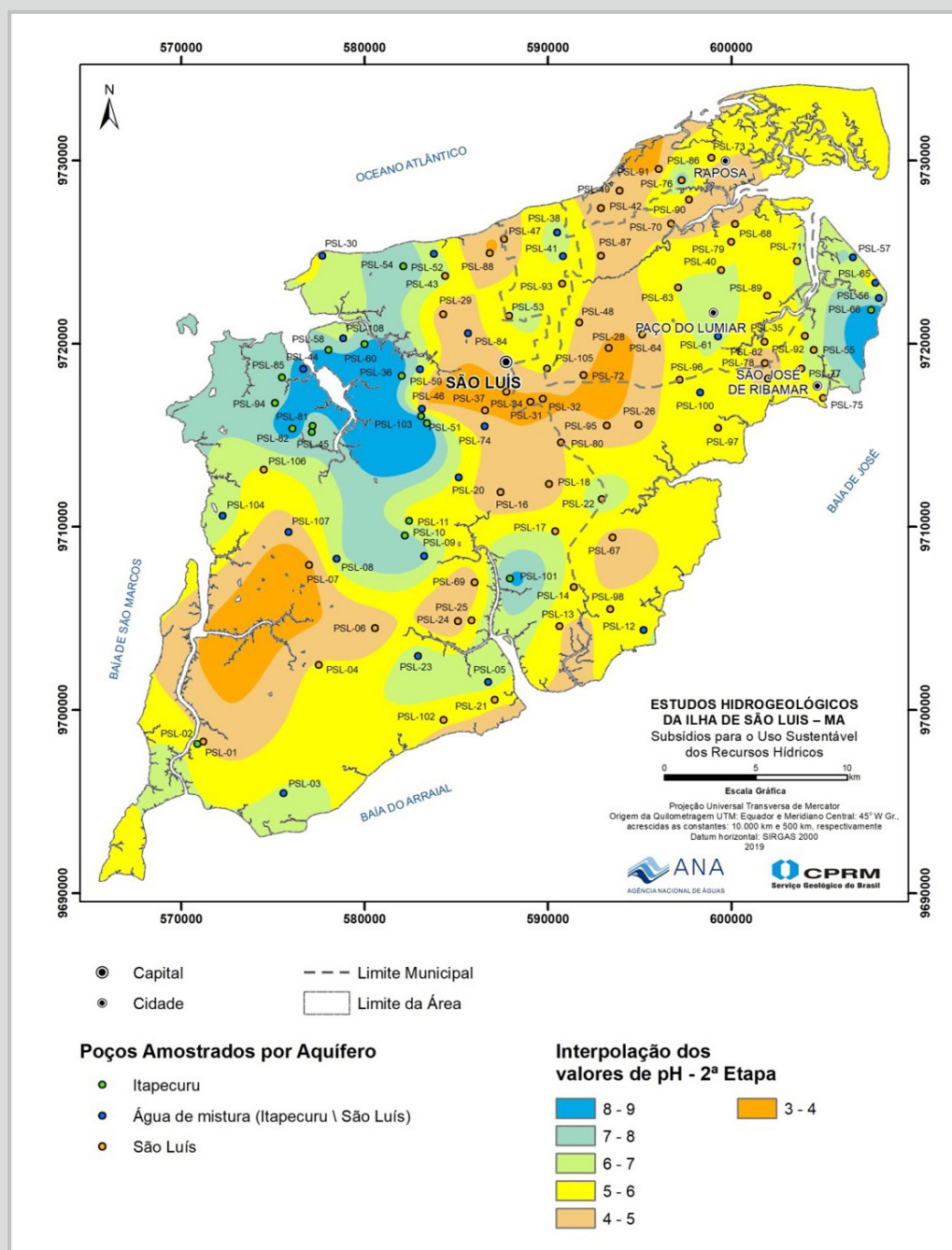


Figura 33: Mapa de Zoneamento do Potencial Hidrogeniônico (pH) das águas dos Aquíferos São Luís e Itapecuru e das águas de mistura (período de estiagem - novembro de 2017)



4.4.1. Classificação Hidroquímica das Águas

A classificação hidroquímica das águas amostradas foi feita com auxílio dos diagramas de Piper e Stiff.

Os diagramas de Piper (Figura 34) com as análises das amostras de água da primeira e da segunda campanha de amostragem mostraram que, no caso dos ânions ocorre uma predominância de águas cloretadas, enquanto nos cátions as amostras são sódicas. As águas, em termos gerais, são classificadas como cloretadas sódicas, em 73% dos casos na primeira campanha e 72% na segunda campanha.

No caso dos cátions, as amostras se diferenciam da seguinte forma: as águas de mistura e do aquífero São Luís estão inseridas no campo de classificação das águas sódicas, e as águas consideradas como do aquífero Itapecuru estão inseridas, em sua maior parte, no campo das águas mistas.

No campo dos ânions, as águas consideradas do Aquífero São Luís são quase que em sua totalidade cloretadas, enquanto as águas consideradas do aquífero Itapecuru possuem três tipos básicos de águas: cloretadas, bicarbonatadas e mistas, não existindo efetivamente uma característica definida. Dentre as especificidades, a amostra do poço PSL-108 foi classificada como mista cálcica, estando diferenciada do padrão apresentado pelas demais.

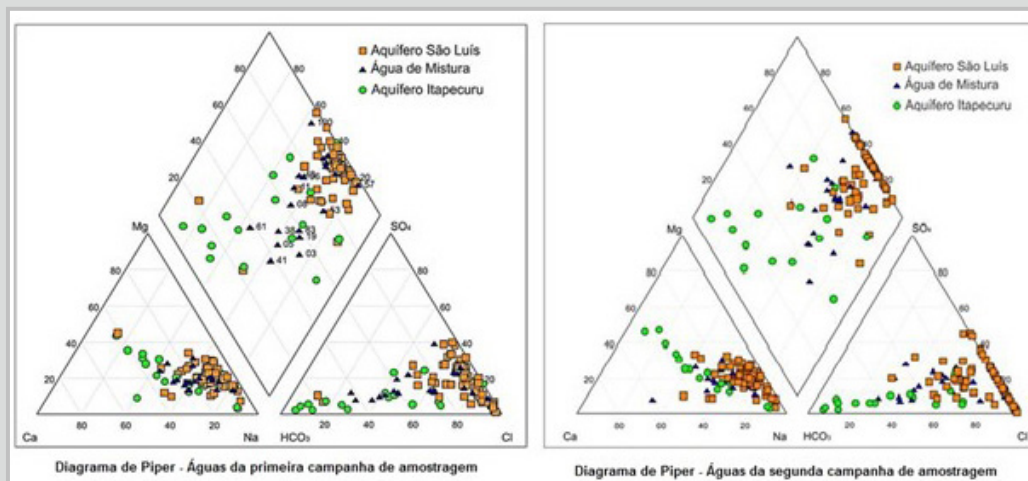
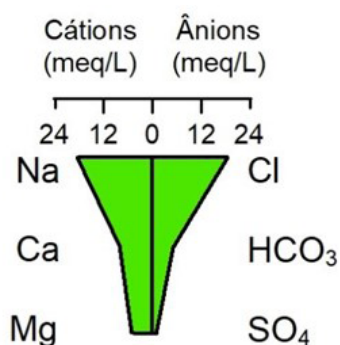


Figura 34: Diagramas de Piper



Os diagramas de Stiff contém linhas dispostas à esquerda e à direita a partir de um eixo vertical que representa o valor zero de concentração. Os cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Fe^{2+}) são plotados à esquerda, enquanto os ânions (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} e NO_3^-) à direita desse eixo.

As concentrações iônicas são expressas em miliequivalentes por litro (meq/L) e originam polígonos de várias formas e tamanhos, que expressam as características químicas das águas, permitindo sua classificação. Quanto mais afastados os vértices entre si e maiores os lados dos polígonos, maior a concentração dos íons, ou seja, mais sais dissolvidos na água.

Na Figura 35, pela forma dos diagramas de Stiff pode-se verificar que existe uma distinção entre a concentração iônica das águas em regiões diversas da ilha. Nas áreas onde há captação de águas do aquífero Itapecuru, como na região das bacias Anil e Bacanga, no extremo leste da bacia de Santo Antônio e próximo à praia de Panaquatira, as concentrações iônicas são mais elevadas e as águas são predominantemente cloretadas sódicas. Na região do aquífero São Luís, a forma estreita dos diagramas refletem a baixa concentração de sais dissolvidos nesse aquífero.

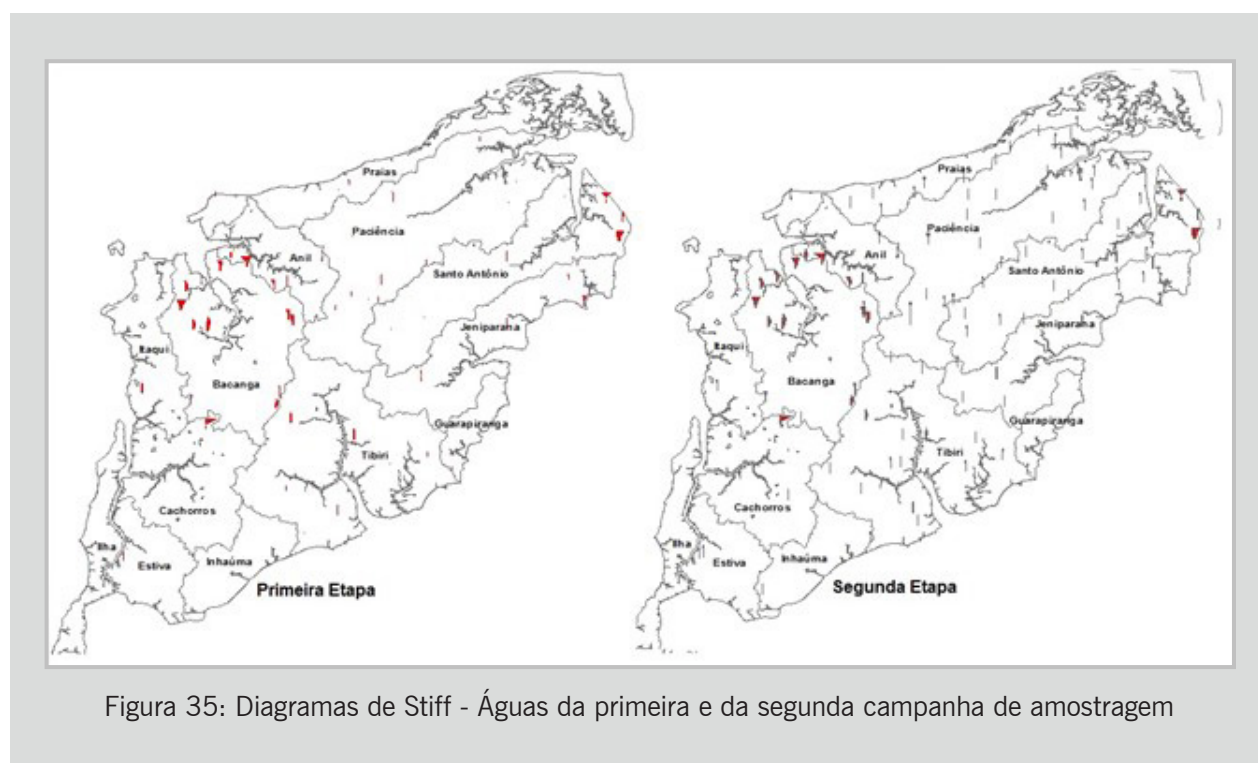


Figura 35: Diagramas de Stiff - Águas da primeira e da segunda campanha de amostragem

4.4.2. Avaliação da Potabilidade

Foi efetuada uma avaliação, por tipo de aquífero, do quantitativo de amostras em acordo ou desacordo os Valores Máximos Permitidos (VMP's), estabelecidos pela PRC nº 5 do MS/2017 (Tabela 10). Os resultados mostram que a maioria das análises (98 e 100%) dos Aquíferos São Luís e Itapecuru apresenta concentração de Sólidos Totais Dissolvidos inferiores ao VMP. Sódio, flúor, cloreto, nitrito, amônia, dureza total e sulfato, em mais de 90% das amostras apresentam concentrações dentro do limite de potabilidade (para o cloreto no aquífero Itapecuru, acima de 80%). Portanto, a maioria das águas dos aquíferos da Ilha de São Luís pode ser usada para indústria, irrigação, consumo humano e animal.

Os mapas da Figura 36 e Figura 37 mostram a distribuição do cloreto e do nitrato nos poços da ilha, parâmetros que apresentaram a maior quantidade de amostras com concentrações acima do limite de potabilidade. O Nitrato apresenta teores elevados no Aquífero São Luís em 19% das amostras. Os valores mais altos de nitrato estão relacionados às áreas mais urbanizadas e se relacionam a condições inadequadas de saneamento básico (ausência de rede coletora de esgoto ou vazamentos na rede existente). Exceção ocorre para a mancha de

Tabela 10: Percentuais das águas dos Aquíferos São Luís e Itapecuru em relação ao padrão de potabilidade estabelecido pela PRC nº 5 do Ministério da Saúde de 2017 (considerando as duas etapas de análises químicas)

| PARÂMETRO | SÃO LUÍS | | ITAPECURU | | ÁGUA DE MISTURA | |
|--------------------------------------|----------|-----|-----------|-----|-----------------|-----|
| | QUANT. | % | QUANT. | % | QUANT. | % |
| Na⁺ | | | | | | |
| * < 200mg/L | 118 | 100 | 33 | 97 | 48 | 100 |
| > 200mg/L | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| F⁻ | | | | | | |
| * < 1.5mg/L | 65 | 100 | 16 | 100 | 19 | 100 |
| > 1.5mg/L | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fe | | | | | | |
| * < 0.3mg/L | 113 | 96 | 33 | 97 | 42 | 87 |
| > 0.3mg/L | 5 | 4 | 1 | 3 | 6 | 13 |
| Cl⁻ | | | | | | |
| * < 250mg/L | 116 | 98 | 28 | 82 | 46 | 96 |
| > 250mg/L | 2 | 2 | 6 | 18 | 2 | 4 |
| SO₄⁻ | | | | | | |
| * < 250mg/L | 118 | 100 | 34 | 100 | 48 | 100 |
| > 250mg/L | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NO₃⁻ | | | | | | |
| * < 44,26mg/L | 96 | 81 | 31 | 91 | 40 | 83 |
| > 44,26mg/L | 22 | 19 | 3 | 9 | 8 | 17 |
| NO₂⁻ | | | | | | |
| * < 3,28mg/L | 118 | 100 | 34 | 100 | 48 | 100 |
| > 3,28mg/L | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| *NH₃ | | | | | | |
| * < 1,5 mg/L (como NH ₃) | 58 | 100 | 18 | 100 | 24 | 100 |
| > 1,5 mg/L (como NH ₃) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| DUREZA TOTAL | | | | | | |
| * < 500mg/L | 114 | 97 | 34 | 100 | 48 | 100 |
| > 500mg/L | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| STD | | | | | | |
| * < 1000mg/L | 116 | 98 | 34 | 100 | 48 | 100 |
| > 1000mg/L | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

contaminação na parte sudoeste da ilha (amostra PSL-07), onde os valores anômalos de cloreto e nitrato estão provavelmente relacionados a uma fonte pontual de contaminação nas proximidades, um depósito de fertilizantes. A mesma região apresentou concentrações elevadas para diversos outros parâmetros (NH_4 , K e Elementos Terras Raras), que seriam relacionadas à mesma fonte de contaminação.

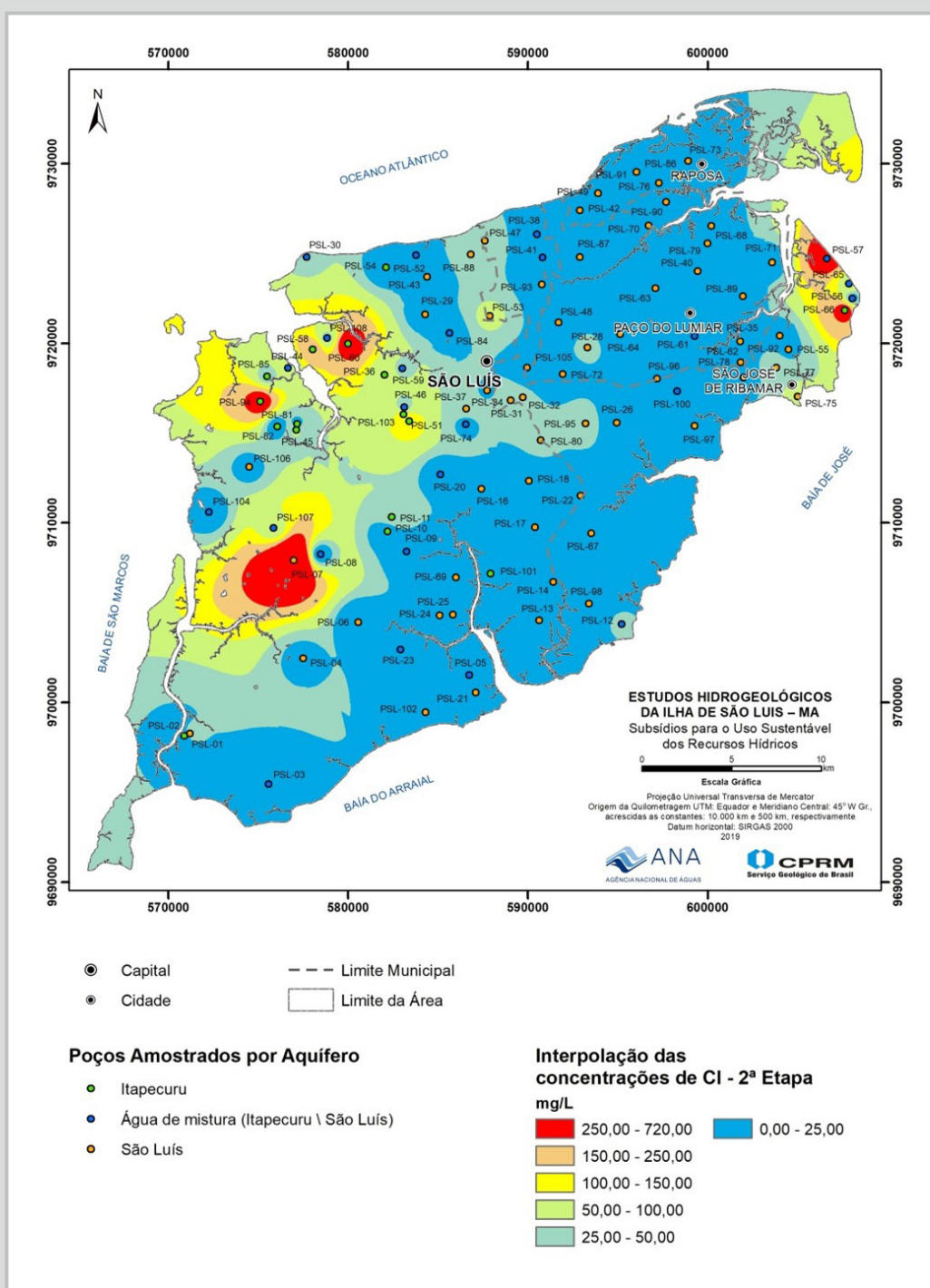


Figura 36: Mapa de zoneamento do Cloreto (período de estiagem – novembro 2017)

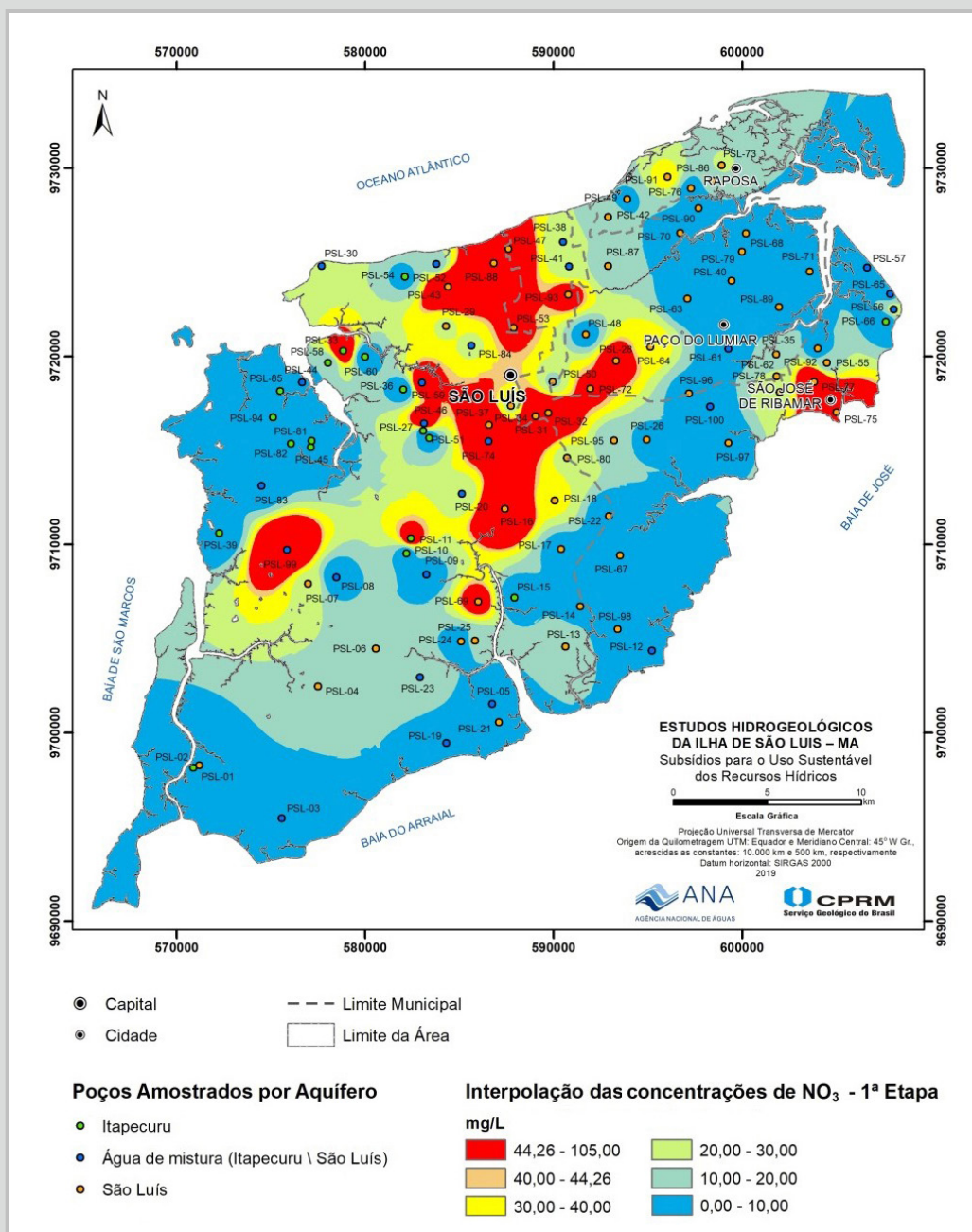


Figura 37: Mapa de zoneamento do Nitrato (período de chuvas – fevereiro 2017)

4.4.3. Análise de Parâmetros Específicos

Os resultados de parâmetros específicos coletados apenas em uma campanha e que impactam na qualidade das águas de acordo com a PRC nº 5 do MS/2017, são mostrados resumidamente a seguir:

A) Coliformes Totais e Fecais

As análises indicaram a presença de coliformes totais em 11 amostras das 42 analisadas e coliformes fecais em apenas uma 1 amostra. Para água potável estes valores excedem o

máximo permitido pela PRC nº 5 do MS/2017, que é de ausência de coliformes termotolerantes em 100 mililitros. A amostra com presença de coliformes fecais localiza-se em uma nascente e apresentou também o mais alto valor de coliformes totais (1.978/100 mL), ressaltando assim uma péssima proteção sanitária em seu entorno.

A presença de coliformes em 6 amostras está relacionada com elevados teores de nitrato. Outras 5 foram extraídas de poços sem proteção sanitária adequada e em precário estado de manutenção e conservação das estruturas construtivas, como calçadas de proteção, bombas, tampas, tubulações etc., condições que favoreceram a disseminação dos coliformes.

B) Elementos-Traço

Todas as amostras de água analisadas apresentaram teores menores que os valores máximos permitidos para águas potáveis nos seguintes elementos: Ba, Cu, Cr, Ni, Zn, As, Cd, Sb e Hg. Os elementos B, Br, Co, Li, Mo, Sr, Ti, V, Be, Sn e Ag apresentaram teores muito baixos.

Algumas amostras apresentaram teores acima do valor máximo permitido para Al (18% das amostras), Mn (12%), Pb (5%) e Se (1%), sendo os dois últimos os elementos mais prejudiciais para a saúde humana. Provavelmente foram lixiviados de pontos de descarte de lixo a céu aberto ou lixões.

C) BTEX e FENÓIS

Os BTEX, são representados por benzeno, tolueno, etilbenzeno, xilenos etc. Os compostos fenólicos mais frequentemente encontrados nas águas subterrâneas são os hidróxidos derivados do benzeno.

Os resultados das análises destes elementos nas águas dos aquíferos analisados mostram teores abaixo dos valores de limites de quantificação para todas as amostras analisadas.

4.4.4. Isótopos Estáveis Oxigênio - 18 e Deutério

Foram coletadas amostras para análise de isótopos estáveis Oxigênio - 18 e Deutério (^{18}O e ^2H) em 44 pontos d'água. As amostragens ocorreram nos períodos de chuva e estiagens (fevereiro e novembro de 2017), visando identificar variações associadas aos aspectos climáticos. Seus resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados das análises de isótopos estáveis Oxigênio 18 e Deutério (^{18}O e ^2H)

| | AQUÍFERO ITAPECURU | | ÁGUAS DE MISTURA | | AQUÍFERO SÃO LUÍS | |
|-----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Período chuvoso | Período de Estiagem | Período chuvoso | Período de Estiagem | Período chuvoso | Período de Estiagem |
| $\delta^{18}\text{O}$ | -3,86 a -3,68‰ | -4,52 a -3,05‰ | -4,06 a -2,28‰ | -3,74 a -2,83‰ | -4,22 a -2,85‰ | -4,13 a -2,99‰ |
| $\delta^2\text{H}$ | 23,40 a -17,50‰ | -25,20 a -13,60‰ | -22,80 a -14,10‰ | -19,00 a -12,30‰ | -23,60 a -13,90‰ | -21,80 a -13,30‰ |

A análise conjunta com os parâmetros químicos (cátions e ânions), incluindo o isótopo radioativo de trítio (^3H), a partir de uma matriz de correlação (Tabela 12), revelou correlações positivas fracas a moderadas entre as variáveis $\delta^{18}\text{O}$ e K, $\delta^{18}\text{O}$ e Cl, $\delta^{18}\text{O}$ e NO_3 e δD . O trítio mostrou comportamento inverso, com correlações negativas com potássio e o nitrato.

Tabela 12: Matriz de correlação entre os parâmetros isotópicos, físico-químicos e químicos

| | pH | turb | Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L) | Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Na (mg/L) | K (mg/L) | Mg (mg/L) | Ca (mg/L) | Mn (mg/L) | Fe (mg/L) | Cl (mg/L) | SO ₄ (mg/L) | NO ₃ (mg/L) | HCO ₃ (mg/L) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) | Trítio (UT) |
|---------------------------|-------|-------|-----------------------------------|--|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|-------------|
| HCO ₃ (mg/L) | 0,74 | 0,04 | 0,69 | 0,67 | 0,60 | 0,08 | 0,54 | 0,75 | 0,05 | 0,08 | 0,38 | 0,39 | -0,25 | 1,00 | | | |
| $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | -0,09 | -0,14 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,42 | 0,11 | 0,02 | -0,11 | 0,04 | 0,34 | 0,23 | 0,31 | -0,23 | 1,00 | | |
| δD (‰) | -0,17 | -0,15 | 0,16 | 0,16 | 0,06 | 0,45 | 0,08 | -0,09 | -0,05 | 0,08 | 0,32 | 0,20 | 0,33 | -0,26 | 0,92 | 1,00 | |
| Trítio (UT) | 0,21 | 0,02 | -0,26 | -0,27 | -0,18 | -0,57 | 0,10 | -0,11 | -0,40 | 0,02 | -0,22 | -0,25 | -0,44 | 0,17 | -0,05 | -0,05 | 1,00 |

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e δD foram lançadas em um gráfico juntamente com a reta meteórica global e com a reta meteórica para a região nordeste (Figura 38), elaborada por Salati *et al.* (1979). As análises foram separadas por aquífero (São Luís, Itapecuru ou Mistura de águas) e por período de coleta (chuvoso e de estiagem). Adicionalmente foram incluídas, para comparação, análises realizadas, por Pereira *et al.* (2002 e 2004), em 31 poços distribuídos pela Ilha.

A distribuição das análises, em especial para as amostras do aquífero São Luís, mostra grande proximidade com a reta meteórica mundial. Verifica-se também que as amostras do Aquífero Itapecuru se distinguem daquelas do Aquífero São Luís, apresentando maior enriquecimento em $\delta^{18}\text{O}$ e δD .

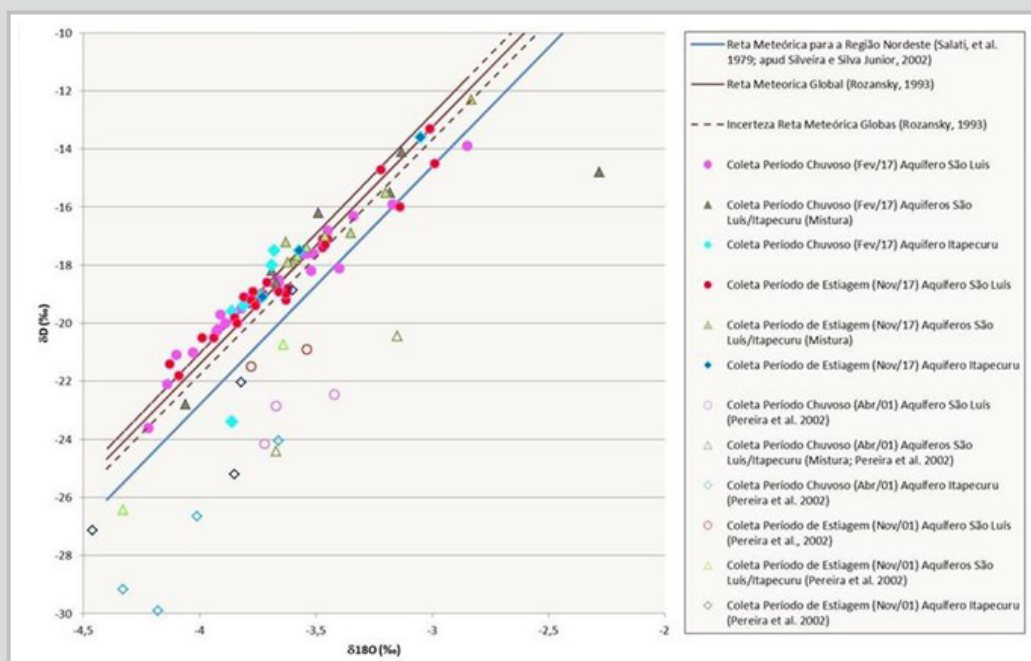


Figura 38: Diagrama de δD x $\delta^{18}\text{O}$ do conjunto de amostras coletadas no projeto (símbolos preenchidos). Lançadas também as linhas meteóricas Global e da região Nordeste e as análises realizadas por Pereira *et al.* (2002 e 2004), em símbolos não preenchidos

Os resultados obtidos se afastam da reta da região nordeste e, também não mostram concordância com análises efetuadas por Pereira *et al.* (2002 e 2004). Considerando as repetições das análises atuais nos mesmos poços amostrados por aqueles autores, a comparação revela um leve aumento nos valores isotópicos ao longo de 16 anos, o que parece condizer com a diminuição das precipitações na ilha.

As correlações positivas entre os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e δD e os parâmetros potássio e cloreto indicam as relações entre as águas mais empobrecidas isotopicamente e com menores conteúdos em K e Cl com o aquífero São Luís. As correlações positivas para o nitrato correspondem às amostras enriquecidas isotopicamente, com teores altos de NO_3 e elevada condutividade elétrica do Aquífero São Luís e à mistura São Luís/Itapecuru. A correlação negativa do trítio com potássio e nitrato atesta que as águas mais recentes se relacionam àquelas com menos potássio, menos condutivas e com menor concentração de NO_3 do aquífero São Luís.

De modo geral, as relações observadas $\delta^{18}\text{O}$ e δD e os valores médios de excesso de deutério assinalam infiltração rápida de águas meteóricas originadas da evaporação da água do mar, em condição de equilíbrio. Algumas amostras do aquífero São Luís e da mistura São Luís/Itapecuru, com valores médios a altos de condutividade elétrica, que se afastam da curva meteórica, indicam que a água infiltrada foi submetida a processo prévio de evaporação.

4.4.5. Isótopos Radioativos - Trítio e Carbono – 14

4.4.5.1. Trítio

Foram analisadas águas de 23 poços e 2 nascentes, captando os aquíferos Itapecuru e São Luís e em 6 outros captando os dois aquíferos simultaneamente, realizadas no Laboratório de Trítio Ambiental do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN.

Como a meia vida do trítio é relativamente curta (12,32 anos), o uso do isótopo aplica-se melhor para a datação de águas modernas, de algumas poucas décadas. Deste modo, a estimativa da idade das águas subterrâneas usando trítio apenas fornece valores semiquantitativos, de tal forma que, de acordo com Clark e Fritz (1997), temos:

- menor que 0,8 UT indica água submoderna (antes da década de 1950);
- 0,8 a 4 UT indica uma mistura de água submoderna e moderna;
- 5 a 15 UT indicam água moderna (<5 a 10 anos);
- 15 a 30 UT indicam algum trítio derivado dos testes nucleares;
- maior que 30 TU: a recarga ocorreu nas décadas de 1960 a 1970.

As concentrações de trítio medidas nos pontos d'água selecionados na área revelam uma grande variabilidade de valores para a água subterrânea, desde a ausência de trítio até valores superiores a 1 UT.

Os resultados obtidos mostram que as águas do Aquífero São Luís, apresentam grande variação dos tempos de renovação, desde inferior a 20 anos a superior a 200 anos, mas que apresentam um certo padrão de distribuição (Figura 39), que pode ser interpretado da seguinte forma:

- Tempos de residência elevados para as extremidades nordeste e sudoeste da Ilha;
- Idades intermediárias (águas sub-modernas) para as porções mais internas da Ilha; e
- Águas modernas (≤ 50 anos) na porção sul e nordeste da Ilha (Panaquatira).

Nota-se que a direção preferencial do fluxo das águas subterrâneas se dá do centro para as extremidades litorâneas. No caso da porção sul da Ilha, a ocorrência de águas modernas (≤ 50 anos) pode indicar uma recarga a partir da parte aflorante dos aquíferos no continente.

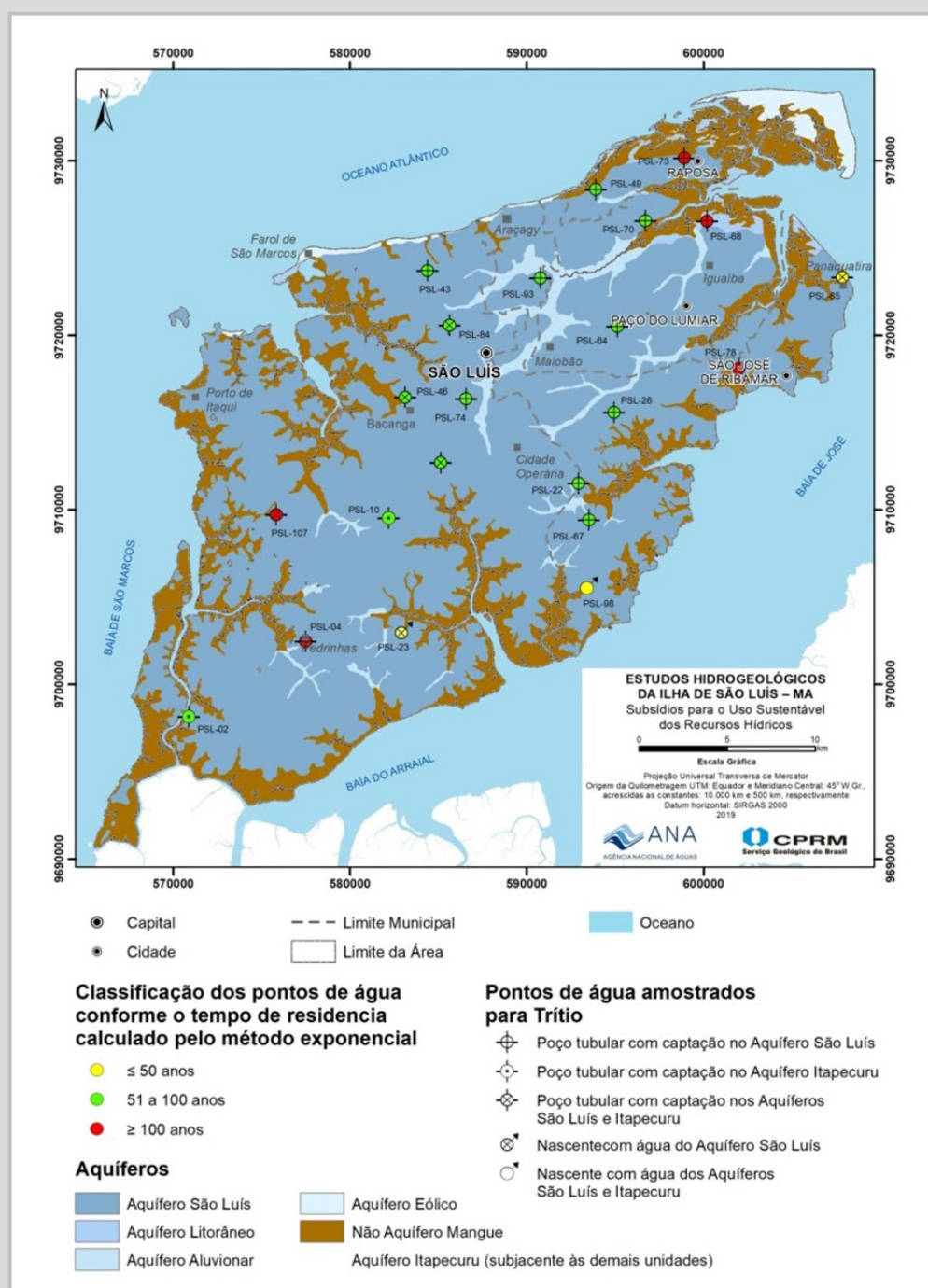


Figura 39: Tempos de residência das águas subterrâneas indicadas pelo trítio



4.4.5.2. Isótopos de Carbono 14

A datação de água subterrânea por radiocarbono (^{14}C) sinaliza o tempo em que esta deixou de ter contato com a atmosfera, ou seja, o tempo transcorrido desde que a água se converteu em água subterrânea.

Neste estudo as análises de ^{14}C foram realizadas pelo Laboratório de Radiocarbono, do Instituto de Física, da Universidade Federal Fluminense, utilizando Espectrômetros de Massa com Aceleradores. Foram enviadas 15 amostras de água, porém, devido à pequena quantidade de carbono na maioria delas, a quantidade de gás CO_2 gerada foi quase sempre inferior ao mínimo necessário para obter os resultados das idades de ^{14}C , permitindo a realização das análises em apenas 10 dessas amostras. Os resultados com as idades aparente e corrigidas são mostrados na Tabela 13.

Considerando os resultados obtidos após as correções e examinando os poços que captam o aquífero Itapecuru (ver mapa da Figura 40), é perceptível que as amostras PSL-10, PSL-104 e PSL-20 são águas recentes, mas sugere-se que para confirmação das correções sejam realizadas análises de ^{13}C . A hipótese de que se trata de águas recentes é corroborada pelas análises de Trítio nos poços PSL-10 e PSL-20.

Já as amostras PSL-44 e PSL-36, que se situam no sentido jusante do fluxo de água subterrânea, apresentam idades milenares. Além disso, se situam em áreas de depósitos de mangue, onde as recargas a partir de precipitações pluviométricas são quase inexistentes, evidenciando a lenta circulação da água subterrânea até esses pontos.

Os pontos analisados que captam exclusivamente o aquífero São Luís (PSL-21, PSL-67, PSL-74 e PSL-93), se mostram de forma mais coerente, exibindo idades bem mais jovens que aquelas do Itapecuru. O PSL-74 apresentou resultado negativo para o ^{14}C , mostrando que essa análise não seria a mais adequada, evidenciada pela idade (tempo de permanência) obtida pelo Trítio.

Os pontos de captações mistas São Luís e Itapecuru (PSL-03, PSL-20 e PSL-44) mostram idades mais dispersas, relacionadas de forma mais próxima com o aquífero que contribui com maior vazão para o poço.

Analisando as idades não corrigidas ou aparentes, se observa uma perfeita distribuição de idades para o aquífero São Luís, concordante com o modelo de fluxo considerado, com idades jovens e parecendo indicar fluxo do topo dos tabuleiros para as extremidades da Ilha.

Os poços que captam o aquífero Itapecuru (PSL-10, PSL-36 e PSL-104), por sua vez, mostram a mesma tendência, com idades (e tempo de fluxo ou de residência) no sentido do topo dos tabuleiros para a extremidade oeste da Ilha. O ponto PSL-10 mostrou idade corrigida como zero, coerente com a recarga.

Os poços de captação conjunta nos dois aquíferos normalmente exibem idades características das unidades que contribuem mais efetivamente para a descarga.

Tabela 13: Resultados (idades aparentes e corrigidas)

| CÓDIGO AMOSTRA | PSL-03 | PSL-10 | PSL-20 | PSL-21 | PSL-36 | PSL-104 | PSL-44 | PSL-67 | PSL-74 | PSL-93 |
|-----------------------------|----------------------|----------------|----------------------|----------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------|--------------|--------------|
| MUNICÍPIO | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | SÃO LUÍS | S.J. RIBAMAR | SÃO LUÍS | S.J. RIBAMAR |
| UTM E | 575573 | 582200 | 585136 | 587110 | 582033 | | 576667 | 593533 | 586571 | 590780 |
| UTM N | 9695448 | 9709525 | 9712700 | 9700550 | 9718231 | | 9718624 | 9709416 | 9716360 | 9723268 |
| LOCALIDADE | Igarau | Vila Esperança | São Raimundo | Tindiba | Estádio Castelhão | Praia do Cajueiro | Inhaúma | Bom Jardim II | São Bernardo | Parque Jair |
| PROF. (m) | 80 | 148 | 112,5 | 42 | 156 | 80 | 103 | | | 36 |
| AQUÍFERO CAPTADO | São Luís e Itapecuru | Itapecuru | São Luís e Itapecuru | São Luís | Itapecuru | Itapecuru | São Luís e Itapecuru | São Luís | São Luís | São Luís |
| IDADE APARENTE 14C (Godwin) | 2.312,07 | 3.794,10 | 393,38 | 391,56 | 18.931,96 | 247,46 | 17.348,32 | 446,35 | 0,00 | 684,11 |
| IDADE CORRIGIDA (Tamers) | 681,75 | 0,00 | 0,00 | - | 13.336,70 | 0,00 | 11.710,69 | - | - | - |
| Alcalinidade mg/l | 7,36 | 207,01 | 13,18 | 7,12 | 187,75 | 131,91 | 203,54 | 1,23 | 1,23 | 1,95 |
| HCO-3 mg/l | 8,98 | 225,08 | 16,08 | 8,69 | 229,05 | 160,93 | 224,91 | 1,50 | 1,50 | 2,38 |
| CO-3 mg/l | | 13,51 | | | 0,00 | 0,00 | 11,51 | 0,00 | 0,00 | |
| pH | 6,11 | 7,26 | 5,78 | 5,33 | 8,14 | 7,09 | 8,35 | 4,72 | 3,86 | 5,69 |
| CO2 mg/l (Tillmans) | 11,62 | 23,18 | 44,48 | 68,06 | 2,77 | 21,80 | 1,85 | 47,64 | 341,93 | 8,10 |
| Fator Tamers | 0,82 | 0,56 | 0,90 | - | 0,51 | 0,58 | 0,51 | - | - | - |

(Nos poços PSL-10, PSL-20 e PSL-104, as tentativas de determinar as idades corrigidas não tiveram sucesso e os valores estão grafados como 0,00).

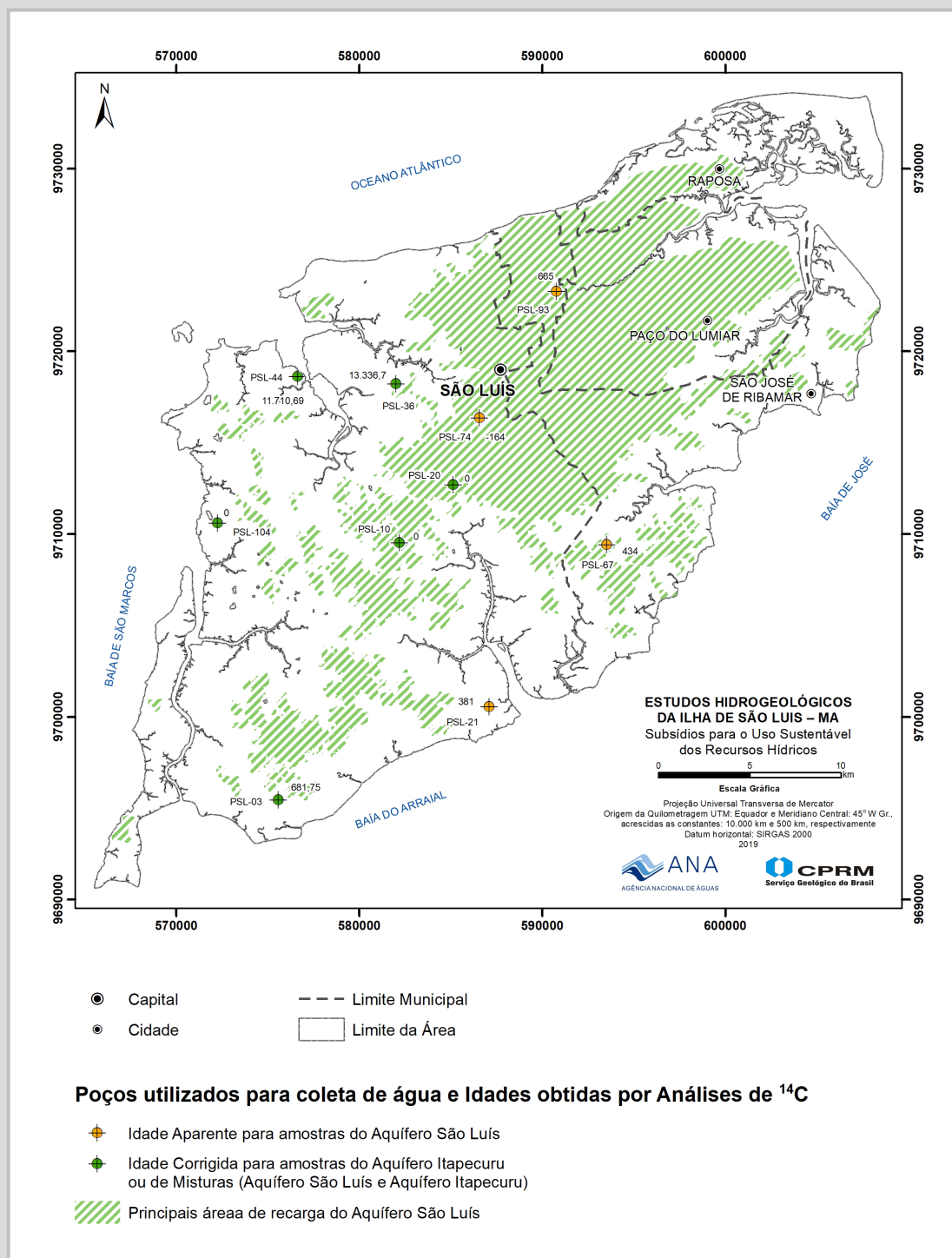


Figura 40: Distribuição dos poços amostrados e idades corrigidas de ^{14}C na Ilha do Maranhão

4.5. TESTES DE AQUÍFERO

Para execução dos testes de aquífero na Ilha de São Luís, foram definidos 4 conjuntos de poços de produção e piezômetros visando a captação dos dois Sistemas Hidrogeológicos locais, os aquíferos Itapecuru e São Luís.

Em cada um dos quatro testes realizados, os sistemas foram compostos por um poço de produção e um piezômetro, este último perfurado especificamente para o teste, uma vez que não havia poços que pudessem ser utilizados para tal fim.

Foram testados os seguintes pares de poços, para cada aquífero:

Aquífero Itapecuru (Formações Alcântara e Itapecuru Indiferenciado)

- Poço P3A (GP 009) – Sacavém Bacanga (produção) e Pz 01 (piezômetro);
- Poço P01 (MJ 080) – Vila Embratel (produção) e Pz 04 (piezômetro).

Aquífero São Luís (Formações Cujupe, Barreiras e Pós-Barreiras):

- Poço P1B (BE 007) – Sacavém Bacanga (produção) e Pz 02 (piezômetro);
- Poço P23 (FS 034) – Paciência II (produção) e Pz 03 (piezômetro).

Os testes foram realizados através do bombeamento contínuo no poço de produção, com vazão constante. Embora previstos para ter 48 horas de duração, nem sempre este tempo foi atingido, haja vista a necessidade da CAEMA de retomada do bombeamento para o abastecimento público local.

As vazões foram controladas por escoadouros de orifício circular, considerando a excelente precisão das leituras e a facilidade de assegurar a constância nas vazões produzidas, e os rebaixamentos, medidos nos poços de observação, foram registrados com medidores elétricos contendo em uma extremidade um eletrodo sensor e na outra um sistema eletrônico para sinalização sonora e visual simultânea, quando do contato do eletrodo com a água. No teste do poço P 3A/Pz 03, foi também utilizado sensor automático de nível, tipo *Level/ Logger*, programado para efetuar medições com intervalos de 1 minuto durante toda a duração do teste (bombeamento + recuperação). Logo após encerrados os bombeamentos, a recuperação dos níveis da água nos piezômetros era registrada até quando, por exigências da CAEMA, os poços precisassem ser religados. Dessa forma, nem sempre foi possível aguardar a recuperação completa dos níveis de água nos poços.

Os testes foram interpretados através dos métodos gráficos tradicionais e com a utilização do software *AquiferTest*, determinando-se os parâmetros de transmissividade, coeficiente de armazenamento e porosidade efetiva.

Considerando as características dos aquíferos (livres, confinados, drenantes) e a evolução dos rebaixamentos em relação ao tempo (regime permanente ou regime transiente), diversos tipos de métodos de análises foram utilizados para a interpretação dos resultados dos bombeamentos e a determinação dos parâmetros hidráulicos dos sistemas de fluxo subterrâneo, conforme a Tabela 14.

Tabela 14: Métodos de análise de fluxo para poços em função do tipo de aquífero e regime de bombeamento

| REGIME | AQUÍFEROS CONFINADOS | | AQUÍFEROS LIVRES |
|---------------------------|---------------------------|-----------------------|---|
| Estacionário ⁵ | Não drenante ⁶ | Drenante ⁷ | Dupuit & Forchheimer |
| | Thiem | De Glee | |
| | | Hantush & Jacob | |
| Transiente ⁸ | Theis Jacob | Walton Hantush | Hantush & Jacob Boulton & Pricket Neuman |

Algumas curvas dos testes de bombeamento, destes pares de poços, são mostradas a seguir (Figura 41, Figura 42, Figura 43 e Figura 44).

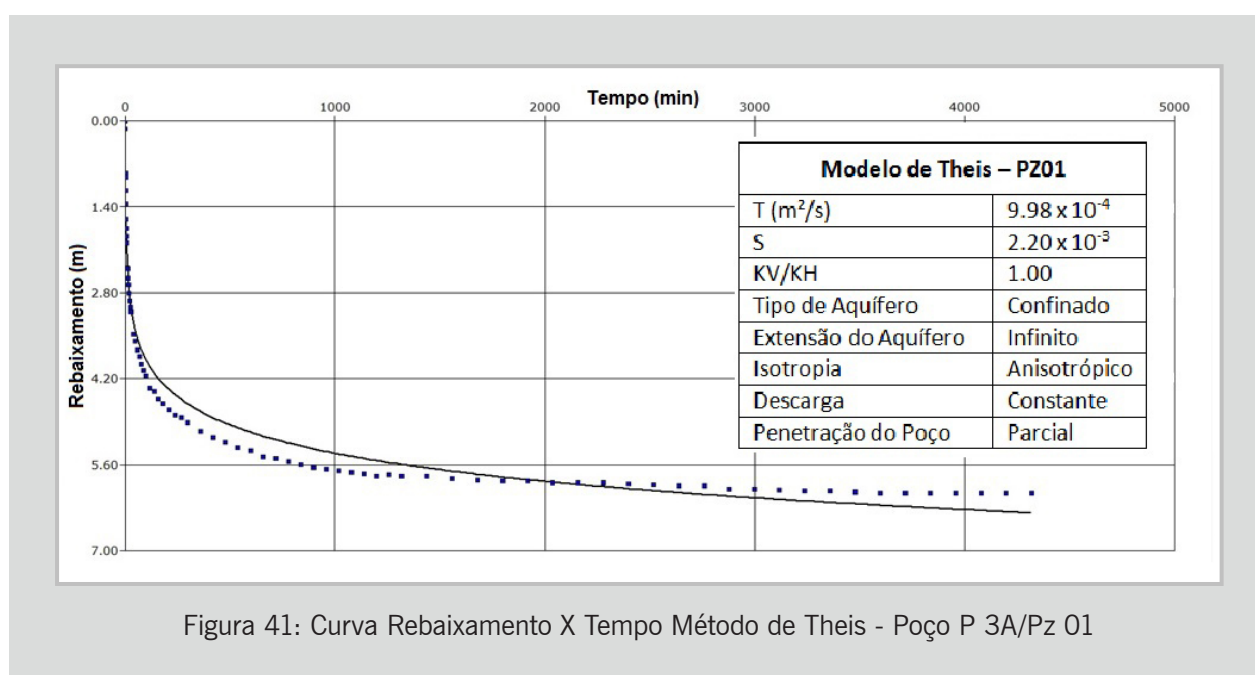


Figura 41: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Theis - Poço P 3A/Pz 01

⁵ Regime Estacionário – A água extraída durante o bombeamento do poço é proveniente não somente do armazenamento do aquífero, mas também de uma fonte externa (águas superficiais ou outros aquíferos). Se traduz, com a continuação do bombeamento, pela estabilização cone de rebaixamento e das medidas do nível da água no poço.

⁶ Aquífero Confinado não Drenante – as camadas confinantes que isolam o aquífero são praticamente impermeáveis, não permitindo a passagem de água. A água extraída no bombeamento é proveniente apenas do seu armazenamento.

⁷ Aquífero Confinado Drenante – as camadas confinantes são semi-permeáveis, possibilitando a passagem de água ou drenança.

⁸ Regime Transiente – A água extraída durante o bombeamento do poço é proveniente apenas do armazenamento do aquífero, o que se traduz por um contínuo rebaixamento do nível de água no poço devido à evolução progressiva do cone de rebaixamento com o tempo.

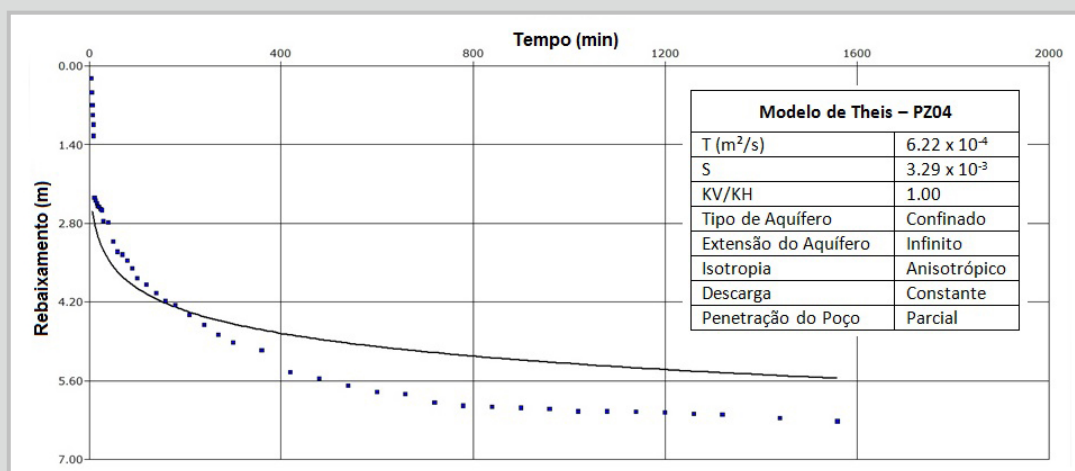


Figura 42: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Theis - Poço P 01/Pz 04

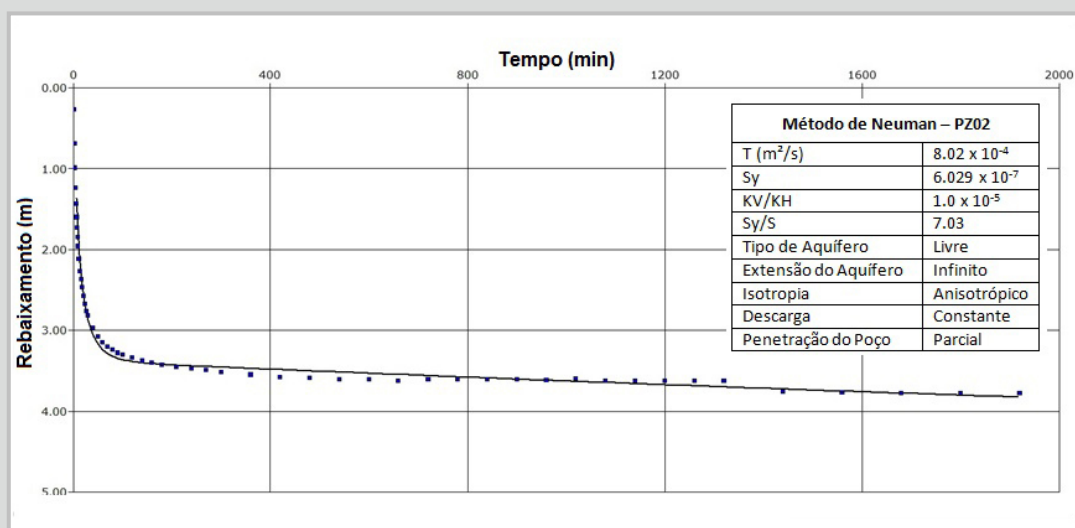


Figura 43: Curva Rebaixamento X tempo Método de Neuman - Poço P 1BI/Pz 02

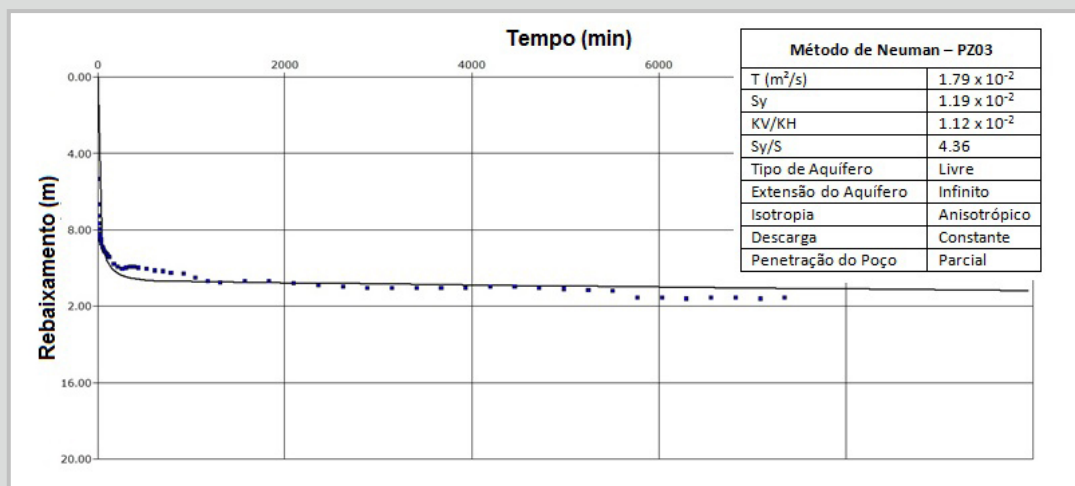


Figura 44: Curva Rebaixamento X Tempo Método de Neuman - Poço P 23/Pz 03

A Tabela 15 resume os resultados obtidos nas interpretações do ensaio de bombeamento dos poços que captam as águas do aquífero Itapecuru e a Tabela 16 os resultados para o aquífero São Luís.

Tabela 15: Quadro resumo dos valores obtidos para o aquífero Itapecuru

| TESTE DE AQUÍFERO | PARÂMETRO HIDRÁULICO | THEIS COM AQUIFERTEST | THEIS GRÁFICO | HANTUSH | WALTON | VALOR MÉDIO |
|-------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poço P3A e Pz 01 | Transmissividade T (m ² /s) | $9,98 \times 10^{-4}$ | $5,17 \times 10^{-4}$ | $5,67 \times 10^{-4}$ | $5,83 \times 10^{-4}$ | $6,66 \times 10^{-4}$ |
| | Coeficiente de Armazenamento (S) | $2,20 \times 10^{-3}$ | $1,5 \times 10^{-3}$ | $1,3 \times 10^{-3}$ | $1,4 \times 10^{-3}$ | $1,56 \times 10^{-3}$ |
| Poço P01 e Pz 04 | Transmissividade T (m ² /s) | $6,22 \times 10^{-4}$ | $4,17 \times 10^{-4}$ | $3,38 \times 10^{-4}$ | $5,83 \times 10^{-4}$ | $4,9 \times 10^{-4}$ |
| | Coeficiente de Armazenamento (S) | $3,29 \times 10^{-3}$ | $8,03 \times 10^{-6}$ | $6,51 \times 10^{-6}$ | $2,30 \times 10^{-4}$ | $8,84 \times 10^{-4}$ |

Tabela 16: Quadro - resumo dos valores obtidos para o aquífero São Luís

| TESTE DE AQUÍFERO | PARÂMETRO HIDRÁULICO | NEUMAN (AQUIFERTEST) | NEUMAN GRÁFICO | VALOR MÉDIO |
|-------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poço P1B e Pz 02 | Transmissividade (T - m ² /s) | $8,02 \times 10^{-4}$ | $2,33 \times 10^{-4}$ | $5,18 \times 10^{-4}$ |
| | Rendimento Específico (S _y) | $6,02 \times 10^{-7}$ | 1×10^{-3} | $5,0 \times 10^{-4}$ |
| Poço P23 e Pz 03 | Transmissividade (T - m ² /s) | $1,79 \times 10^{-2}$ | $8,83 \times 10^{-3}$ | $1,31 \times 10^{-2}$ |
| | Rendimento Específico (S _y) | $1,12 \times 10^{-2}$ | $3,0 \times 10^{-4}$ | $6,1 \times 10^{-3}$ |

4.6. POTENCIOMETRIA, NÍVEIS DE ÁGUA E DIREÇÃO DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O projeto incluiu a medição de níveis da água em cerca de 100 poços, selecionados de maneira a se obter uma boa distribuição geográfica e de acordo com as informações disponíveis quanto ao aquífero captado. Foram realizadas duas campanhas de medição de níveis da água, uma no período seco (novembro de 2017) e outra no período chuvoso (maio de 2018). Para obter uma boa precisão nas cotas dos níveis de água, o trabalho incluiu uma etapa prévia de levantamento geodésico das cotas altimétricas dos poços.

Devido à condição peculiar da Ilha de São Luís, onde a maioria dos poços bombeia em regime ininterrupto de 24h por dia e injetam as águas diretamente nas redes de adução existentes, não foi possível medir níveis estáticos. Desta forma, no caso do aquífero São Luís, os níveis medidos nas campanhas de campo realizadas não se referem ao nível potenciométrico natural, mas refletem apenas a situação operacional daquele momento, sendo referidos como níveis de água.

Os mapas foram elaborados selecionando os poços relacionados à captação exclusiva de cada sistema aquífero. O mapa dos níveis de água do Aquífero São Luís (Figura 45) indica a ocorrência de um grande divisor principal de águas subterrâneas e superficiais, na direção geral SSEW/ NNE (linha azul tracejada na figura), sugerido pela existência de surgências naturais nas suas falésias litorâneas (porções NE e NW) e pela variação simétrica dos níveis de água subterrânea a partir da região central da ilha. A partir deste divisor se formam as bacias hidrográficas da ilha, com os rios Estivas, Cachorros, Bacanga, Itaqui e Anil, drenando para noroeste e os rios

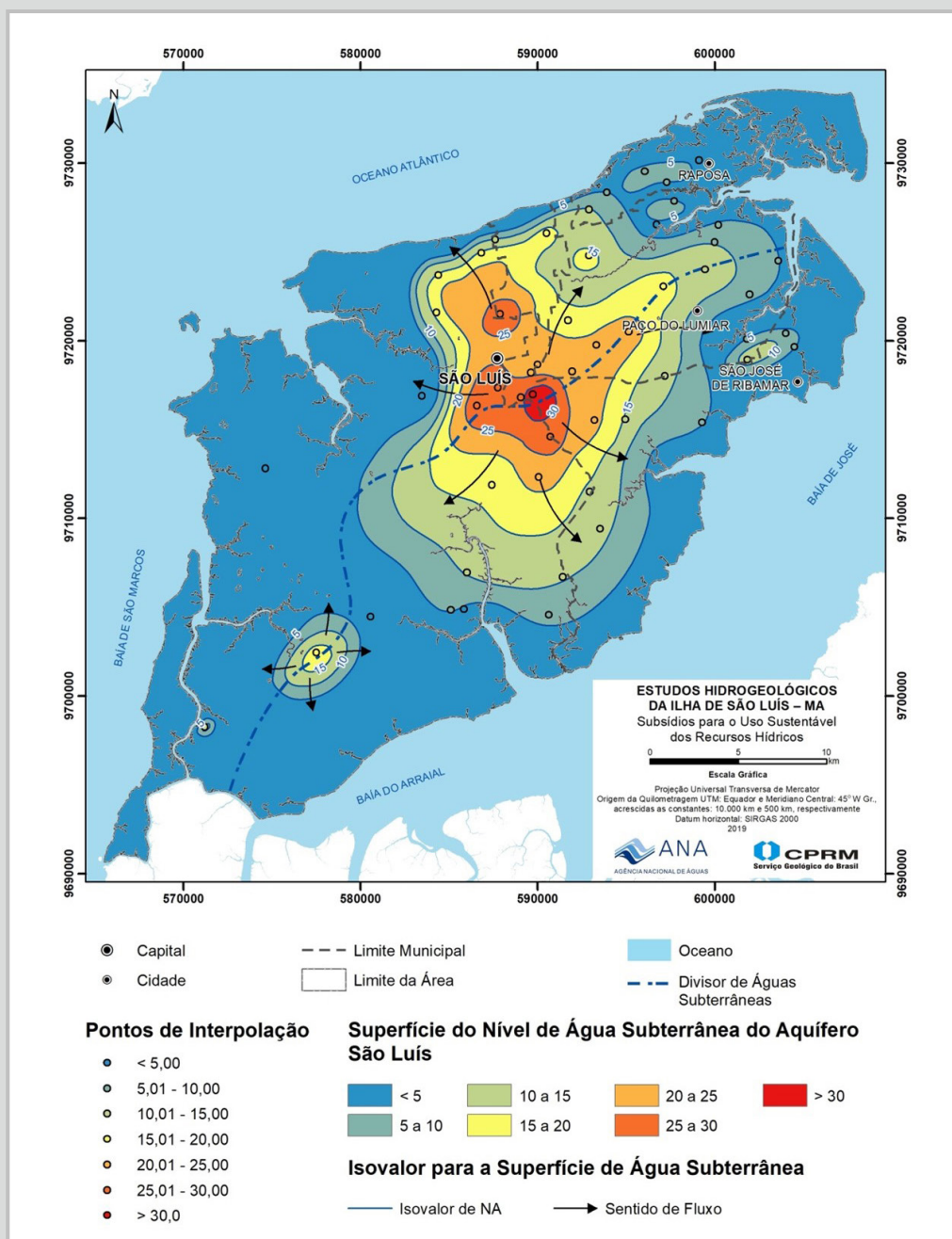


Figura 45: Superfície do Nível da Água Subterrânea e Direções de Fluxo do Aquífero São Luís. Dados da 2ª campanha, que apresentou maior quantidade e qualidade de dados



Inhaúma, Tibiri, Guarapiranga, Jeniparana e Santo Antônio para sudeste. A Bacia do rio Paciência se constitui numa feição à parte, com drenagem predominantemente na direção nordeste.

Com relação à piezometria do aquífero Itapecuru (Figura 46), a altura de água sob pressão corresponde à diferença entre o topo do aquífero confinado e os níveis da água subterrânea medidos nos poços com captação exclusiva no Aquífero Itapecuru. Na porção centro oeste da área, destaca-se uma região na qual a altura de água sob pressão é nula em relação ao nível do mar. Essas áreas se situam nas bacias hidrográficas dos rios Bacanga, Itaqui e Anil e, considerando que nessas regiões o Itapecuru ocorre de forma aflorante, sugerem uma possível exaustão das reservas sob pressão, podendo indicar a existência de riscos de salinização do aquífero nesses locais.

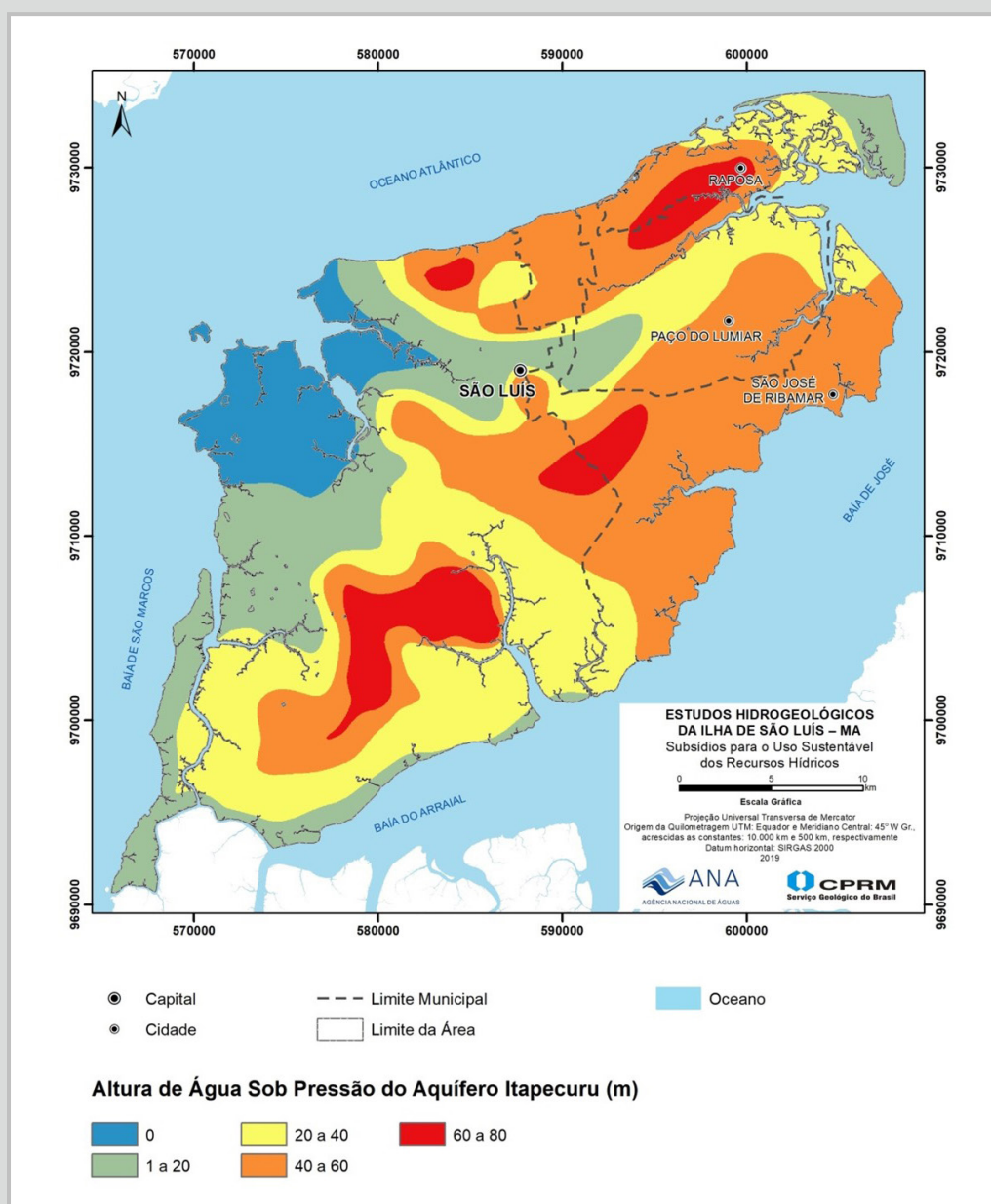


Figura 46: Superfície piezométrica do Aquífero Itapecuru

5.1. RECARGAS E BALANÇO HÍDRICO

Em um sentido amplo, a recarga subterrânea pode ser definida como qualquer quantidade de água que alcance um sistema aquífero, independentemente de sua origem (através da zona não saturada do solo, de uma camada confinante inferior ou superior, ou lateralmente, de outro sistema). No entanto, em estudos de quantificação de reservas hídricas subterrâneas o que se procura estimar é o volume de água proveniente do fluxo através da zona não saturada do solo, que alcança o nível freático e se adiciona ao reservatório subterrâneo.

A inexistência de séries históricas de monitoramento de vazões de rios na Ilha, para o cálculo do balanço hídrico e estimativa das recargas do aquífero São Luís, levou a utilização do método do balanço hídrico no solo, conforme metodologia desenvolvida pelo New Jersey Geological Survey, detalhadamente descrita no Volume II do relatório final. O método combina dados climatológicos com dados de solos (classificados de acordo com sua permeabilidade) e de uso e ocupação do solo.

Para a estimativa das recargas naturais foi utilizado intervalo mensal de dados climatológicos entre janeiro de 1972 a dezembro de 2016 e se considerou que toda água infiltrada que se move abaixo da zona das raízes contribui para a recarga.

Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 17. As recargas foram calculadas para cada bacia hidrográfica existente, sendo ainda apresentadas, no caso das recargas naturais, como um percentual das precipitações.

As recargas urbanas, conforme discutido anteriormente, também chamadas de recargas importadas, oriundas de atividades antrópicas, como vazamentos de redes de distribuição de água, de redes de esgotos e lançamentos de esgotos *in natura*, foram somadas à estas recargas naturais, obtendo-se assim os valores das recargas totais por bacia hidrográfica, bem como a recarga total na ilha mostrados na Tabela 18 e na Figura 47.

Visando corroborar os valores obtidos, foram feitas mais duas estimativas de recarga, utilizando os métodos da variação dos níveis potenciométricos e através da vazão de escoamento natural. Os cálculos e suposições nestes procedimentos, também são somente aplicáveis ao aquífero São Luís.

a) Variação das superfícies potenciométricas

Neste caso, temos que $R = A \times \Delta S \times \mu$, onde A é a área de recarga do aquífero, ΔS é a variação dos níveis da água subterrânea e μ é a porosidade efetiva do aquífero.



Tabela 17: Recargas naturais anuais médias para as bacias hidrográficas da Ilha de São Luís

| BACIA | A (km ²) | P (mm) | ETR (mm) (mm) | ES (mm) | ΔS (mm) | R (mm) | R (hm ³) | QESP L/s/km ² | ETR %P* | ES %P* | ΔS %P* | R %P* |
|------------------------|-------------------------|-----------|---------------------|------------|------------|-----------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| Bacia do Paciência | 149,69 | 2107,7 | 863 | 802,8 | 200,3 | 241,6 | 36,17 | 33,1 | 40,95% | 38,09% | 9,50% | 11,46% |
| Bacia do Tibiri | 136,5 | 2012 | 868,5 | 664,5 | 268,1 | 210,9 | 28,79 | 27,8 | 43,17% | 33,03% | 13,33% | 10,48% |
| Bacia do Santo Antônio | 97,08 | 2068,2 | 854,9 | 786,2 | 196,7 | 230,4 | 22,37 | 32,2 | 41,34% | 38,01% | 9,51% | 11,14% |
| Bacia do Bacanga | 96,38 | 2048,8 | 863,3 | 716,7 | 265,6 | 203,2 | 19,58 | 29,2 | 42,14% | 34,98% | 12,96% | 9,92% |
| Bacia do Anil | 37,14 | 2099,2 | 822,4 | 987,6 | 118,5 | 170,7 | 6,34 | 36,7 | 39,18% | 47,05% | 5,65% | 8,13% |
| Bacia do Jeniparana | 76,83 | 2042,6 | 874,8 | 672,6 | 281,9 | 213,3 | 16,39 | 28,1 | 42,83% | 32,93% | 13,80% | 10,44% |
| Bacia dos Cachorros | 67,6 | 2026,9 | 879,9 | 616,5 | 333,4 | 197,1 | 13,32 | 25,8 | 43,41% | 30,42% | 16,45% | 9,72% |
| Bacia do Inhaúma | 34,42 | 2014,9 | 908,5 | 398,7 | 555 | 152,7 | 5,26 | 17,5 | 45,09% | 19,79% | 27,54% | 7,58% |
| Bacia do Estiva | 34,13 | 2020,6 | 868,2 | 685,2 | 281,2 | 186 | 6,35 | 27,6 | 42,97% | 33,91% | 13,92% | 9,21% |
| Bacia do Itaqui | 45,25 | 2064 | 852,9 | 775,9 | 241,6 | 193,6 | 8,76 | 30,7 | 41,32% | 37,59% | 11,71% | 9,38% |
| Bacia do Guarapiranga | 15,83 | 2016,8 | 884,5 | 504,4 | 486,3 | 141,6 | 2,24 | 20,5 | 43,86% | 25,01% | 24,11% | 7,02% |
| Bacia Ilha | 28,31 | 2028 | 826,1 | 847,5 | 242,5 | 111,9 | 3,17 | 30,4 | 40,73% | 41,79% | 11,96% | 5,52% |
| Bacia Praias | 82,6 | 2133,5 | 848 | 869,3 | 239,3 | 176,9 | 14,61 | 33,2 | 39,75% | 40,75% | 11,22% | 8,29% |

P = Precipitação média anual; ETR = Evapotranspiração; ES = Escoamento superficial; ΔS = Excedente hídrico; R = Recarga subterrânea

Tabela 18: Recargas Totais por Bacia Hidrográfica

| BACIA | A-km ² | RECARGA NATURAL | | RECARGAS URBANAS | | | | | | | | RECARGA TOTAL | | RAZÃO TOTAL/NAT. |
|--------------|-------------------|----------------------|-------|------------------|-------|---------------------------|------|-----------------------|------|----------------|-------|----------------------|-----|------------------|
| | | hm ³ /ano | mm | REDE DE ÁGUA | | REDE DE COLETA DE ESGOTOS | | ESGOTOS NÃO COLETADOS | | URBANAS TOTAIS | | hm ³ /ano | mm | |
| Anil | 37,14 | 6,34 | 170,7 | 6,144 | 165,4 | 0,435 | 11,7 | 2,987 | 80,4 | 9,566 | 257,6 | 15,906 | 428 | 2,51 |
| Bacanga | 96,38 | 19,584 | 203,2 | 4,272 | 44,3 | 0,303 | 3,1 | 2,077 | 21,6 | 6,652 | 69 | 26,236 | 272 | 1,34 |
| Cachorros | 67,6 | 13,324 | 197,1 | 0,259 | 3,8 | 0,019 | 0,3 | 0,126 | 1,9 | 0,404 | 6 | 13,728 | 203 | 1,03 |
| Estiva | 34,13 | 6,348 | 186 | 0,223 | 6,5 | 0,016 | 0,5 | 0,108 | 3,2 | 0,347 | 10,2 | 6,695 | 196 | 1,05 |
| Guarapiranga | 15,83 | 2,242 | 141,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,242 | 142 | 1 |
| Ilha | 28,31 | 3,168 | 111,9 | 0,015 | 0,5 | 0,001 | 0 | 0,007 | 0,2 | 0,023 | 0,8 | 3,191 | 113 | 1,01 |
| Inhaúma | 34,42 | 5,256 | 152,7 | 0,009 | 0,3 | 0,001 | 0 | 0,004 | 0,1 | 0,014 | 0,4 | 5,27 | 153 | 1 |
| Itaqui | 45,25 | 8,76 | 193,6 | 0,644 | 14,2 | 0,046 | 1 | 0,313 | 6,9 | 1,003 | 22,2 | 9,763 | 216 | 1,12 |
| Jeniparana | 76,83 | 16,388 | 213,3 | 0,804 | 10,5 | 0,061 | 0,8 | 0,31 | 4 | 1,175 | 15,3 | 17,563 | 229 | 1,07 |
| Paciência | 149,69 | 36,165 | 241,6 | 8,963 | 59,9 | 0,617 | 4,1 | 4,715 | 31,5 | 14,295 | 95,5 | 50,46 | 337 | 1,39 |
| Praias | 82,6 | 14,612 | 176,9 | 2,037 | 24,7 | 0,139 | 1,7 | 1,112 | 13,5 | 3,288 | 39,8 | 17,9 | 217 | 1,23 |
| SANTônio | 97,08 | 22,367 | 230,4 | 4,29 | 44,2 | 0,304 | 3,1 | 2,076 | 21,4 | 6,67 | 68,7 | 29,037 | 299 | 1,3 |
| Tibiri | 136,5 | 28,788 | 210,9 | 0,864 | 6,3 | 0,061 | 0,4 | 0,418 | 3,1 | 1,343 | 9,8 | 30,131 | 221 | 1,05 |
| TOTALS | 901,76 | 183,342 | 203,3 | 28,524 | | 2,003 | | 14,253 | | 44,78 | 49,7 | 228,122 | 253 | 1,24 |



Foram utilizadas as informações de poços da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterâneas – RIMAS, implantados na Ilha, cujos dados cobrem um período de 8 meses e abrangem parcialmente os períodos úmido e seco (Figura 48). O nível da água em um desses piezômetros (Pz 2 – Sacavém) é mascarado pelo bombeamento de um poço de produção muito próximo, logo foi adotado um valor médio de modo a desconsiderar tal influência.

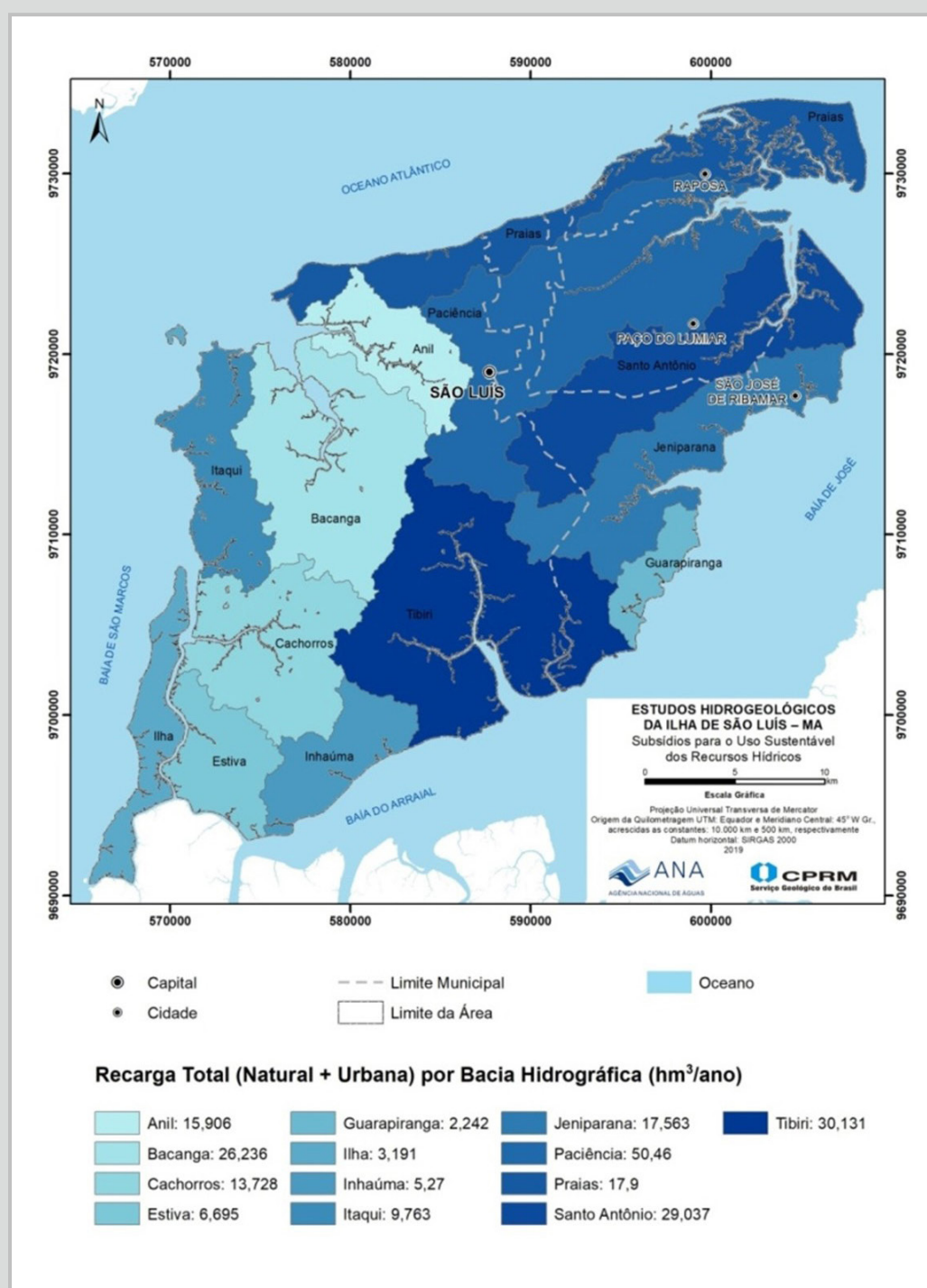


Figura 47: Recargas Totais naturais e urbanas por bacia hidrográfica (Sistema Aquífero São Luís)

Foi adotado o valor de 1,10m (piezômetro Paciência) para os rebaixamentos nas bacias de Paciência e Santo Antônio, situadas nos topos dos tabuleiros preservados e de 1,58m (Piezômetro Sacavém) para as demais áreas, que se localizam nas zonas mais dissecadas.

Substituindo esses valores e considerando a porosidade específica de 15%, conforme proposto por Manoel Filho & Castro (2002) foram obtidos os valores mostrados na Tabela 19.

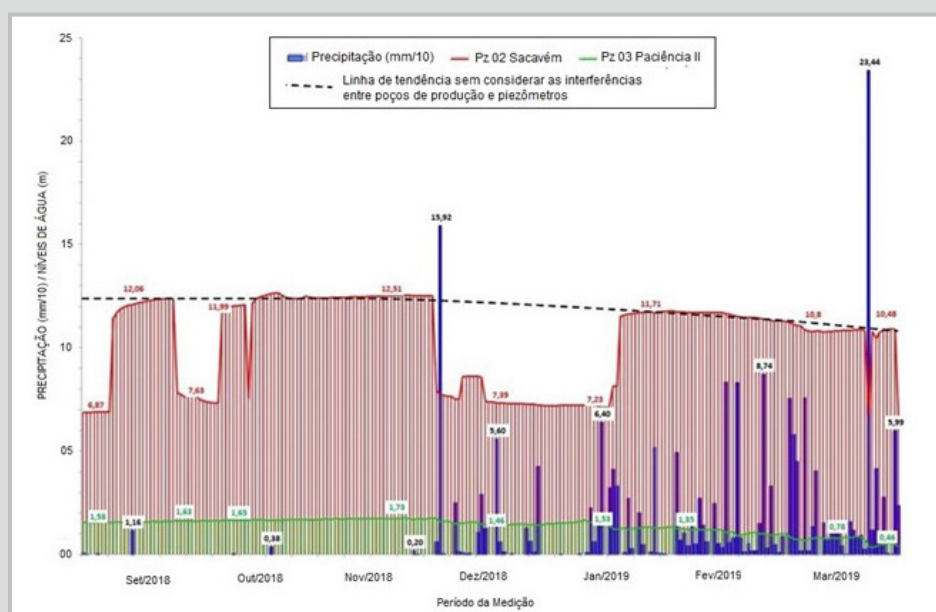


Figura 48: Variações dos níveis de água medidos em poços da rede RIMAS (agosto/2018 e abril/2019)

Tabela 19: Cálculo das recargas pela variação dos níveis potenciométricos

| BACIA | ÁREA (km ²) | VARIAÇÃO DOS NÍVEIS RIMAS (m) | VOLUME DE RECARGA (Hm ³) |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Anil | 37,14 | 1,58 | 8,80 |
| Bacanga | 96,38 | 1,58 | 22,84 |
| Cachorros | 67,6 | 1,58 | 16,02 |
| Estiva | 34,13 | 1,58 | 8,09 |
| Guarapiranga | 15,83 | 1,58 | 3,75 |
| Ilha | 28,31 | 1,58 | 6,71 |
| Inhaúma | 34,42 | 1,58 | 8,16 |
| Itaqui | 45,25 | 1,58 | 10,72 |
| Jeniparana | 76,83 | 1,58 | 18,21 |
| Paciência | 149,69 | 1,10 | 24,70 |
| Praias | 82,6 | 1,58 | 19,58 |
| Santo Antônio | 97,08 | 1,10 | 16,02 |
| Tibiri | 136,5 | 1,58 | 32,35 |
| RECARGA TOTAL (Hm ³) | | | 195,95 |

b) Vazão de Escoamento Natural

A Vazão de Escoamento Natural (VEN) equivale ao volume de água que passa naturalmente pelo aquífero, alimentando os rios e demais cursos d'água e representa a variação anual natural dos níveis de água do aquífero, podendo ser calculada de acordo com a equação, $VEN = T \times i \times L$, sendo T a transmissividade do aquífero, i o gradiente hidráulico e L o comprimento da frente de escoamento considerada (Figura 49).

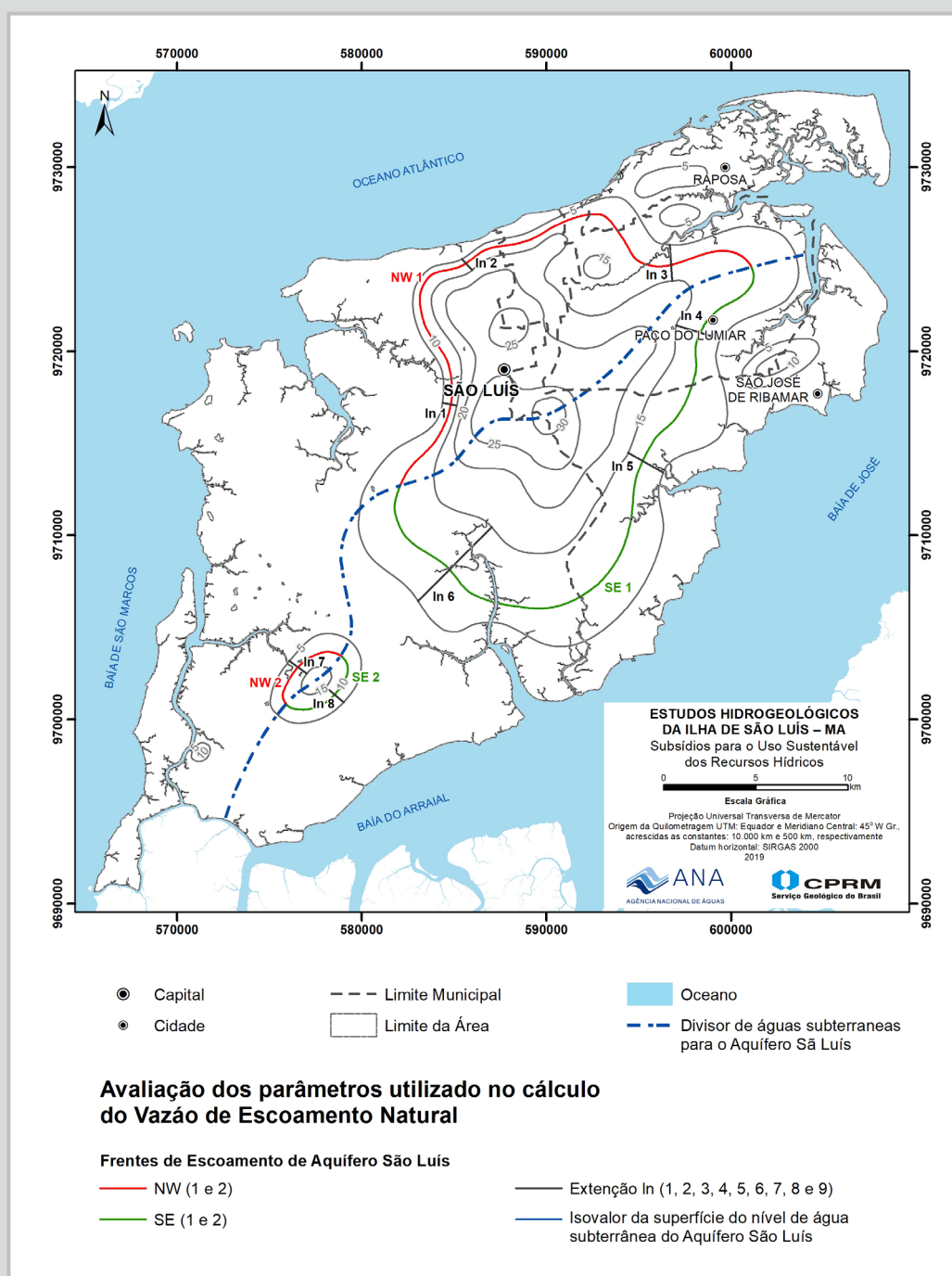


Figura 49: Cálculo da Vazão de Escoamento Natural (VEN)

As frentes de escoamento utilizadas se situam entre as linhas potenciométricas de 15 e 5 m e considerou-se uma transmissividade (T) de 10^{-2} m²/s no topo dos tabuleiros e de 5.10^{-3} m²/s nas áreas mais rebaixadas. O volume correspondente ao somatório das frentes de escoamento consideradas totalizou 183,47 hm³/ano, correspondendo à recarga total na Ilha. Os cálculos e demais procedimentos detalhados adotados na sua determinação, podem ser vistos no Volume IV do Relatório Final.

No caso do cálculo da VEN, a estimativa das recargas não foi realizada por bacia hidrográfica, uma vez que os pontos obtidos não permitiam uma cobertura homogênea da superfície de cada bacia individualmente.

Comparando os resultados obtidos nas três metodologias utilizadas para o cálculo da recarga, conforme a Tabela 20, verifica-se que os valores de recarga no solo, obtido pela metodologia do Balanço Hídrico, o estimado pela variação dos níveis nos poços de monitoramento da RIMAS e aqueles calculados pela Vazão de Escoamento Natural mostraram-se muito próximos. Destaca-se que a segunda coluna com a recarga natural no solo total considera, também, as recargas importadas.

No caso do Aquífero Itapecuru, confinado/semiconfinado, a recarga se dá por drenança vertical através de infiltrações descendentes advindas do Aquífero São Luís, sendo, para isso necessário utilizar os dados piezométricos do aquífero superior (São Luís) e os níveis da água sob pressão da unidade confinada, Itapecuru, apresentados anteriormente na Figura 50 e na Figura 52.

Tabela 20: Valores da recarga calculados pelos diversos métodos

| BACIA | RECARGA NO SOLO (NATURAL) (hm ³ /ano) | RECARGA NO SOLO (TOTAL*) (hm ³ /ano) | RECARGA VARIAÇÃO DOS NÍVEIS (hm ³ /ano) | RECARGA VEN (hm ³ /ano) |
|---------------|--|---|--|--|
| Anil | 6,34 | 15,906 | 8,8 | |
| Bacanga | 19,584 | 26,236 | 22,84 | |
| Cachorros | 13,324 | 13,728 | 16,02 | |
| Estiva | 6,348 | 6,695 | 8,09 | |
| Guarapiranga | 2,242 | 2,242 | 3,75 | |
| Ilha | 3,168 | 3,191 | 6,71 | |
| Inhaúma | 5,256 | 5,27 | 8,16 | |
| Itaqui | 8,76 | 9,763 | 10,72 | |
| Jeniparana | 16,388 | 17,563 | 18,21 | |
| Paciência | 36,165 | 50,46 | 24,7 | |
| Praias | 14,612 | 17,9 | 19,58 | |
| Santo Antônio | 22,367 | 29,037 | 16,02 | |
| Tibiri | 28,788 | 30,131 | 32,35 | |
| TOTAIS | 183,342 | 228,122 | 195,95 | 183,18 |

*Recargas Naturais + Recargas Urbanas

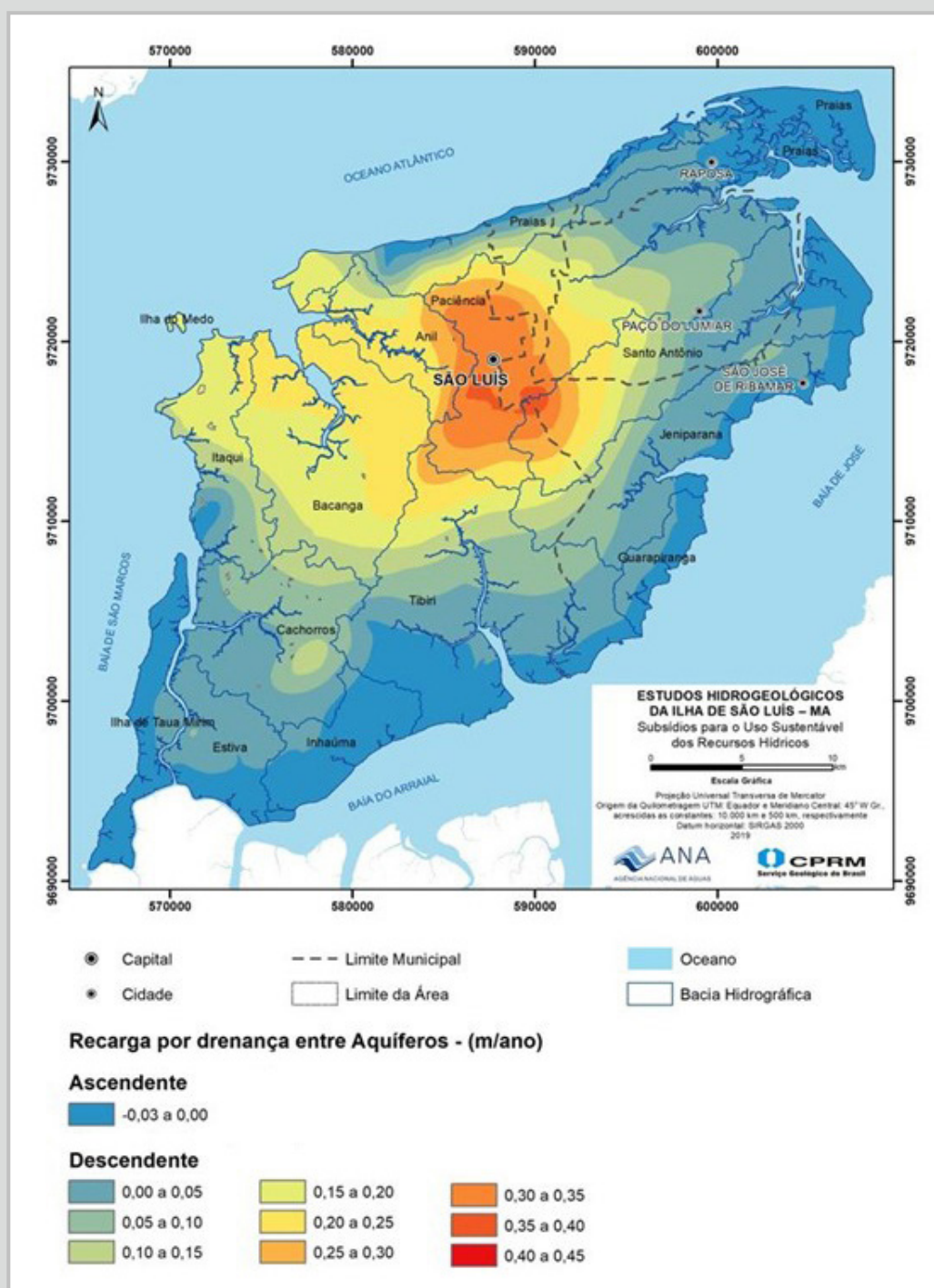


Figura 50: Drenanças verticais entre os aquíferos São Luís e Itapecuru

A taxa da filtração vertical entre as duas unidades (São Luís e Itapecuru), pode ser calculada pela utilização da equação abaixo:

$$d_v = K' [(h_1 - h_2)/b'], \text{ onde}$$

d_v - Filtração vertical para o aquífero através da camada semipermeável;

K' = Condutividade hidráulica da camada semipermeável;

b' = Espessura da camada semipermeável;

h_1 = Carga piezométrica do aquífero que transfere;

h_2 = Carga piezométrica do aquífero que recebe.

Para os cálculos da taxa de drenança (d_v) adotou-se condutividade hidráulica (K') de 10^{-9} m/s e espessura média (b') de 45 m para a camada confinante (Formação Alcântara). As cargas piezométricas (h_1 e h_2) foram obtidas dos mapas piezométricos dos aquíferos São Luís (Figura 45) e Itapecuru (Figura 46). O mapa da Figura 50 apresenta os resultados.

Os volumes totais envolvidos nestas trocas são obtidos pela multiplicação dos valores da drenança vertical por suas áreas.

I. Drenança vertical ascendente: 2.790.138,00 m³/ano (2,8 hm³/ano);

II. Drenança vertical descendente: 89.276.089,05 m³/ano (89,28 hm³/ano)

Assim, no balanço dessas transferências de águas, o aquífero São Luís perde um volume total de aproximadamente de 89.276.089,05 m³/ano, cedido para o aquífero Itapecuru. Esta drenança se constitui, portanto, em importante exutório do aquífero São Luís e na principal fonte de recarga para o Sistema Itapecuru.

5.2. RESERVAS

5.2.1. Aquífero São Luís

A quantidade de água contida nos aquíferos pode ser distinguida em armazenamento drenável e armazenamento compressível (MACE *et al.*, 2001). Os referidos autores conceituaram o armazenamento drenável como a quantidade de água que pode ser drenada do aquífero em função da porosidade efetiva da rocha. O armazenamento compressível, por sua vez, representa a quantidade de água armazenada devido aos efeitos elásticos resultantes da compressão do próprio arcabouço físico e da água contida nos poros, em função do coeficiente de armazenamento do aquífero, sendo aplicado no caso dos aquíferos confinados.

São considerados os seguintes tipos de reservas de águas subterrâneas:

- Reservas reguladoras, renováveis ou ativas;
- Reservas permanentes ou seculares;
- Reservas totais;
- Reservas explotáveis.

O aquífero São Luís possui reservas renováveis (ou reguladoras) e reservas permanentes (ou seculares), que somadas resultam em suas reservas totais.

As reservas renováveis representam a quantidade de água armazenada no aquífero e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico, correspondendo à recarga sazonal. Essas reservas são determinantes para a manutenção do escoamento de base dos rios e podem variar de um ano para o outro, dependendo das condições de precipitação atmosférica. Foram estimadas com base nos valores de recargas naturais e artificiais apresentados anteriormente.

Por se tratar de um aquífero livre, suas reservas permanentes correspondem ao volume de água acumulado, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1996), ou seja, compreende o volume de água contido no armazenamento drenável permanente, abaixo no nível de oscilação sazonal. Pode ser calculado de acordo com a equação:

$$R_p = A.E.\mu$$

Onde, A é a área do aquífero, E é a espessura saturada e μ a porosidade efetiva, admitida como 15% (MANOEL FILHO & CASTRO, 2002).

As reservas renováveis, permanentes e totais do aquífero São Luís estão apresentadas na Tabela 21.

As espessuras saturadas foram obtidas do mapa da Figura 51, elaborado pelo processamento de dados dos perfis geológicos de poços (obtenção da espessura total do aquífero), de topografia (dados SRTM) e da superfície de nível da água do aquífero.

Tabela 21: Reservas renováveis, permanentes e totais do Sistema Aquífero São Luís

| BACIA | ÁREA (km ²) | ESPESSURA SATURADA MÉDIA (m) | RESERVA PERMANENTE (hm ³) | RESERVA RENOVÁVEL (hm ³ /ano) | RESERVA TOTAL (hm ³) |
|---------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------------|
| Anil | 37,14 | 26,3 | 136,142 | 15,906 | 152,05 |
| Bacanga | 96,38 | 26,5 | 358,045 | 26,236 | 384,28 |
| Cachorros | 67,6 | 33,7 | 327,689 | 13,72 | 341,4 |
| Estiva | 34,13 | 20,4 | 97,91 | 6,695 | 104,6 |
| Guarapiranga | 15,83 | 26,9 | 61,658 | 2,242 | 63,9 |
| Ilha | 28,31 | 10,2 | 39,919 | 3,191 | 43,1 |
| Inhaúma | 34,42 | 23,1 | 113,737 | 5,27 | 119 |
| Itaqui | 45,25 | 14,8 | 90,815 | 9,763 | 100,6 |
| Jeniparana | 76,83 | 34,7 | 382,276 | 17,563 | 399,8 |
| Paciência | 149,69 | 51,6 | 1113,182 | 50,46 | 1.163,6 |
| Praias | 82,6 | 21,8 | 253,788 | 17,9 | 271,7 |
| Santo Antônio | 97,08 | 48,2 | 676,145 | 29,037 | 705,2 |
| Tibiri | 136,5 | 29,5 | 574,137 | 30,131 | 604,3 |
| TOTAL | 901,8 | 32,8 | 4225,443 | 228,12 | 4.453,56 |

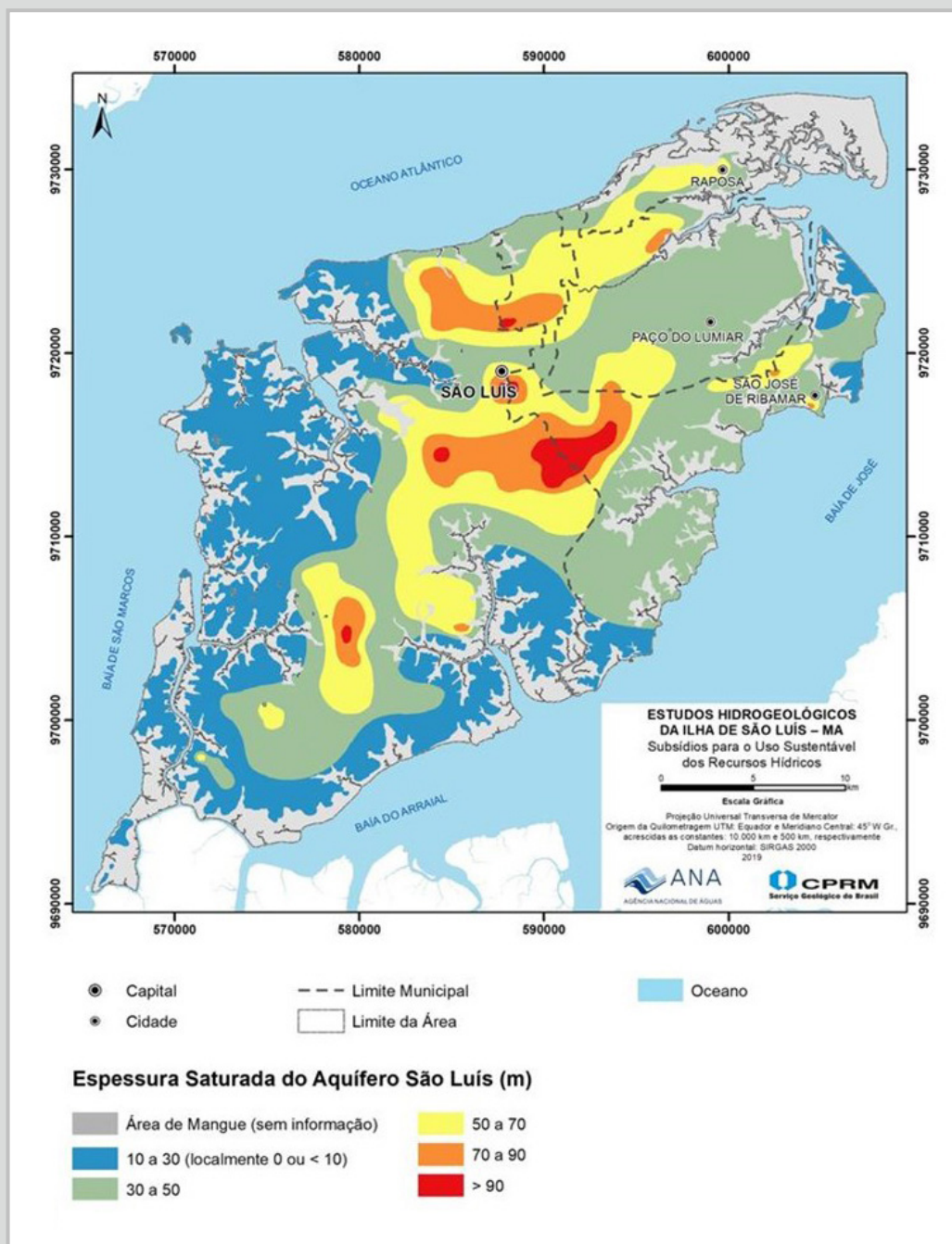


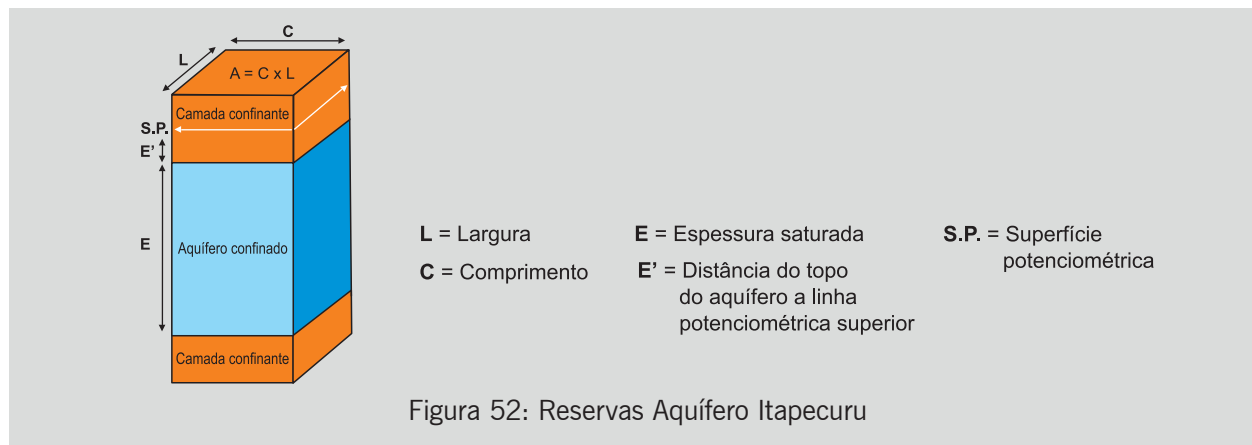
Figura 51: Espessuras saturadas do Aquífero São Luís

5.2.2. Aquífero Itapecuru

No caso do aquífero Itapecuru, por se tratar de aquífero confinado, praticamente não há reservas renováveis e as reservas permanentes compreendem a soma da água do armazenamento drenável (contida nos poros do aquífero) e compressível (altura de pressão acima do teto do aquífero), de acordo com a expressão:

$$R_p = A.E.\mu_e + A.E'.S \text{ (Figura 52), sendo que:}$$

μ_e é a porosidade efetiva, considerada como 15%, de acordo com CPRM (2012); A é a área do aquífero e S é o coeficiente de armazenamento.



Para estimar as espessuras saturadas (E), a base do aquífero foi fixada na cota de 100m abaixo do nível do mar.

Os resultados obtidos para o armazenamento drenável (primeiro termo da equação), também denominado reserva de saturação, encontram-se exibidos na Tabela 22, por bacia hidrográfica.

O parâmetro E' , no segundo termo da equação compreende o intervalo situado entre o topo da superfície potenciométrica e o topo do aquífero confinado. Os resultados obtidos para o armazenamento compressível, também é mostrado na Tabela 22.

Tabela 22: Reservas drenáveis ou de saturação para o aquífero Itapecuru na Ilha do Maranhão

| BACIA | ÁREA (km ²) | ESPESSURA SATURADA MÉDIA (m) | VOLUME COMPRESSÍVEL (hm ³) | VOLUME DRENÁVEL OU DE SATURAÇÃO (hm ³) |
|---------------|-------------------------|------------------------------|--|--|
| Anil | 37,14 | 53,2 | 0,55 | 296,47 |
| Bacanga | 96,38 | 50,5 | 2,09 | 730,28 |
| Cachorros | 67,60 | 46,9 | 3,31 | 475,24 |
| Estiva | 34,13 | 55,5 | 1,43 | 284,18 |
| Guarapiranga | 15,83 | 43,0 | 1,06 | 101,99 |
| Ilha | 28,31 | 67,3 | 0,5 | 285,68 |
| Inhaúma | 34,42 | 55,7 | 1,42 | 287,50 |
| Itaqui | 45,25 | 65,1 | 0,28 | 442,15 |
| Jeniparana | 76,83 | 40,4 | 5,16 | 466,15 |
| Paciência | 149,69 | 40,8 | 8,1 | 916,37 |
| Praias | 82,6 | 49,1 | 3,92 | 608,90 |
| Santo Antônio | 97,08 | 38,2 | 6,49 | 556,16 |
| Tibiri | 136,5 | 46,5 | 7,29 | 952,91 |
| TOTAL | 901,8 | 47,3 | 41,61 | 6.403,96 |

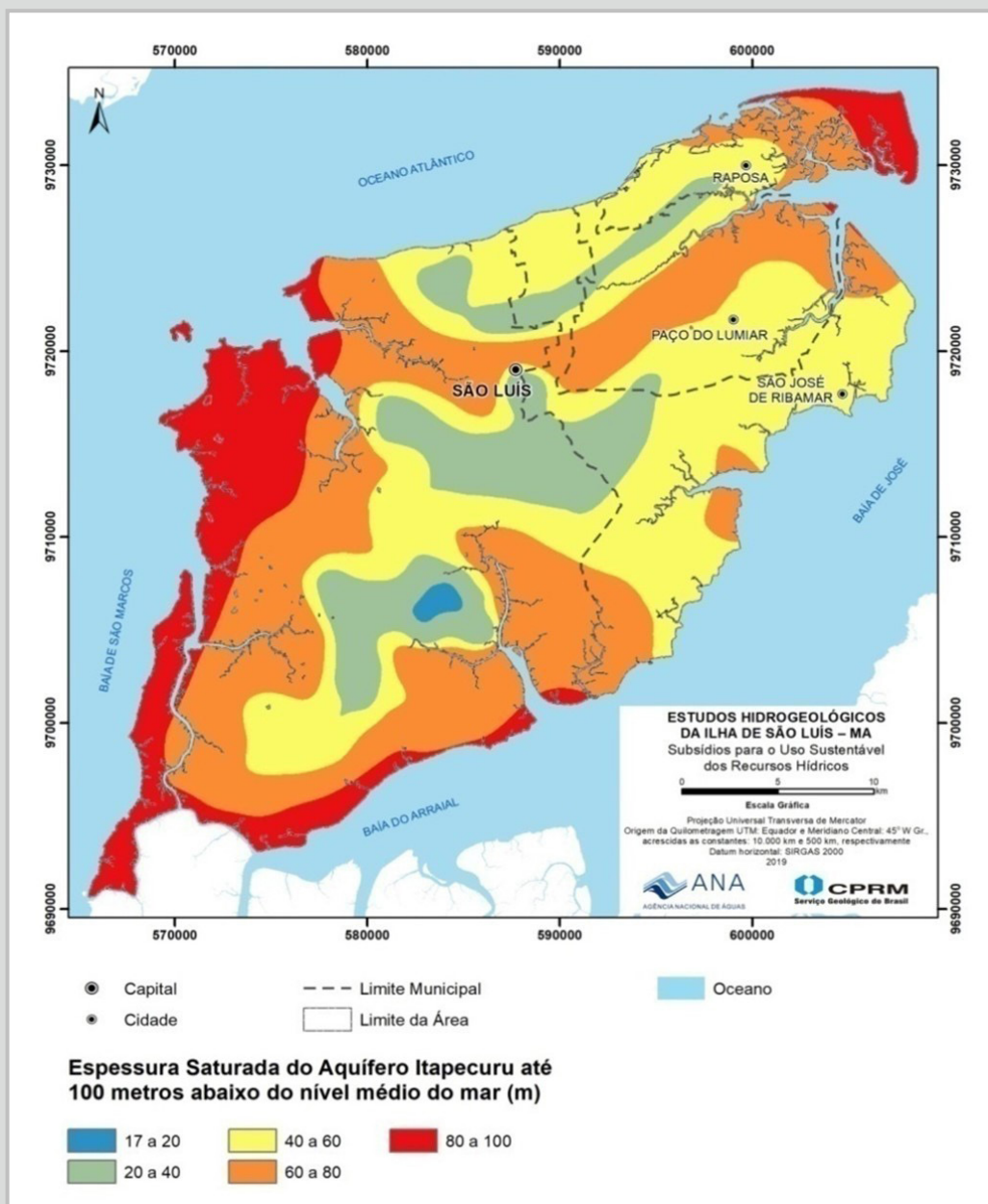


Figura 53: Espessuras saturadas – Aquífero Itapecuru

5.3. DISPONIBILIDADES

5.3.1. Aquífero São Luís

Utiliza-se neste documento o conceito de disponibilidade hídrica adotado pela Agência Nacional de Águas, que considera apenas uma parcela da Recarga Potencial Direta (RPD) como reserva explotável, de modo a evitar efeitos adversos nos aquíferos e redução significativa das vazões de base dos rios a eles interconectados. Essa parcela ou percentual máximo é denominado Coeficiente de Sustentabilidade (C_s) e aplica-se ao caso dos aquíferos livres. Adotou-se para o Sistema Aquífero São Luís o valor de 0,7, visando a

manutenção dos volumes de água da barragem do Batatã e a garantia da manutenção das vazões de base dos rios locais.

Além disso, foram consideradas as variações nas reservas a partir do somatório dos volumes que entram e saem em cada unidade aquífera, a partir das drenanças verticais que ocorrem, que podem ser ascendentes (o Itapecuru fornecendo água para o São Luís) ou descendentes, quando o aquífero São Luís libera parte de suas reservas para o Itapecuru.

Os valores da disponibilidade do Aquífero São Luís, considerando as drenanças verticais e após a aplicação do C_s são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23: Reservas Potenciais Explotáveis por Bacia Hidrográfica - Sistema Aquífero São Luís

| BACIA | RECARGA TOTAL- (hm^3/ano) | VOLUME DE DRENANÇA (hm^3/ano) | RESERVAS AJUSTADAS PARA A DRENANÇA (hm^3/ano) | RESERVAS EXPLOTÁVEIS com C_s DE 0,7 (hm^3/ano) |
|---------------|--|--|--|--|
| Anil | 15,906 | 8,37 | 7,536 | 5,2752 |
| Bacanga | 26,236 | 18,54 | 7,696 | 5,3872 |
| Cachorros | 13,72 | 3,83 | 9,89 | 6,923 |
| Estiva | 6,695 | 0,45 | 6,245 | 4,3715 |
| Guarapiranga | 2,242 | 0,02 | 2,222 | 1,5554 |
| Ilhas | 3,191 | -0,14* | 3,331 | 2,3317 |
| Inhaúma | 5,27 | -0,34* | 5,61 | 3,927 |
| Itaqui | 9,763 | 5,52 | 4,243 | 2,9701 |
| Jeniparana | 17,563 | 3,41 | 14,153 | 9,9071 |
| Paciência | 50,46 | 25,98 | 24,48 | 17,136 |
| Praias | 17,9 | 3,08 | 14,82 | 10,374 |
| Santo Antônio | 29,037 | 10,22 | 18,817 | 13,1719 |
| Tibiri | 30,131 | 7,92 | 22,211 | 15,5477 |
| TOTAL | 228,12 | 86,86 | 141,254 | 98,88 |

* Os valores grifados em vermelho representam fluxos do Itapecuru para o São Luís

5.3.2. Aquífero Itapecuru

No caso das reservas de saturação, normalmente se admite um volume de exploração de 30% no período de 5 anos, equivalente a 6% ao ano. No caso da Ilha de São Luís, considerando a existência de áreas nas quais as reservas sob pressão já se encontram aparentemente exauridas, foi adotado o percentual de 10% (2% ao ano) como limite de depleção. Desta forma, se obtêm o valor de 128,08 hm^3 anuais ($6.403,96 \text{ hm}^3/\text{ano} \times 0,02$) das reservas de saturação, além de 41,61 hm^3/ano referente às reservas compressíveis.

Como se trata de aquífero confinado, não se considera o coeficiente de sustentabilidade (C_s). A Tabela 24 mostra os resultados por bacia hidrográfica.

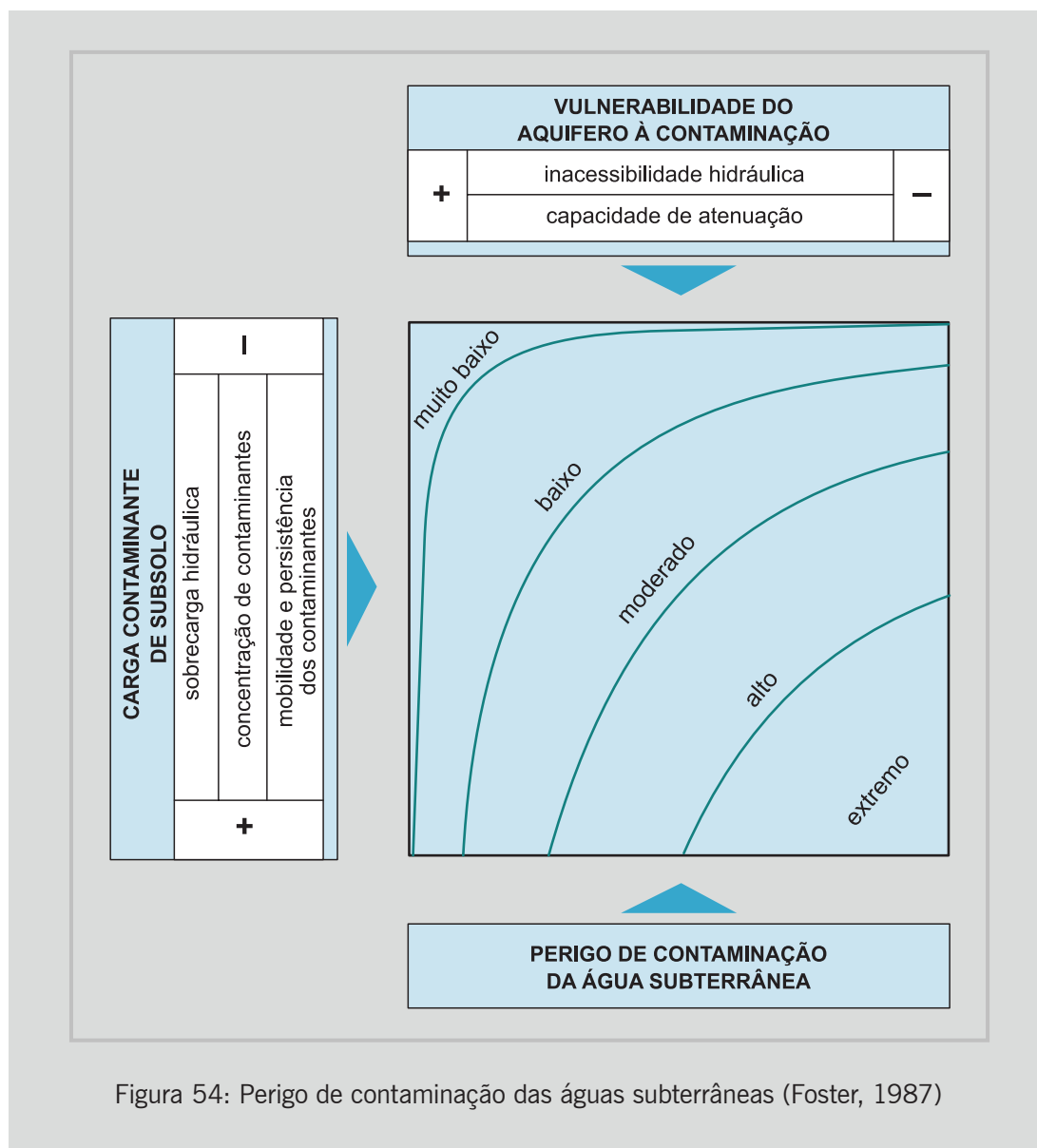
Tabela 24: Reservas explotáveis do Aquífero Itapecuru por bacia hidrográfica na Ilha de São Luís

| BACIA HIDROGRÁFICA | RESERVA DE SATURAÇÃO (hm ³) | RESERVAS EXPLOTÁVEIS (hm ³ /ano) | | RESERVA POTENCIAL EXPLOTÁVEL TOTAL (hm ³ /ano) |
|-----------------------|---|---|-------------------------|---|
| | | RESERVA DE SATURAÇÃO | RESERVA COMPRESSÍVEL | |
| Anil | 296,47 | 5,94 | 0,55 | 6,49 |
| Bacanga | 730,28 | 14,65 | 2,09 | 16,74 |
| Cachorros | 475,24 | 9,57 | 3,31 | 12,88 |
| Estiva | 284,18 | 5,71 | 1,43 | 7,14 |
| Guarapiranga | 101,99 | 2,06 | 1,06 | 3,12 |
| Ilhas | 285,68 | 5,72 | 0,5 | 6,22 |
| Inhaúma | 287,5 | 5,78 | 1,42 | 7,2 |
| Itaqui | 442,15 | 8,85 | 0,28 | 9,13 |
| Jeniparana | 466,15 | 9,43 | 5,16 | 14,59 |
| Paciência | 916,37 | 18,49 | 8,1 | 26,59 |
| Praias | 608,9 | 12,26 | 3,92 | 16,18 |
| Santo Antônio | 556,16 | 11,25 | 6,49 | 17,74 |
| Tibiri | 952,91 | 19,20 | 7,29 | 26,49 |
| TOTAL | 6.403,96 | 128,08 | 41,61 | 169,69 |

5.4. PERIGO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Para se estimar o perigo de contaminação das águas subterrâneas na Ilha do Maranhão, foi utilizado o esquema proposto por Foster (1987), que combina a vulnerabilidade natural com a carga contaminante presente, conforme esquema mostrado na Figura 54. Para condições de alta inacessibilidade hidráulica e maior capacidade de atenuação dos aquíferos, o perigo de contaminação será baixo, independente da carga contaminante sobre eles disposta. Inversamente, pequenas cargas contaminantes podem facilmente atingir os aquíferos se estes se mostrarem hidraulicamente mais acessíveis e sem camadas atenuantes do fluxo descendente acima deles.

Na natureza, os aquíferos e as águas subterrâneas se apresentam naturalmente vulneráveis às contaminações externas em maior ou menor proporção, com graus de sensibilidade que dependem exclusivamente de suas características intrínsecas, como grau de confinamento, litologia das unidades sobrepostas, e profundidade do lençol freático, entre outros aspectos. A associação dessas características define o índice de vulnerabilidade natural do aquífero, avaliado na Ilha de São Luís pelo método denominado GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table), conforme metodologia proposta por Foster & Hirata (1998). O resultado (Figura 55) evidencia a condição de alta vulnerabilidade natural dos aquíferos na Ilha de São Luís.



As cargas contaminantes foram obtidas pela classificação das fontes pontuais e difusas de poluição pelo método POSH (Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically). O potencial contaminante das fontes pontuais foi atribuído a partir do cadastro das fontes de poluição, classificadas de acordo com seu tipo e dimensão (indústrias, deposição de resíduos, postos de gasoline, cemitério, etc). O potencial contaminante das fontes difusas (Figura 56) foi atribuído a partir do mapa de uso e ocupação do solo, de acordo com a densidade populacional, do índice de cobertura de esgotos e tipo das atividades agrícola.

A partir dos valores dos índices obtidos no mapa de vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação e da avaliação das cargas contaminantes pontuais e difusas, foi elaborado o mapa de perigo de contaminação dos aquíferos, mostrado na Figura 57. Informações mais detalhadas sobre as metodologias utilizadas e os resultados podem ser consultados no Volume IV do Relatório Final.

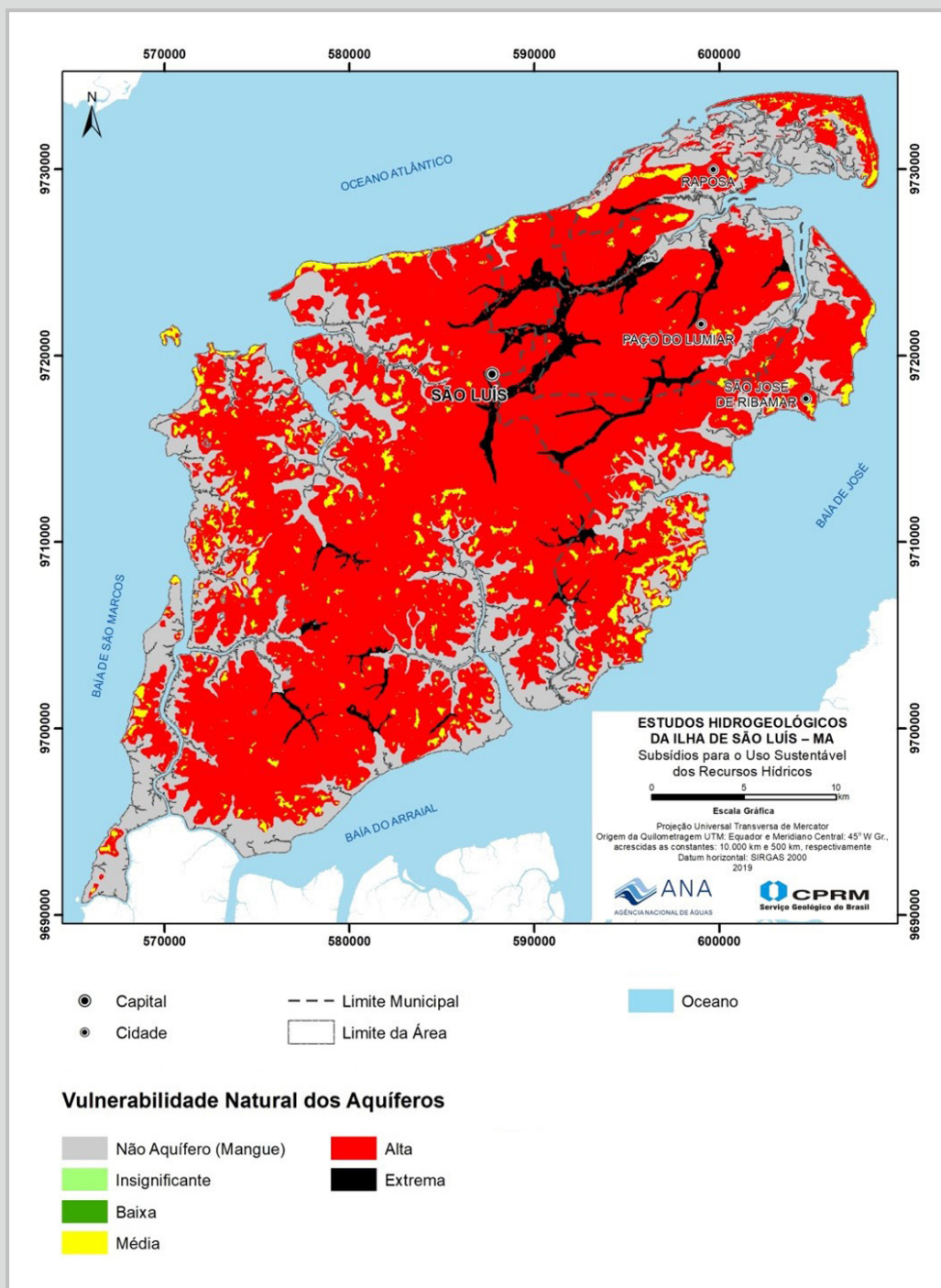


Figura 55: Mapa de Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (Método GOD)

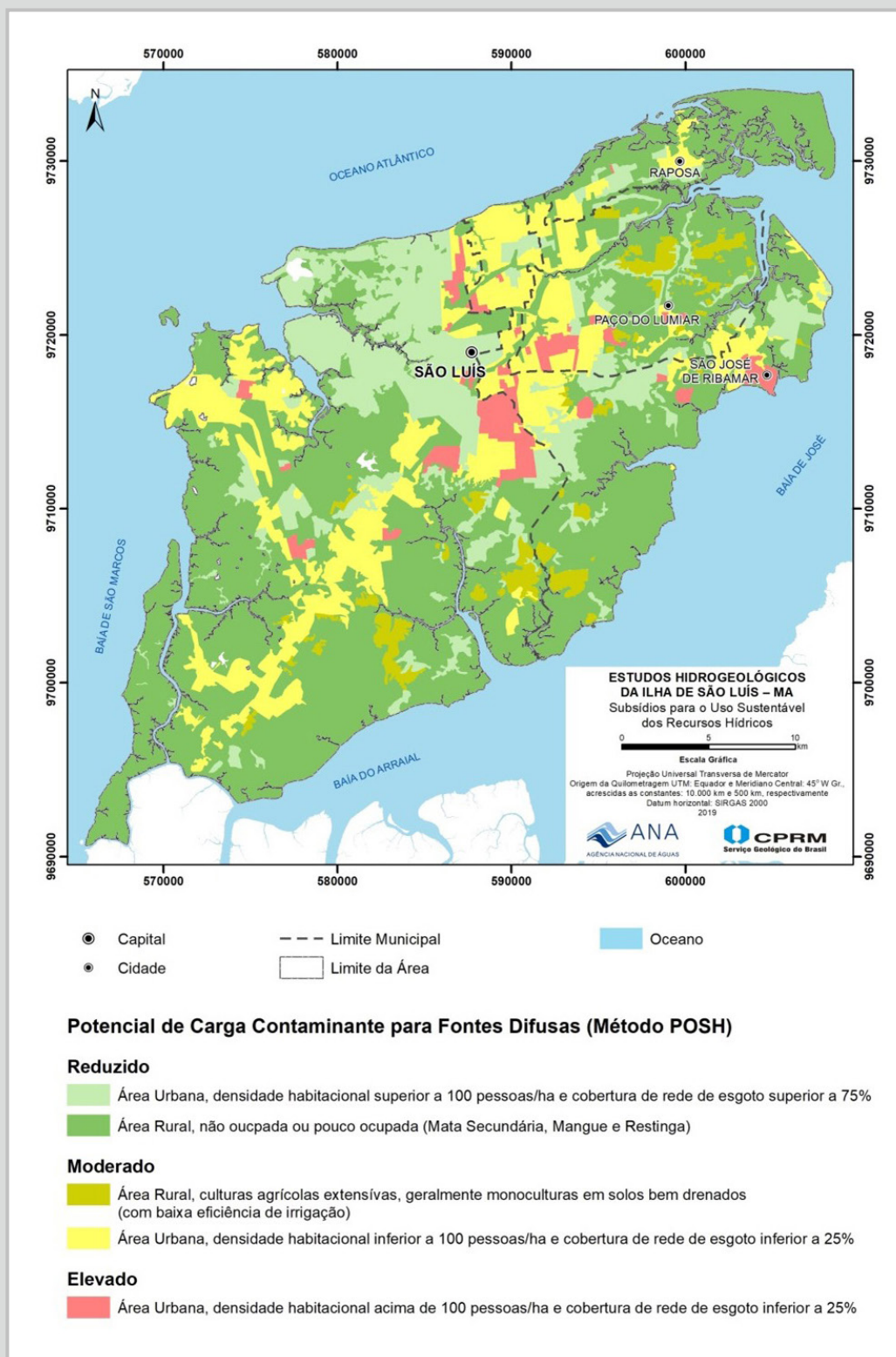


Figura 56: Mapa de Potencial de Contaminação por fontes difusas

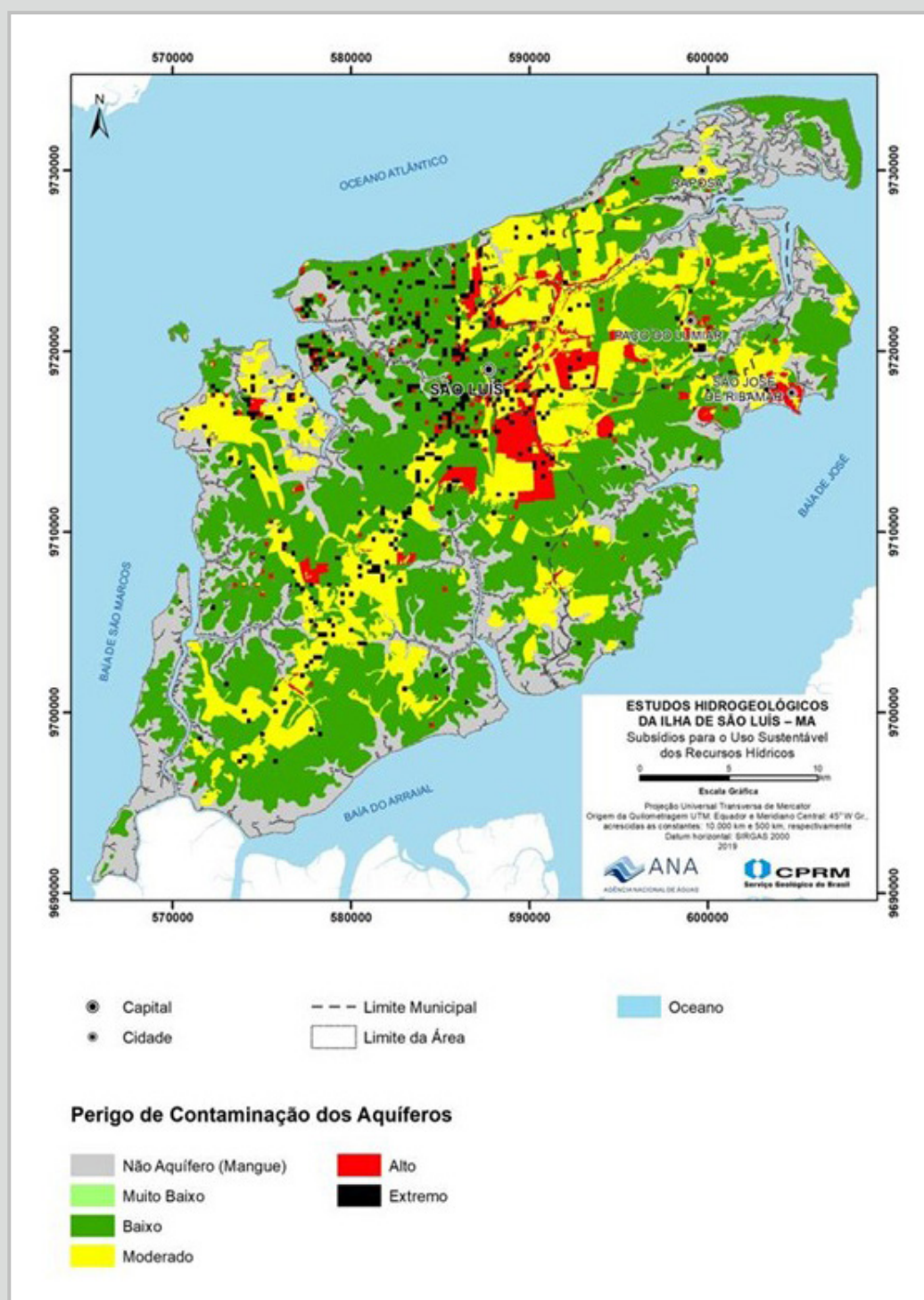


Figura 57: Perigo de contaminação dos aquíferos na Ilha do Maranhão

5.5. RISCOS DE INTRUSÕES SALINAS

A intrusão de águas salinas do mar nos aquíferos costeiros, se constitui em uma das ocorrências mais danosas que podem afetar a qualidade das águas subterrâneas. Na Ilha de São Luís, coberta por extensos manguezais salinos, sujeita a marés de grande amplitude e com intensa exploração de águas subterrâneas este risco é onipresente.

Para avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha na Ilha de São Luís, foi aplicado o método GALDIT (CHACHADI & LOBO FERREIRA, 2001, 2007), cujo acrônimo é mostrado a seguir:

- G** – Groundwater occurrence - Aquifer type: unconfined, confined and leaky confined. Relaciona-se com o tipo de ocorrência das águas subterrâneas.
- A** – Aquifer hydraulic conductivity (condutividade hidráulica);
- L** – Depth to groundwater Level above the sea (profundidade da água subterrânea acima do nível do mar);
- D** – Distance from the shore (distância à linha de costa);
- I** – Impact status of existing seawater intrusion (Impacto de intrusão marinha já existente);
- T** – Thickness of the aquifer (espessura do aquífero).

Esses parâmetros possuem índices entre 2,5 e 10, crescentes proporcionalmente ao grau de vulnerabilidade à intrusão marinha (Tabela 25). São também utilizados coeficientes de ponderação (pesos) com valores entre 1 e 4, de acordo com a influência de cada parâmetro na vulnerabilidade.

Tabela 25: Parâmetros, intervalos e índices do método GALDIT (Chachadi & Lobo Ferreira)

| PARÂMETRO OBSERVADO | | INTERVALO | | ÍNDICE | PESO |
|---------------------|---|----------------|------------|--------|----------|
| G | Forma de ocorrência dos aquíferos | Confinado | | 10 | 1 |
| | | Livre | | 7.5 | |
| | | Semiconfinado | | 5 | |
| | | Limitado | | 2.5 | |
| A | Condutividade hidráulica (m/dia) | Elevada | > 40 | 10 | 3 |
| | | Média | 10 a 40 | 7.5 | |
| | | Baixa | 5 a 10 | 5 | |
| | | Muito baixa | < 5 | 2.5 | |
| L | Nível da água acima do nível do mar (m) | Elevada | < 1 | 10 | 4 |
| | | Média | 1 a 1.5 | 7.5 | |
| | | Baixa | 1.5 a 2 | 5 | |
| | | Muito baixa | > 2 | 2.5 | |
| D | Distância à linha de costa (m) | Muito perto | < 500 | 10 | 4 |
| | | Perto | 500 a 750 | 7.5 | |
| | | Meia distância | 750 a 1000 | 5 | |
| | | Longe | > 1000 | 2.5 | |

continua

Tabela 25: Parâmetros, intervalos e índices do método GALDIT (Chachadi & Lobo Ferreira) (continuação)

| | PARÂMETRO OBSERVADO | INTERVALO | | ÍNDICE | PESO |
|---|---|---------------|----------|--------|------|
| I | Impacto atual intrusão ($\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$) | Alta | >2 | 10 | 1 |
| | | Média | 1.5 a 2 | 7.5 | |
| | | Baixa | 1 a 1.5 | 5 | |
| | | Moderada | < 1 | 2.5 | |
| T | Espessura do aquífero (m) | Grande | >10 | 10 | 2 |
| | | Média | 7.5 a 10 | 7.5 | |
| | | Pequena | 5 a 7.5 | 5 | |
| | | Muito pequena | <5 | 2.5 | |

O índice GALDIT é calculado utilizando a equação abaixo (CHACHADI & LOBO FERREIRA, 2007).

$$\text{Índice GALDIT} = (1 \cdot G + 3 \cdot A + 4 \cdot L + 4 \cdot D + 1 \cdot I + 2 \cdot T) / 15 \quad (1)$$

O mapa de vulnerabilidade à salinização dos aquíferos da Ilha é apresentado na Figura 58, tanto para as unidades aflorantes, quanto para aquelas confinadas/semiconfinadas, representadas pelo aquífero Itapecuru.

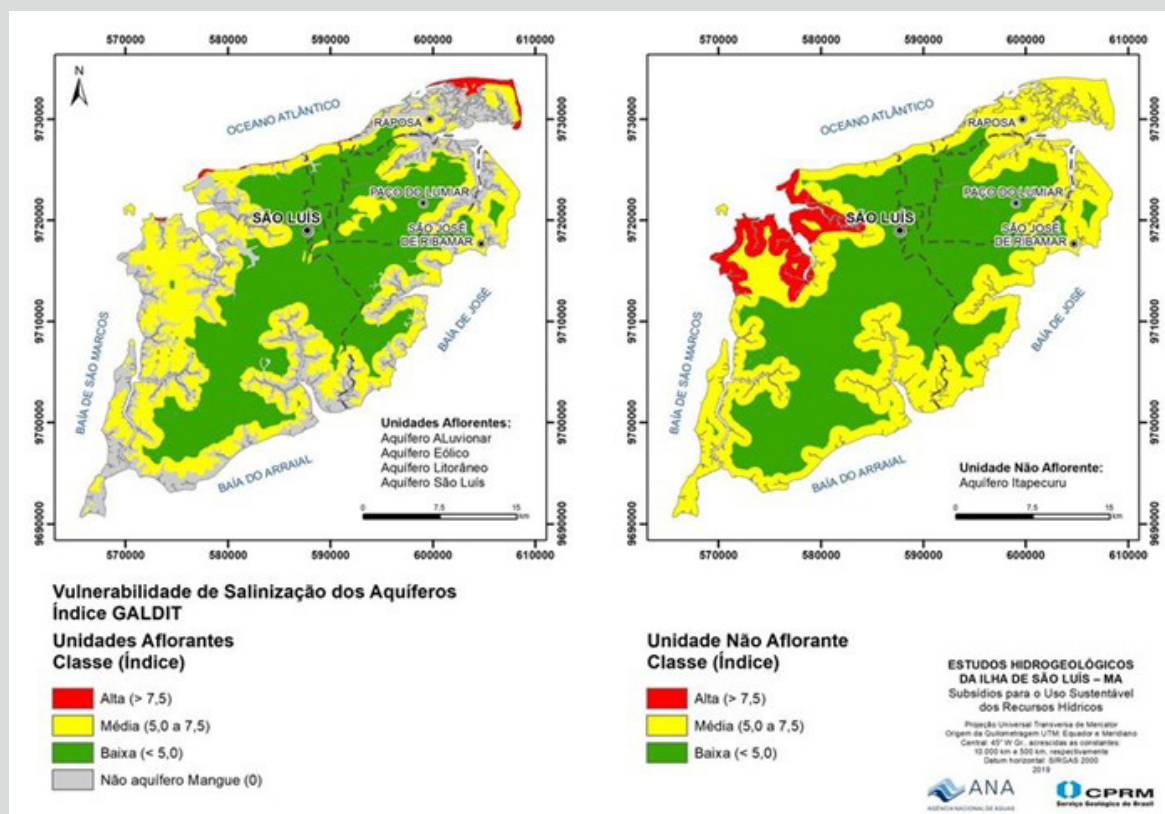


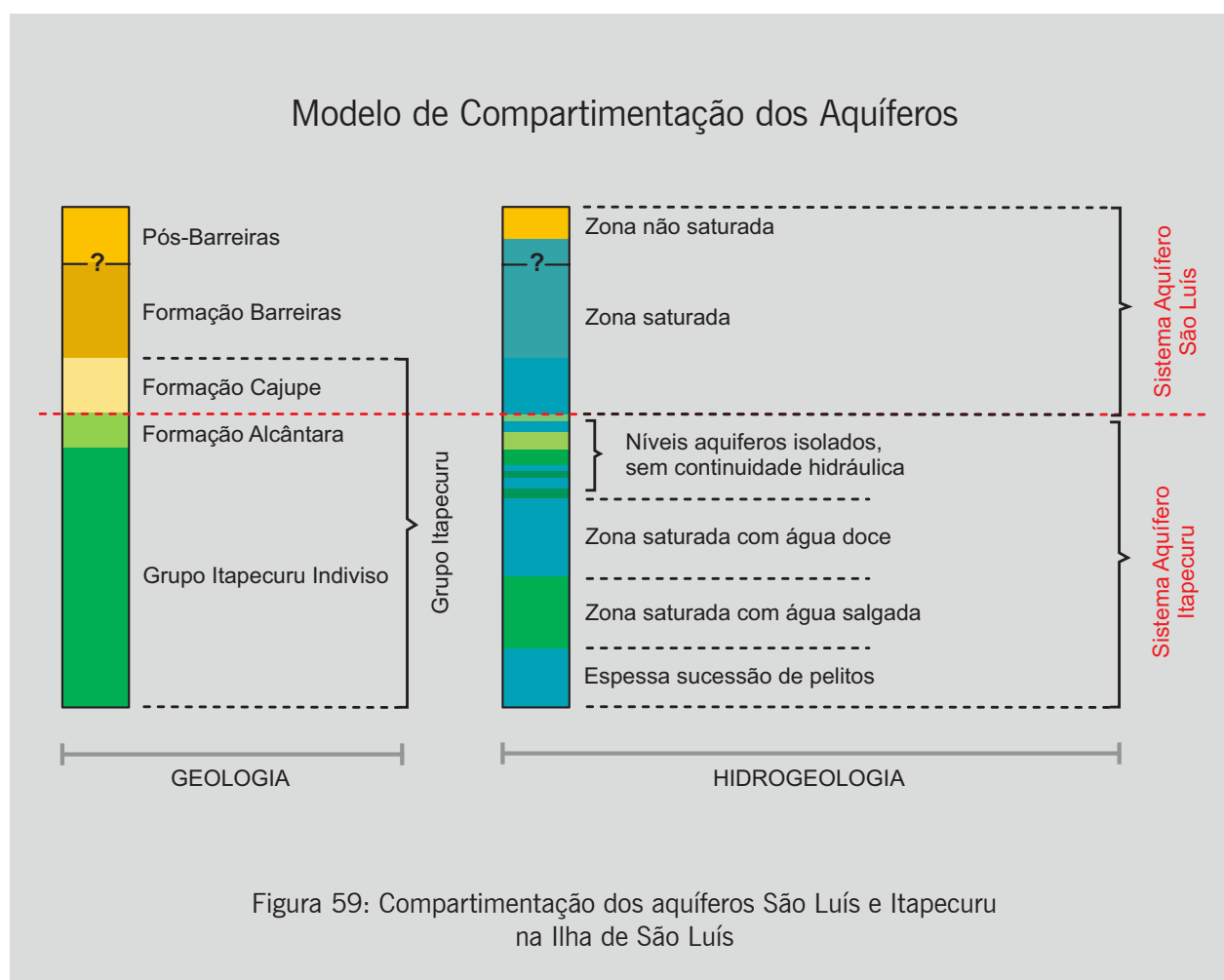
Figura 58: Mapa de vulnerabilidade a salinização dos aquíferos da Ilha de São Luís – MA. Aquíferos aflorantes (esquerda) e não aflorantes (direita)



5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO

Os Sistemas Aquíferos Itapecuru e São Luís, principais unidades hidrogeológicas da Ilha se apresentam segundo o Modelo de Compartimentação apresentado na Figura 59 (correlação entre as unidades geológicas e seu agrupamento por sistemas aquíferos). As espessuras do São Luís são variáveis (Figura 60), limitadas em profundidade pela ocorrência das camadas argilosas e calcíferas da Formação Cajupe, enquanto se considera que o Itapecuru limita-se à profundidade de 100 m abaixo do nível do mar devido à salinização de suas águas a profundidades maiores.

Águas salinizadas ocorrem no aquífero São Luís de maneira localizada, oriundas principalmente de infiltrações a partir dos extensos depósitos de mangues pré-existent, geralmente extraídas por meio de poços construídos inadequadamente. Já no aquífero Itapecuru, a salinidade está presente em alguns poços tubulares de maior profundidade. Essa situação é evidenciada na região do Bacanga, aonde ocorrem poços salinizados em profundidades de 112 a 164 metros (Figura 61), sendo a profundidade da interface entre água doce e água salgada crescente da zona litorânea para o interior da Ilha, em cotas que variam de 80 a 125 metros abaixo do nível do mar.



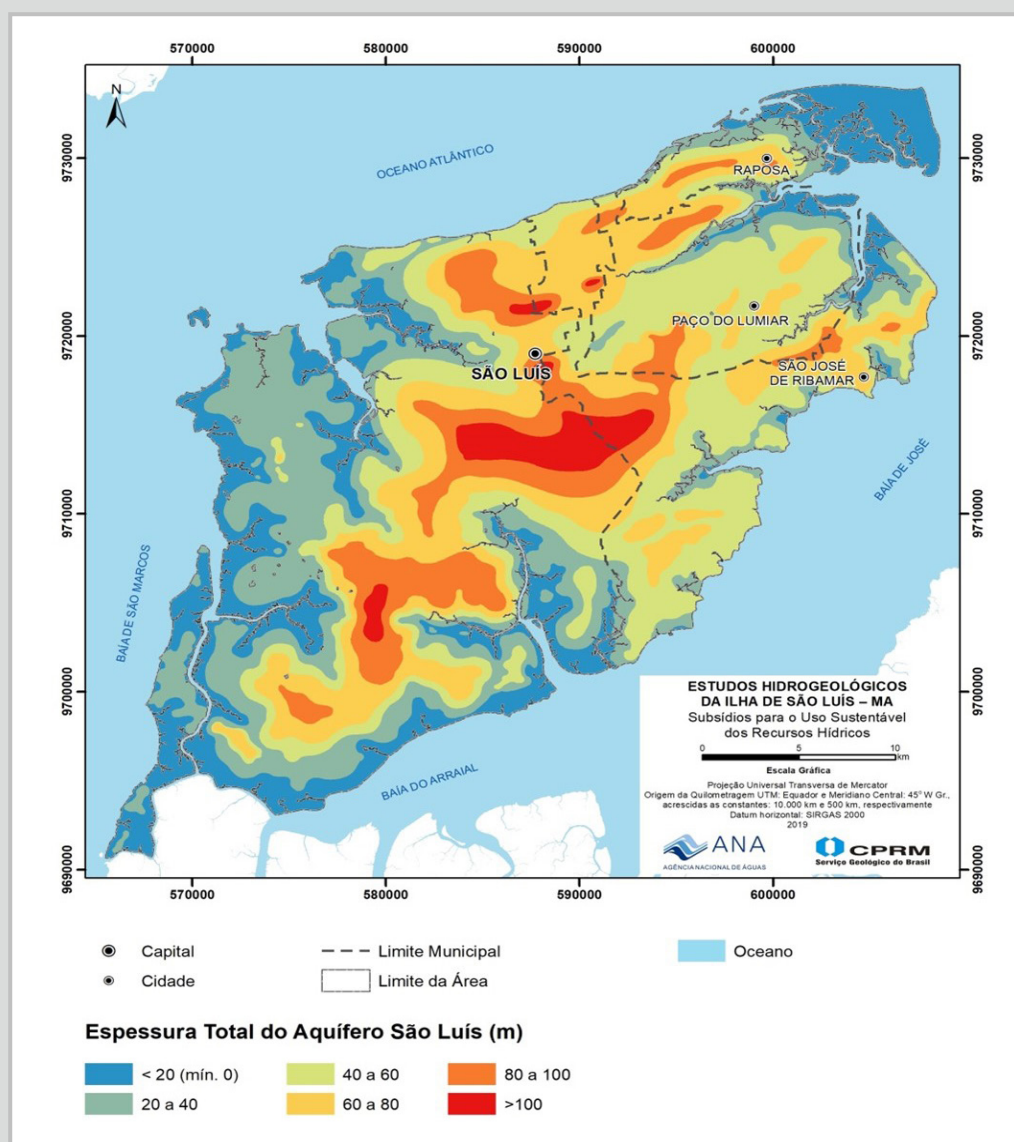


Figura 60: Mapa de Espessuras do Aquífero São Luís

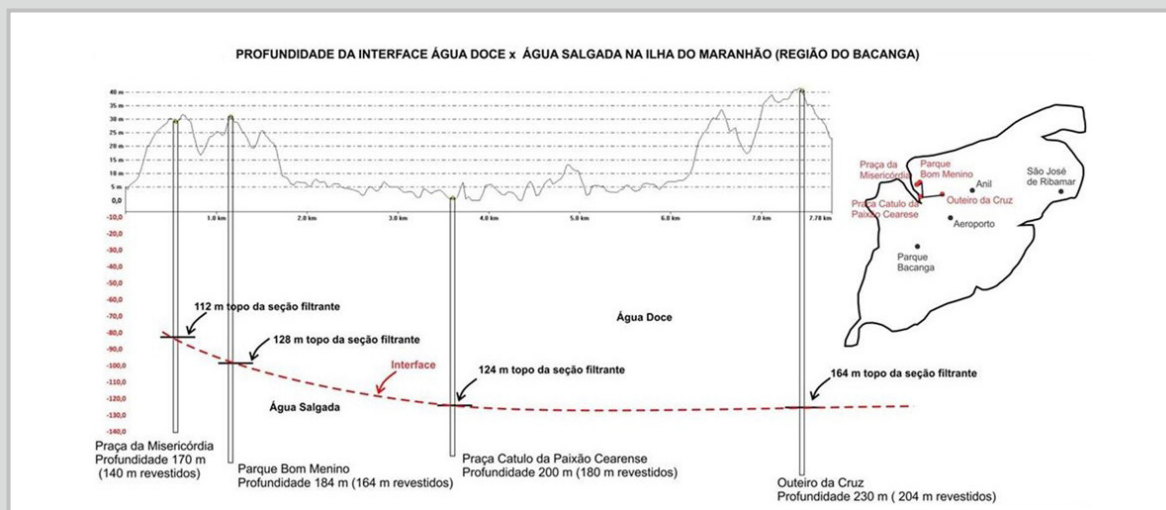


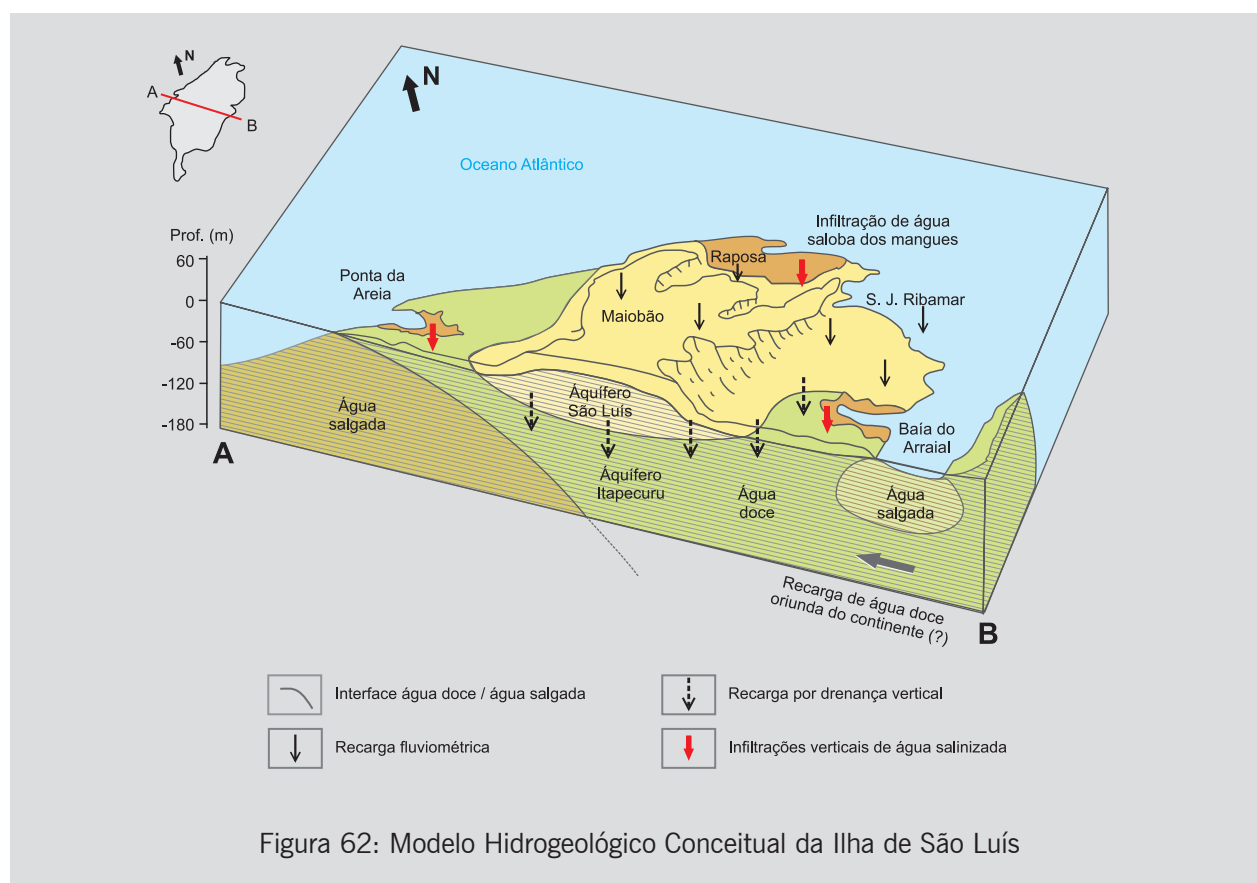
Figura 61: Profundidade da interface água doce x água salgada na Ilha do Maranhão



O fluxo subterrâneo nos aquíferos São Luís e Itapecuru se dá de forma compartilhada, movendo-se de acordo com as cargas hidráulicas locais, ocorrendo principalmente do Aquífero São Luís para o Itapecuru, embora, como já citado e em menor escala, também de forma ascendente, do Itapecuru para o São Luís.

As recargas do Aquífero São Luís são originadas das precipitações pluviométricas e as do aquífero Itapecuru através de drenanças verticais a partir do São Luís. Localmente, devido à forte estruturação da Ilha, pode ocorrer a recarga direta do aquífero Itapecuru através das inúmeras falhas e fraturas existentes.

A Figura 62 mostra, de forma simplificada, o Modelo Hidrogeológico Conceitual da área.



5.6.1. Modelo Hidrogeológico Numérico

Um modelo é uma ferramenta utilizada para representar simplificada uma situação real. Os modelos matemáticos simulam o fluxo da água subterrânea indiretamente por meio de equações que representam os processos físicos que ocorrem no sistema (ANDERSON & WOESSNER, 1992).

No modelo hidrogeológico numérico utilizado, foram representadas as duas unidades hidrogeológicas principais, o Sistema Aquífero São Luís e o Aquífero Itapecuru. O nível atual do conhecimento sobre o Aquífero Itapecuru, contudo, não permitiu a calibração do modelo para esta unidade, sendo os resultados obtidos válidos apenas para o Aquífero São Luís.

Os principais objetivos da modelagem numérica foram:

- Sintetizar as informações conceituais e melhorar a compreensão sobre o sistema hidrogeológico da Ilha de São Luís;
- Confirmar ou reavaliar pontos específicos do modelo conceitual;
- Colaborar com a elaboração do plano de monitoramento hidrológico/hidrogeológico quali-quantitativo;
- Simular cenários futuros de interesse para o estudo.

Foi utilizado o software “Visual MODFLOW Flex” na versão 4.1.0 da empresa WATERLOO HYDROGEOLOGIC, sendo este atualmente o pacote computacional mais difundido para modelagem de fluxo de água subterrânea.

A montagem do modelo numérico envolveu a definição dos limites físicos e do *grid* do modelo, a determinação das condições de contorno, a distribuição das unidades hidrogeológicas e das respectivas propriedades hidrodinâmicas e a inserção dos poços de bombeamento e de observação.

O modelo foi calibrado em regime transiente utilizando as cargas hidráulicas medidas em campo nas duas campanhas realizadas.

Após a calibração do modelo, foram simulados diversos cenários futuros, conforme a seguir:

- Cenário 1 – Continuidade do bombeamento nas mesmas condições atuais nos anos de 2028, 2038 e 2050;
- Cenário 2 – Aumento do consumo devido ao crescimento populacional até 2050;
- Cenário 3 – Redução da recarga devido à redução da pluviometria, dos vazamentos de redes de distribuição de água ou coletora de esgotos em 20% a partir de 2016;
- Cenário 4 – Redução de 50% do bombeamento atual dos poços devido à construção da nova adutora de águas superficiais a partir do continente.

Os resultados estão apresentados nas Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66. Todos os cenários mostraram rebaixamentos progressivos das cargas hidráulicas do aquífero na região com maior extração de águas subterrâneas, sendo mais expressivos no cenário de redução da recarga. No cenário de redução do consumo, houve a diminuição dos rebaixamentos em cerca de 10 m quando comparado com o cenário de continuidade da situação atual. Tal prognóstico alerta para a importância de monitorar as águas subterrâneas na ilha, a fim de acompanhar a evolução de seus níveis.

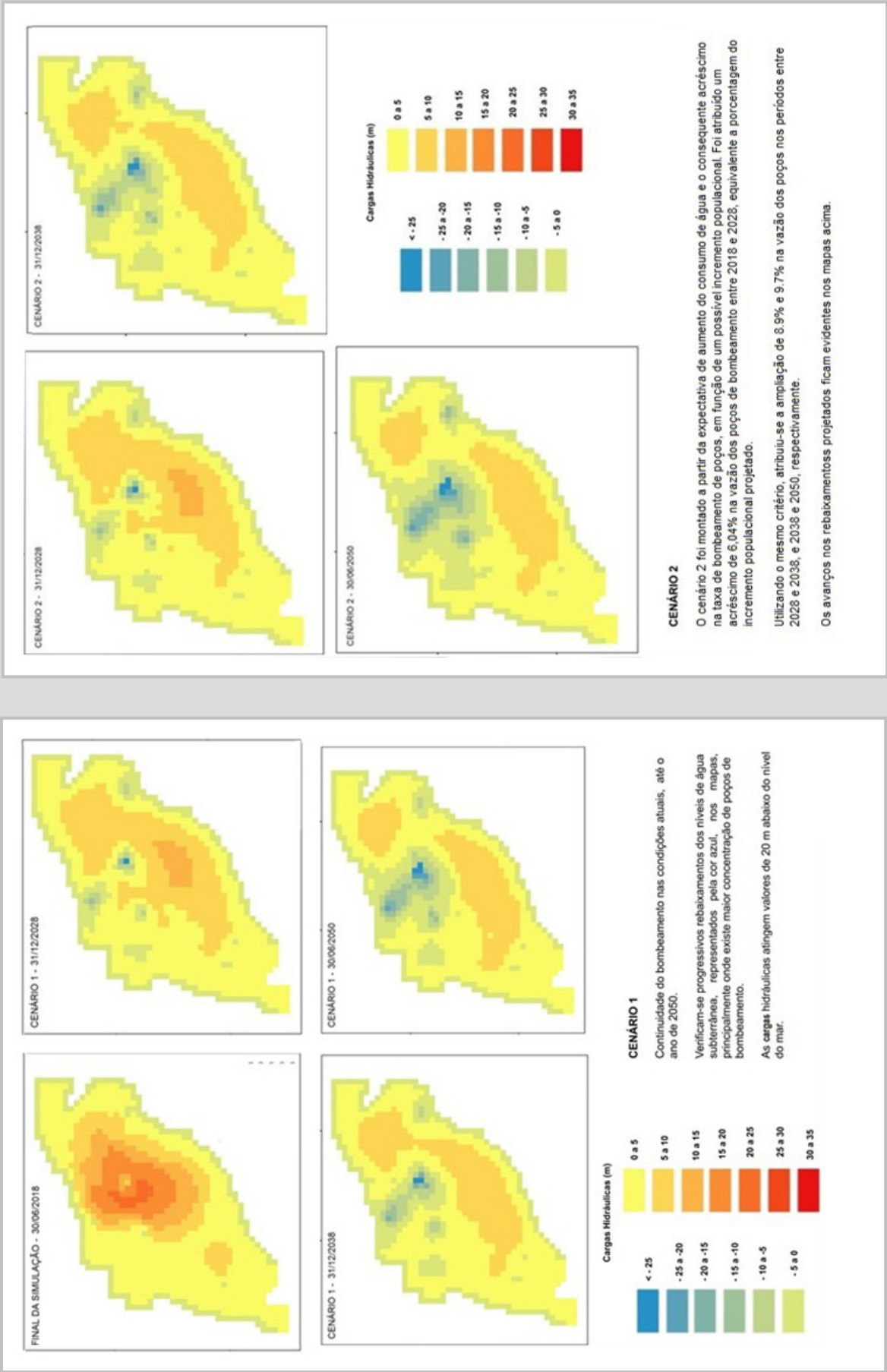
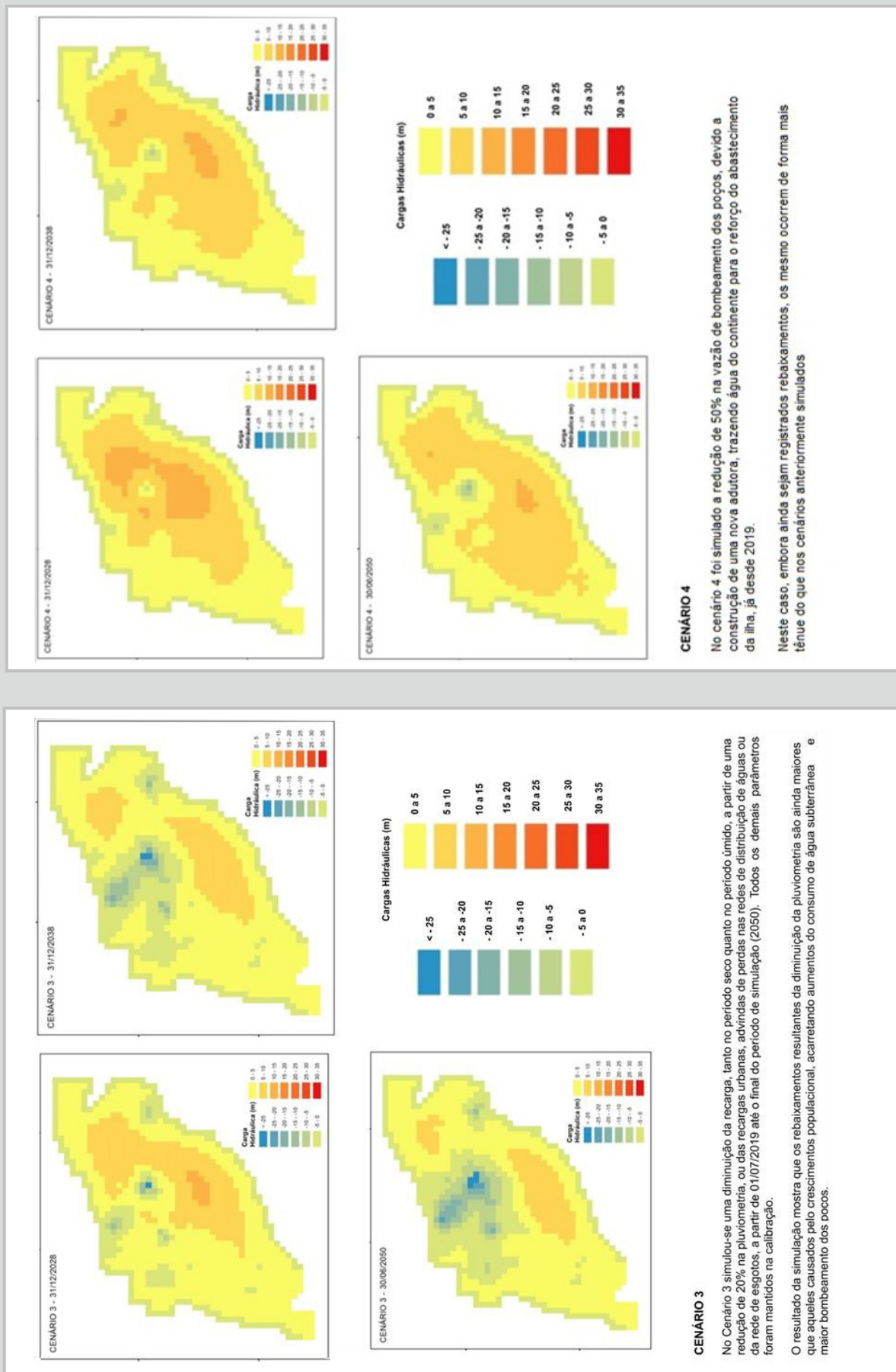


Figura 64: Cenário 2 de simulação - Acréscimo no uso da água subterrânea devido ao aumento populacional

Figura 63: Cenário 1 de simulação - Manutenção do bombeamento nas condições atuais até 2050



CENÁRIO 4 - 31/12/2028

CENÁRIO 4 - 30/06/2050

Cargas Hidráulicas (m)

| |
|---------|
| 0 a 5 |
| 5 a 10 |
| 10 a 15 |
| 15 a 20 |
| 20 a 25 |
| 25 a 30 |
| 30 a 35 |

| |
|-----------|
| < -25 |
| -25 a -20 |
| -20 a -15 |
| -15 a -10 |
| -10 a -5 |
| -5 a 0 |

Figura 65: Cenário 3 de simulação - Diminuição da recarga de água subterrânea

Figura 66: Cenário 4 de simulação - Diminuição da exploração das águas subterrâneas

6.1. ASPECTOS LEGAIS

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída por meio da Lei nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997, estabelece em seu artigo 5º os instrumentos que compõem as ações para gestão dos recursos hídricos no território brasileiro, como os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes segundo os usos preponderantes da água, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, tendo na Agência Nacional de Águas – ANA, criada pela Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, a entidade federal responsável por sua implementação.

Considerando a dominialidade dos Estados sobre as águas subterrâneas em seus territórios (Artigo 26 da Constituição da República do Brasil), essas entidades federativas criaram legislações próprias para sua gestão. O Estado do Maranhão possuía, até o ano de 2019, legislação bastante avançada sobre as águas subterrâneas: o Decreto nº 28.008, de 30 de janeiro de 2012, que regulamentava a Política Estadual dos Recursos Hídricos (Lei nº 8.149/2004) no que se refere ao tema. Trazia definições como:

- Estabelecimento de critérios para delimitação de polígonos de proteção de poços e aquíferos, áreas de restrição e controle;
- Estabelecimento de diretrizes para o estabelecimento de um programa permanente de conservação e preservação das águas subterrâneas;
- Previsão de implantação de redes de monitoramento qualiquantitativo e de planejamento para o aproveitamento racional das águas subterrâneas;

Em 2019, por meio do Decreto nº 34.847, de 14 de maio de 2019, este Decreto foi revogado acarretando na perda da única normativa específica sobre as águas subterrâneas. Embora o novo Decreto mencione águas subterrâneas, o faz de forma mais genérica, sem considerar todos os dispositivos legais anteriores. Apesar disto, regulamentou a Lei nº 8.149, de 15 de junho de 2004, especialmente no que tange ao Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos - SEIRH, ao Cadastro Estadual de Usuários de Recursos Hídricos e à Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos, determinando que o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos do Estado do Maranhão - SIRH/MA deve ser compatível com o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH da Agência Nacional de Águas - ANA, com o Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos - CNARH, e demais sistemas designados pelo Órgão Gestor.



Embora as águas subterrâneas sejam de dominialidade do Estado, todos os municípios da Ilha abordam questões relativas a elas, em maior ou menor grau. Destaca-se o Plano Diretor da Cidade de São Luís (Lei nº 4669/2006), que reconhecia como áreas de recarga de aquíferos, indispensáveis à manutenção dos recursos hídricos do município, as superfícies planas formadas por sedimentos arenosos em cotas altimétricas de 40 a 60 metros.

Apesar de bastante citadas nas leis estaduais e municipais, o uso e exploração das águas subterrâneas na Ilha de São Luís, segue um ciclo vicioso na sua gestão (TUINHOF *et al.* (2006), com a exploração procurando simplesmente atender a demanda, de forma descontrolada (Figura 67, condição A).

Para transformar este círculo vicioso em um círculo virtuoso (Figura 67, condição B), é essencial reconhecer que a gestão da água subterrânea implica em trabalhar com pessoas (usuários do solo e da água) e com os reservatórios de água (os aquíferos). Em outras palavras, a dimensão socioeconômica (gestão da demanda) é tão importante quanto à dimensão hidrogeológica (gestão da oferta) e as duas precisam estar sempre integradas.

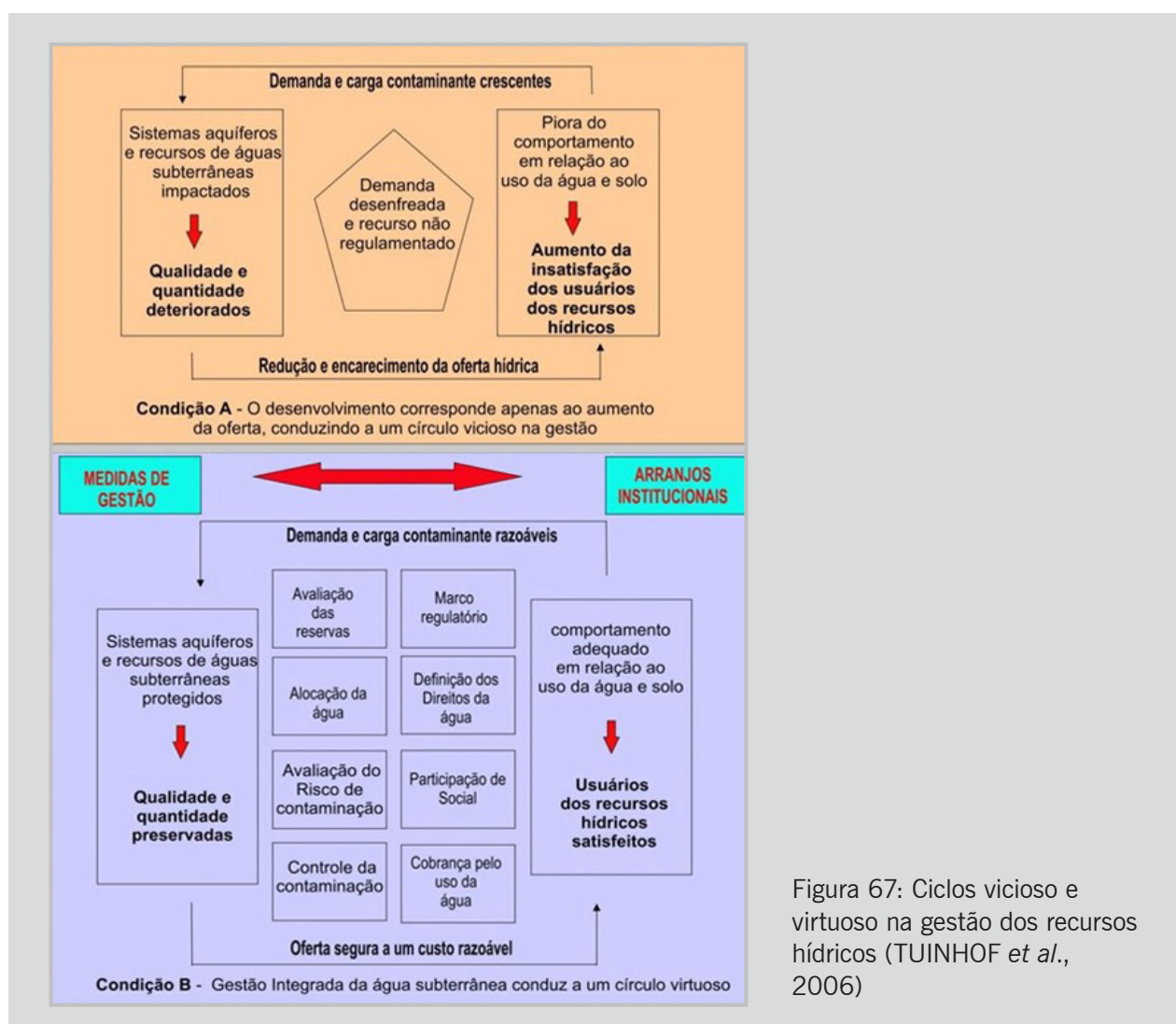


Figura 67: Ciclos vicioso e virtuoso na gestão dos recursos hídricos (TUINHOF *et al.*, 2006)



Na Ilha do Maranhão, a gestão integrada dos recursos hídricos assume particular importância e se torna imperativa, haja vista a escassez de recursos de águas superficiais, provocando sua importação desde o continente e originando grande dependência das águas subterrâneas. Registra-se na região uma contínua luta para atender à multiplicidade das demandas, podendo se constituir em grave empecilho ao desenvolvimento socioeconômico.

No presente estudo, embora tenha se procurado analisar conjuntamente a recarga de águas subterrâneas e o fluxo de base de rios, visando evitar distorções que pudessem provocar erros no cálculo da disponibilidade hídrica total e na conceituação da gestão integrada, isto se mostrou frequentemente inviável, devido à ausência de monitoramento hidrológico nos rios.

Desta forma, se propõe um Programa de Ações Estratégicas – PAE, na temática dos recursos hídricos da Ilha, considerando todas as alternativas existentes, com vistas a mitigar os principais problemas de gestão hoje detectados, relacionados a seguir (Figura 68):

- i. Ausência de gestão da informação, a partir da inexistência de sistemas que possibilitem à planificação e o gerenciamento dos recursos hídricos em tempo real, considerando os aspectos quantitativos e qualitativos, bem como o estabelecimento de mecanismos de suporte a decisão baseados em sistemas de monitoramento e alerta;
- ii. Manejo ineficiente dos recursos hídricos, sem considerar as bacias hidrográficas como unidade de gestão, e sem integração com o ordenamento territorial, desconsiderando os reflexos que a implantação e operação de obras de captação produzem no meio ambiente;
- iii. Baixo nível de investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para solução de problemas críticos;
- iv. Baixo nível de educação ambiental sobre os recursos hídricos, seus usos e preservação insuficiente.



Figura 68: Programa de Ações Estratégicas – PAE da Ilha de São Luís
(As legendas grafadas em azul, mostram as relações entre as áreas estratégicas e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS, estabelecidos pela Organização das Nações Unidas - ONU)

6.1.1. Área Estratégica I - Gestão da Informação

Inclui a criação e manutenção de sistemas de informações sobre recursos hídricos, na forma de implementação de banco de dados, implantação de redes de monitoramento hidrológico e hidrogeológico, e a criação de sistemas de apoio à decisão, de forma a permitir ou mesmo facilitar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos locais.

O banco de dados no formato *filegeodatabase* produzido neste projeto, por suas características de permitir atualizações sempre que necessárias e englobar todos os aspectos relacionados à gestão dos recursos hídricos locais deve ser adotado e tomado como ponto de partida. Se propõe o treinamento das equipes técnicas envolvidas, no uso do software ArcGis, ou QGIS (software livre), definindo as competências para alimentação e consulta, repartida entre a SEMA e os órgãos municipais de meio ambiente.

Envolve a elaboração, atualização, detalhamento, correção ou melhoria das bases de dados e informações, desde aquelas gerais, como bases cartográficas, ou temáticas, como geologia, pedologia, uso e ocupação do solo até aquelas diretamente ligadas à temática de águas subterrâneas como aquíferos, poços, outorgas, qualidade das águas subterrâneas etc.

É importante que este banco de dados seja incorporado na estrutura do Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado do Maranhão (SIRH/MA) e continue a ser alimentado após o encerramento do projeto.

É urgente e imprescindível a implantação do monitoramento hidrológico integrado (abrangendo águas superficiais e subterrâneas), com a finalidade de prover informações sobre a quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas existentes, bem como sua dinâmica em relação às variações sazonais e efeitos antrópicos.

Neste sentido, se propõe a implantação de uma rede automática de monitoramento qualiquantitativo, composta, inicialmente, por 12 (doze) poços para o acompanhamento sistemático e permanente dos níveis e da qualidade das águas subterrâneas.

Considerando que no decorrer deste estudo foram implantados 04 poços de observação, todos eles incorporados à Rede Nacional Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas - RI-MAS, sugerimos a complementação da rede de monitoramento da Ilha de São Luís com pelo menos mais 08 poços, captando igualmente os dois principais aquíferos ocorrentes, conforme mostrado na Figura 69 e na Tabela 26.

A seleção de poços ora propostos para integrar esta rede, levou em consideração o cadastramento de poços realizado, os 100 poços tubulares que foram utilizados na rede de amostragem desse estudo e considerando as áreas mais apropriadas para medições sistemáticas, por apresentar indícios de exploração intensiva, áreas contaminadas, salinizações, etc.

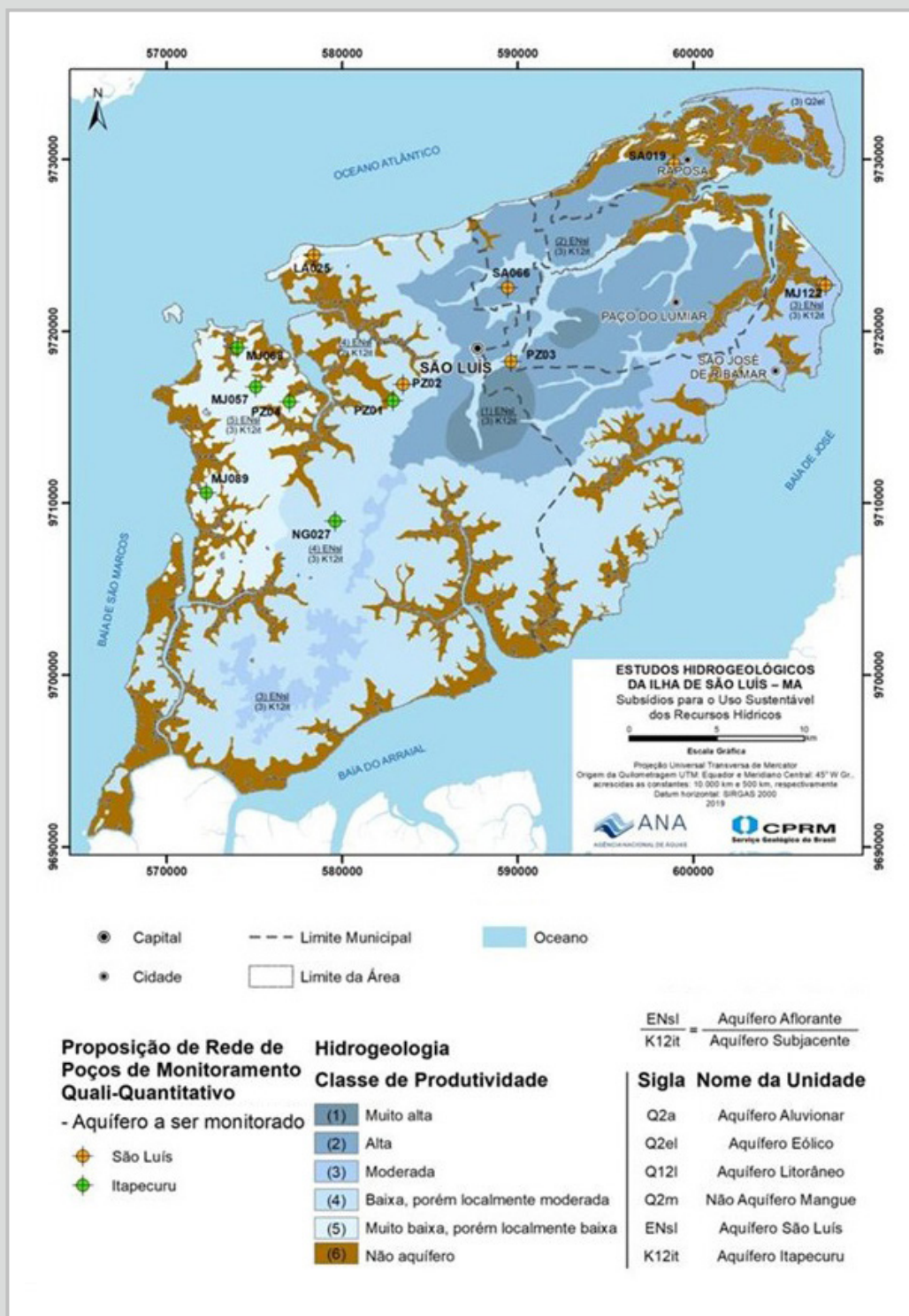


Figura 69: Proposta de implantação de rede de monitoramento piezométrico na Ilha de São Luís

Tabela 26: Detalhamento dos poços propostos para a rede de monitoramento

| CÓDIGO | LAT. E | LONG. N | AQUÍFERO | PROPRIETÁRIO | MUNICÍPIO | LOCALIDADE | PROF. (m) |
|--------|-----------|------------|-----------|------------------------------|---------------|--|--------------|
| SA019 | 598921 | 9729712 | São Luís | SAAE | Raposa | Vila Nova | 77 |
| SA066 | 589437 | 9722525 | São Luís | BRK Ambiental | S. J. Ribamar | Alto do Turu II | 84 |
| MJ122 | 607557 | 9722676 | São Luís | BRK Ambiental | S. J. Ribamar | Panaquatira | 46 |
| LA025 | 578389 | 9724440 | São Luís | Condomínio Ponta do Farol | São Luís | Ponta do Farol | 20,6 |
| PZ02 | 583457 | 9716905 | São Luís | CPRM | São Luís | Parque Estadual do Bacanga - Sacavém | 75 |
| PZ03 | 589626 | 9718242 | São Luís | CPRM | São Luís | Estação Elevatória Paciência II | 76 |
| NG027 | 579598 | 9708955 | Itapecuru | Associação Moradores | São Luís | Maracanã | 132 |
| MJ057 | 575079 | 9716751 | Itapecuru | CAEMA | São Luís | Alto da Vitória | 150 |
| MJ068 | 574038 | 9719041 | Itapecuru | CAEMA | São Luís | Vila Mauro Fecury I | 100 |
| MJ089 | 572260 | 9710605 | Itapecuru | CAEMA | São Luís | Cajueiro | 80 |
| PZ04 | 577012 | 9715876 | Itapecuru | CPRM | São Luís | Vila Embratel | 120 |
| PZ01 | 582893 | 9715941 | Itapecuru | CPRM | São Luís | Sacavém- Bacanga | 130 |

O monitoramento das águas superficiais é também de fundamental importância. Recomenda-se que seja feita a modelagem hidráulica dos cursos d'água sob a influência de marés a fim de quantificar o seu alcance dentro da Ilha e modelar o transporte de contaminantes. Sugere-se a recuperação das RNs implantadas neste estudo, preservando as informações levantadas em 2016 e 2017, conforme mostrado na Tabela 27.

A implantação de sistemas de apoio à decisão, direciona-se ao planejamento estratégico e à solução de problemas organizacionais rotineiros, auxiliando no gerenciamento dos dados. Constitui-se em um sistema de gerenciamento, visando um trabalho mais eficiente, a redução dos custos operacionais e a otimização da operação do sistema ao longo do tempo.

Para sua efetivação se faz necessário a implantação de infraestrutura computacional que, por meio do uso de informações processadas em modelos matemáticos especializados, apoiem decisões durante o processo de planejamento e gerenciamento.

Neste sentido, a implantação de um banco de dados do Estado, permanentemente atualizado, juntamente com a alimentação dos bancos de dados da ANA (CNARH) e da CPRM (SIAGAS), se reveste de grande importância.

Tabela 27: Características das seções medidoras da Ilha do Maranhão

| SEÇÃO | CURSO D'ÁGUA | LAT. | LONG | AD (km²) |
|--------|---------------|-----------|------------|----------|
| SM1 | Bacanga | -2,5658S | -4,2844W | 65,4 |
| SM2 | Anil | -2,5363 S | -44,2626W | 17 |
| SM3 | Paciência | -2,4705 S | -44,1191W | 104 |
| SM4 | Santo Antonio | -2,5188 S | -44,0651W | 67,7 |
| SM5 | Jeniparana | -2,6073 S | -44,1432W | 25,2 |
| SM6 | Tijiba | -2,6710 S | -44,1757W | 15,3 |
| SM7 | Tibiri | -2,6359 S | -44,2188W | 38,7 |
| SM9 | Cachorros | -2,6668 S | -44,2844W | 21,1 |
| SM13 | Maracanã | -2,6252 S | -44,2939 W | - |
| SM14 | Itapiracó | -2,5190 S | -44,1784W | - |
| SM15-1 | São João | -2,5592 S | -44,1379 W | - |
| SM15-2 | São João | -2,5533 S | -44,1348 W | - |

AD = Área de drenagem

6.1.2. Área Estratégica II - Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos

Vinculada diretamente aos objetivos específicos deste projeto, é composta por duas componentes principais: os planos de recursos hídricos articulados com o manejo de bacias hidrográficas e o ordenamento territorial.

Parte do princípio de se considerar a bacia hidrográfica como unidade ambiental de planejamento, uma vez que, ao se gerenciar a água, se gerencia também, ainda que indiretamente, diversos processos ambientais e o planejamento do espaço territorial. Seus principais componentes são mostrados na Tabela 28.

Embora a área estratégica englobe vários instrumentos de planejamento com significados diferentes, estes apresentam analogias e demandam integração, visto estarem ligados ao território de uma mesma bacia hidrográfica.

Dentre suas ações se destacam a definição e implantação das áreas de proteção de aquíferos e perímetros de proteção de poços, abrangendo fatores de qualidade, disponibilidade e dependência da população em relação a estes.

O cruzamento de diversos temas analisados neste estudo, como a comparação entre áreas de recarga e de uso e ocupação do solo, mostra que várias regiões da Ilha se sobressaem como mais favoráveis à infiltração profunda, como as áreas de mata preservadas, as zonas dos tabuleiros e os parques estaduais, APA's e estações ecológicas, além da região dos tabuleiros elevados, com remanescentes de matas secundárias, que são de fundamental importância para proteção dos aquíferos, visto reunirem características ambientais favoráveis à infiltração de água de precipitações atmosféricas.

Tabela 28: Linhas de ação

| | |
|---|---|
| GESTÃO INTEGRADA DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS | Gestão conjunta das águas superficiais, subterrâneas e do uso do solo |
| | Melhoria no conhecimento sobre as águas subterrâneas |
| | Proteção das águas subterrâneas (aquíferos) |
| | Manejo integrado da bacia hidrográficas com ênfase naquelas prioritárias, do ponto de vista da interação rio-aquífero |
| | Gestão da demanda dos recursos hídricos, incluindo seu uso racional, usos múltiplos, reutilização de águas, equipamentos de medição e controle de perdas. |
| | Instrumentalização de políticas de planejamento territorial e de gestão integrada dos recursos hídricos |
| | Planos de ordenamento territorial e zoneamento de áreas inundáveis e de interesse agroecológico |
| | Gestão e monitoramento da qualidade ambiental em empreendimentos em geral (indústria, mineração, comércio, transporte, etc.) |
| PLANIFICAÇÃO E ORDENAMENTO TERRITORIAL | Zoneamento agroecológico de áreas prioritárias |
| | Ordenamento territorial de áreas urbanas |
| | Planos de ordenamento urbano-ambiental considerando os diferentes níveis de risco |
| | Mapas de vulnerabilidades territoriais e planos locais para implementar medidas de controle e mitigação |

Os perímetros de proteção de poços (PPP) são igualmente importantes, principalmente em áreas tão carentes de saneamento básico (incluindo a coleta de lixo, o saneamento básico e a drenagem urbana) como a Ilha de São Luís.

Indicadores de águas subterrânea foram definidos para qualificar cada trecho dos aquíferos e bacias quanto a potencialidades e problemas relacionados à quantidade e qualidade das águas. Foram sugeridos seis indicadores (Tabela 29) a partir de metodologia adotada pelo DAEE (2005). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 30.

A dependência das águas subterrâneas na Ilha de São Luís é bastante clara, como denotam os Indicadores 1 e 2 (Tabela 29).

Com referência ao abastecimento público (Indicador 1 = Exploração atual de águas subterrâneas/Demanda para Consumo Humano), observa-se que, de uma maneira geral, as bacias mostram dependências alta (> 50% da população abastecida) a intermediária (49 a 28%), em relação as águas subterrâneas.

Devido ao singular sistema de distribuição de água na Ilha de São Luís, onde as águas bombeadas das captações subterrâneas são injetadas diretamente nas redes de distribuição, algumas bacias (e.g., Bacanga, Cachorros, Estiva e Paciência, entre outras), mostram valores superiores a 100%, ressaltando a transposição de águas subterrâneas entre as bacias hidrográficas existentes.

Tabela 29: Indicadores do uso de águas subterrâneas

| VINCULAÇÃO | Nº | INDICADOR | UNIDADE | INTERPRETAÇÃO |
|-----------------|----|--|-----------|--|
| DEPENDÊNCIA | 1 | Exploração atual/ Demanda por consumo humano | % | Importância das águas subterrâneas no abastecimento para consumo humano. |
| | 2 | Exploração atual/ Demanda total | % | Importância das águas subterrâneas no abastecimento público. |
| DISPONIBILIDADE | 3 | Reserva Explotável/ População total | L/hab/dia | Quantidade de águas subterrâneas disponível por habitante por dia. |
| | 4 | Exploração atual/ Reserva Explotável | % | Comprometimento das Reservas Explotáveis. |
| QUALIDADE | 5 | Àrea com perigo alto ou extremo à contaminação/ Área total da bacia | % | Proteção da qualidade natural das águas subterrâneas em relação às fontes de contaminação cadastradas. |
| | 6 | Àrea com alta vulnerabilidade à salinização/ Área total da bacia | % | Proteção da qualidade das águas subterrâneas em relação à intrusão salina. |

O Indicador 1 é obtido dividindo a Exploração atual de águas subterrâneas para atendimento aos usos múltiplos pela Demanda por consumo humano. O Indicador 2 é representado pela relação entre Exploração atual de águas subterrâneas para atendimento aos usos múltiplos e a demanda pelos recursos hídricos totais, ou seja, a demanda total. O indicador 3 é obtido pela divisão entre a Reserva Explotável de águas subterrâneas calculada neste estudo e a população total da bacia. O Indicador 4 é calculado por meio da divisão entre a Exploração atual de águas subterrâneas dividida pela Reserva Explotável de águas subterrâneas. Os indicadores 5 e 6 são orientadores da qualidade das águas subterrâneas. O Indicador 5 é obtido por meio da razão entre o somatório das áreas com perigo alto ou extremo à contaminação na bacia e sua área total. O Indicador 6 é calculado de forma análoga, por meio da razão entre o somatório das áreas com alta vulnerabilidade à intrusão salina, pela área total da bacia.

Destacam-se que foram utilizados os valores de consumo médio para abastecimento humano do SNIS (2016) de 136 L/hab/dia para o indicador 1. Já a estimativa do consumo médio total utilizada no indicador 2 foi feita com base em Beeckman (1999) que propõe que este seja calculado como 20 vezes o consumo médio para abastecimento humano.

Considerando o uso da água subterrânea com relação à demanda total (abastecimento, irrigação, indústrias, etc.), Indicador 2, a dependência é expressivamente menor (média de 9,29% para toda a Ilha), denotando o uso preferencial das águas subterrâneas para o abastecimento público.

A disponibilidade das águas subterrâneas pode ser mensurada pelos Indicadores 3 e 4 (Tabela 30). O Indicador 3 (Reserva Explotável de águas subterrâneas/ população total) mostra uma disponibilidade, em regra, bastante superior àquela adotada neste trabalho como consumo média por habitante por dia, de 136 litros. A disponibilidade média encontrada foi de 787 L/hab/dia. Nas bacias de pequena urbanização as disponibilidades assumem valores gigantescos, novamente ressaltando seu pequeno uso e grandes reservas. Apenas na bacia do Anil a disponibilidade por habitante é inferior aos 136 litros diários, situando-se em 131,14 litros.

Tabela 30: Cálculo dos Indicadores do uso de águas subterrâneas na Ilha de São Luís

| Bacia Hidrográfica | População | Demanda para Consumo Humano (m³/ano) | Demanda total (m³/ano) | Reservas totais (m³) | Reserva Explotável (m³/ano) | Explotação atual (m³/ano) | DEPENDÊNCIA | | DISPONIBILIDADE | | QUALIDADE DE | |
|--------------------|-----------|--------------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-------|-----------------|-------|--------------|-------|
| | | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Anil | 245.795 | 12.201.263,80 | 244.025.276,00 | 146.600.000 | 11.765.200 | 3.407.000 | 27,92 | 1,40 | 131,14 | 28,96 | 13,90 | 60,60 |
| Bocanga | 240.879 | 11.957.233,56 | 239.144.671,20 | 383.100.000 | 22.127.200 | 19.508.000 | 163,15 | 8,16 | 251,67 | 88,16 | 6,70 | 36,30 |
| Cachorros | 14.399 | 714.766,36 | 14.295.327,20 | 341.400.000 | 19.803.000 | 4.481.000 | 626,92 | 31,35 | 3.767,96 | 22,63 | 4,70 | 25,30 |
| Estiva | 8.312 | 412.607,68 | 8.252.153,60 | 104.500.000 | 11.511.500 | 1.175.000 | 284,77 | 14,24 | 3.794,32 | 10,21 | 1,40 | 32,90 |
| Guarapiranga | 39 | 1.935,96 | 38.719,20 | 63.900.000 | 4.675.400 | 1.000 | 51,65 | 2,58 | 328.443,98 | 0,02 | 0,10 | 66,30 |
| Ilha | 737 | 36.584,68 | 731.693,60 | 43.100.000 | 8.551.700 | 25.000 | 68,33 | 3,42 | 31.790,12 | 0,29 | 0,20 | 87,50 |
| Inhaúma | 616 | 30.578,24 | 611.564,80 | 119.000.000 | 11.127.000 | 6.000 | 19,62 | 0,98 | 49.488,53 | 0,05 | 1,40 | 29,20 |
| Itaquí | 31.181 | 1.547.824,84 | 30.956.496,80 | 100.400.000 | 12.100.100 | 1.437.000 | 92,84 | 4,64 | 1.063,18 | 11,88 | 3,60 | 56,10 |
| Jeriparana | 47.389 | 2.352.389,96 | 47.047.799,20 | 400.000.000 | 24.487.100 | 8.669.000 | 368,52 | 18,43 | 1.416,26 | 35,39 | 6,40 | 43,50 |
| Paciência | 369.020 | 18.318.152,80 | 366.363.056,00 | 1.158.300.000 | 43.726.000 | 37.925.000 | 207,04 | 10,35 | 324,64 | 86,73 | 15,70 | 16,70 |
| Praias | 112.646 | 5.591.747,44 | 111.834.948,80 | 269.600.000 | 26.554.000 | 11.182.000 | 199,97 | 10,00 | 645,83 | 42,11 | 4,70 | 74,60 |
| Santa Antônio | 161.745 | 8.029.021,80 | 160.580.436,00 | 702.400.000 | 30.911.900 | 13.477.000 | 167,85 | 8,39 | 523,60 | 43,60 | 12,90 | 30,10 |
| Thiéri | 40.262 | 1.998.605,68 | 39.972.113,60 | 604.200.000 | 42.037.700 | 2.741.000 | 137,15 | 6,86 | 2.860,56 | 6,52 | 2,60 | 48,40 |



O Indicador 4 (Exploração atual de águas subterrâneas /Reserva Explotável de águas subterrâneas) mostra que em algumas bacias (Guarapiranga, Ilha e Inhaúma), as águas subterrâneas ainda são praticamente inexploradas, sendo utilizadas menos de 1% de suas disponibilidades, constituindo-se assim em grande reserva estratégica para futuras captações na Ilha.

No entanto, nas bacias do Bacanga e Paciência, as reservas já tendem à exaustão, com o comprometimento de mais de 80% do total. As demais bacias mostram comprometimento de moderado a baixo, sempre inferiores a 50% do total.

Finalmente, os Indicadores 5 e 6, relacionados à qualidade da água subterrânea, destacam as bacias dos rios Paciência, Anil e Santo Antônio em relação ao perigo de contaminação e as bacias Ilha, Praias, Guarapiranga, Anil e Itaqui em relação ao potencial de salinização.

Embora não se tenha uma separação precisa das explorações de cada aquífero por bacia hidrográfica, o conhecimento daquelas áreas onde os mesmos são mais explorados, juntamente com uso dos indicadores, permite a sugestão do estabelecimento de zonas de restrição ao uso de águas subterrâneas, tanto para o aquífero São Luís, quanto para o Itapecuru, representadas na Figura 70.

Existem algumas Áreas de Preservação Ambiental - APAS na Ilha de São Luís - Parque Estadual do Bacanga, com 3.075 Ha; APA do Maracanã, com 18.131 Ha; APA do Itapiracó, com 322 Ha; Estação Ecológica do Rangedor, com 120 Ha e Parque Estadual da Lagoa da Jansen, com 196 Ha, que ocupam área superior a 20% de seu território, tendo grande importância na recarga dos recursos hídricos.

Levando-se em conta as discussões anteriores e considerando-se a importância da preservação dessas áreas, se pode admitir a existência de 05 zonas principais de restrições na Ilha (Figura 71):

- a. ZONA 1 – Áreas das bacias nas quais já se registram indícios de superexploração dos aquíferos Itapecuru e São Luís (Bacanga e Paciência) ou há a exploração intensiva de águas subterrâneas do Aquífero São Luís (Santo Antônio e parte de Praias). Parte das reservas sob pressão do aquífero Itapecuru já foram consumidas e mostram alta vulnerabilidade à salinização (Itaqui e Praias);
- b. ZONA 2 – Área do Alto Paciência, com indícios de superexploração do aquífero São Luís e parte da área do Santo Antônio, com exploração intensiva e em grande parte sob condições de perigo alto a extremo de contaminação. O alto nível de urbanização, com a consequente impermeabilização de sua área, reduz sensivelmente as condições de recarga;
- c. ZONA 3 – Parte da região litorânea da Ilha, de alta vulnerabilidade natural à salinização, principalmente no caso do aquífero Itapecuru, devido à sua condição de ocorrência, geralmente abaixo do nível do mar;



- d. ZONA 4 – Área descontínua, abrangendo o Parque Estadual do Bacanga, a APA do Maracanã, a APA do Itapiracó, Parque Estadual do Sítio do Rangedor e APA da Lagoa de Jansen, destinadas, de acordo com os Decretos Estaduais de suas criações, à proteção e garantia da recarga dos recursos hídricos. Quando essas áreas se superpõem a alguma das três zonas anteriores, as restrições devem ser ainda maiores.
- e. ZONA 5: Definida por um grande polígono englobando todas as anteriores e que representa uma região de especial atenção para a gestão das águas subterrâneas na Ilha de São Luís.

Considerando-se o estabelecimento dessas zonas, faz-se necessário propor as seguintes medidas mitigadoras:

- a. Reduzir os volumes anuais explorados, em cada bacia hidrográfica e para cada aquífero, ajustando-os às reservas exploráveis;
- b. Nas bacias do Santo Antônio e das Praias, cada aquífero deve ser explorado individualmente dentro do limite de suas reservas exploráveis. As explorações no Aquífero São Luís devem ser reduzidas de imediato na bacia do Paciência. O volume total desta redução somente poderá ser determinado uma vez que se conheça com clareza o aquífero captado em cada poço existente;
- c. Na Bacia de Santo Antônio, as principais áreas de exploração de águas subterrâneas ocorrem na região dos tabuleiros, captando o aquífero São Luís. As reservas do Aquífero Itapecuru devem ser exploradas na parte mais rebaixada da área;
- d. Na Bacia do Bacanga, a exploração total do Itapecuru se aproxima das reservas exploráveis e os elevados rebaixamentos dos níveis de águas subterrâneas nessa área alertam para a necessidade urgente de redução das taxas de bombeamento atualmente praticadas. Percentuais de redução de vazão devem ser estabelecidos e novas perfurações devem ser proibidas na região, até que informações mais consistentes sejam coletadas;
- e. A Bacia do Paciência representa, do ponto de vista da equipe que desenvolveu o estudo, a mais problemática da Ilha. Sua exploração total atual se aproxima das reservas exploráveis totais. Considerando-se o balanço na região alta da bacia, com maior densidade dos poços, a situação é ainda mais grave, evidenciando superexploração. Esta superexploração reduz as reservas não apenas nesta bacia, como também em toda porção oeste da Ilha, haja vista que a Bacia do Paciência se constitui em área preferencial de recarga para toda a região. Em princípio se propõe reduzir em 50% as explorações atuais e proibir a perfuração de novos poços na área;
- f. Para atingir essas metas de redução de vazões e conhecimento dos volumes reais de águas subterrâneas explorados na Ilha de São Luís, devem ser implantados hidrômetros nos poços, com as leituras diárias repassadas à SEMA.

Nas considerações acima nem sempre foi possível se estabelecer um percentual para redução dos volumes de águas subterrâneas atualmente produzidos na Ilha, principalmente devido ao desconhecimento dos aquíferos captados na maioria dos casos.

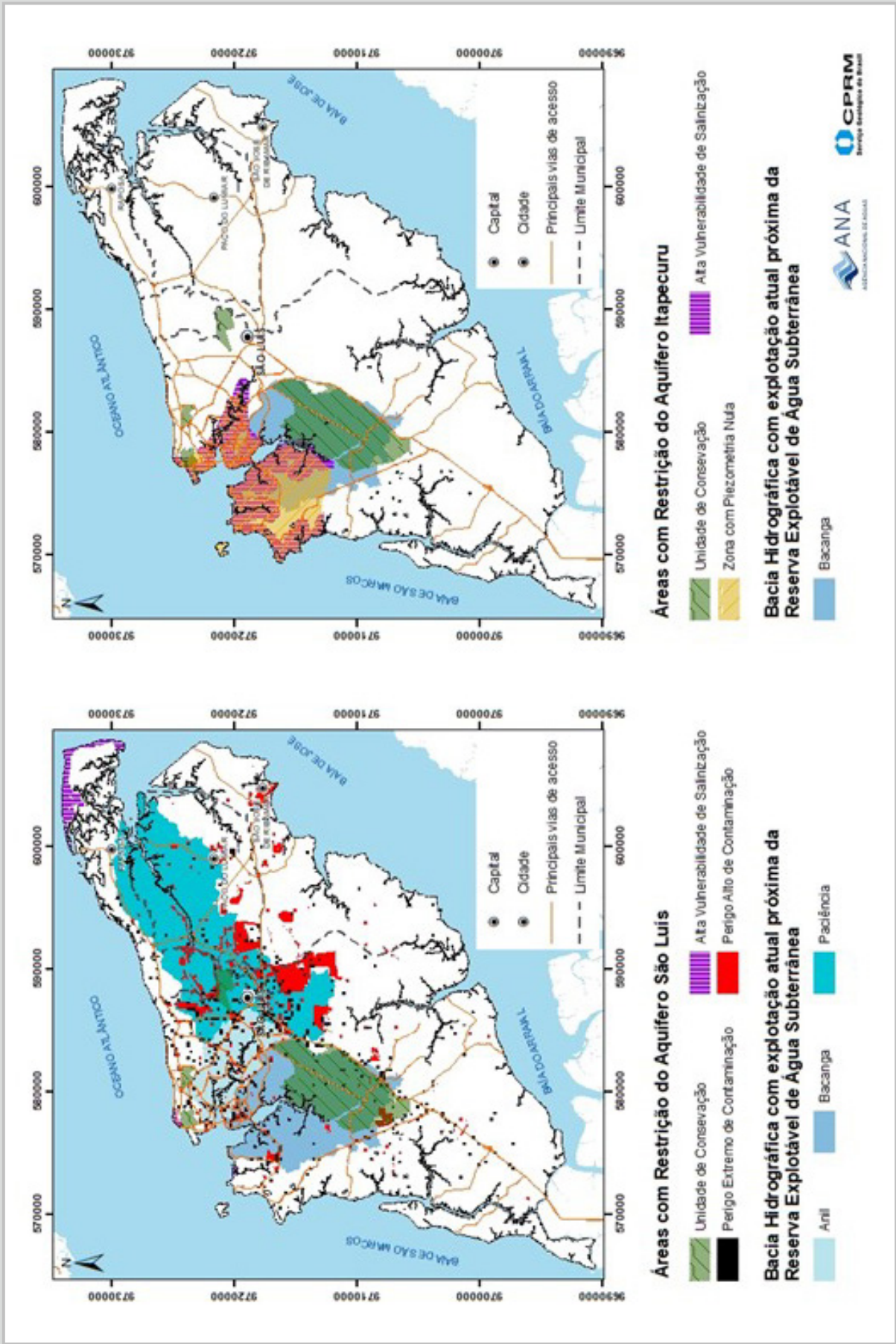


Figura 70: Áreas de restrição de uso das águas subterrâneas na Ilha de São Luís para os aquíferos São Luís e Itapecuru

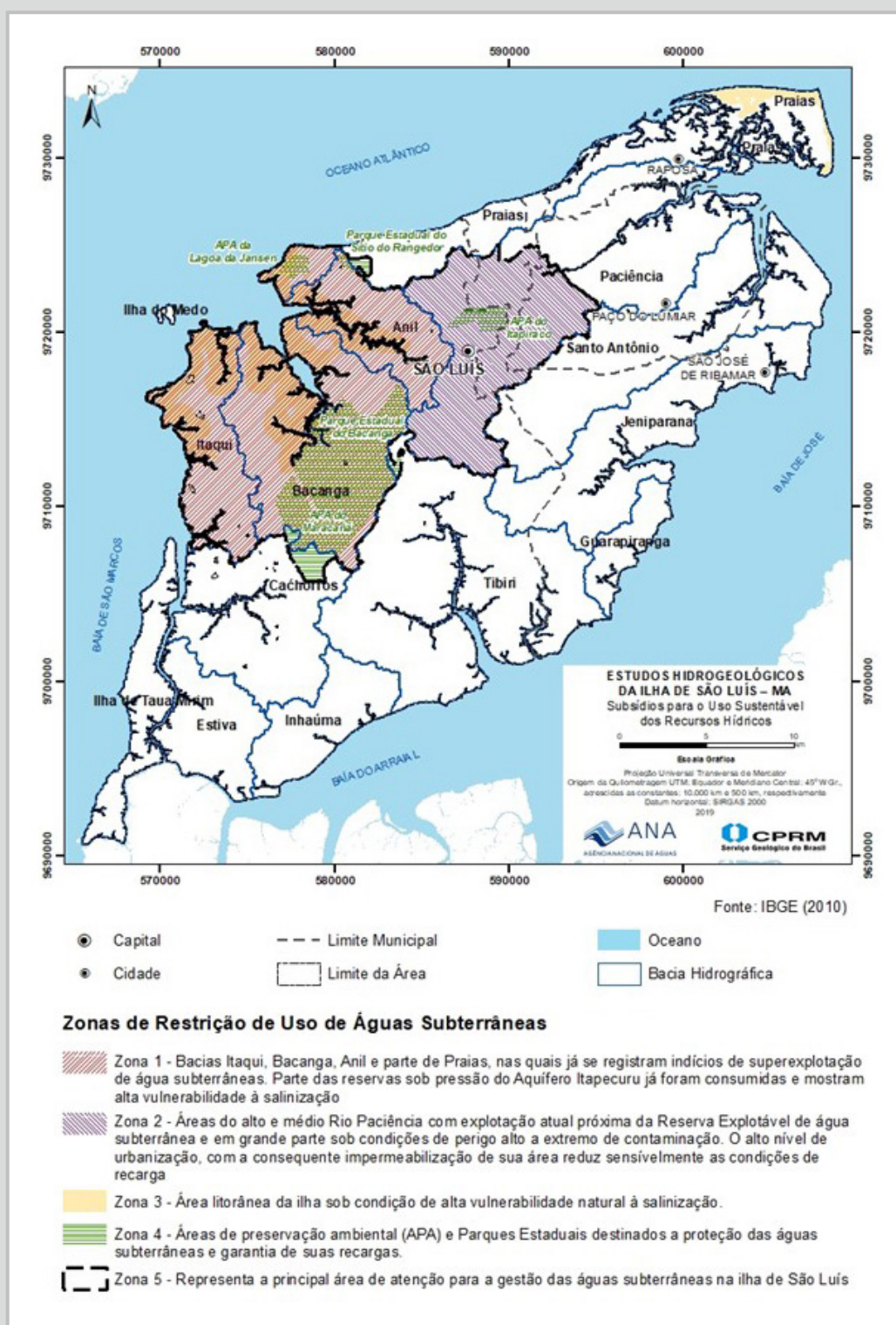


Figura 71: Zona principal de restrição de águas subterrâneas na Ilha de São Luís, determinada pela utilização dos indicadores propostos



Essas informações, contudo, certamente podem ser adquiridas pelo órgão gestor estadual junto aos principais usuários, como CAEMA e BRK. Além destes, uma campanha de legalização e outorga dos poços, baseadas em fiscalizações efetivas do uso de águas subterrâneas, certamente permitirá acesso aos dados, atualmente escassos.

Um fato que causa extrema apreensão, é a possibilidade de que o número real de poços existentes seja muito superior aos apresentados nesse estudo, representando uma situação ainda mais grave do que a ora descrita.

O SIG anexo a este projeto deverá servir como repositório e instrumento de permanente atualização das novas informações obtidas.

6.1.3. Área Estratégica III - Pesquisa e Desenvolvimento

Abrange várias áreas do conhecimento e lida com diversos problemas, como vulnerabilidade à contaminação e a salinização, relações entre águas subterrâneas e superficiais, gestão integrada e participativa das bacias, tecnologias para aumentar a disponibilidade e o uso eficiente da água para os diversos fins, etc.

Para sua implementação e visando o necessário respaldo financeiro, se propõe que seja criado um fundo que pode ser baseado na cobrança pelo uso da água ou nos recursos de compensação financeira (royalties por área inundada do setor elétrico, multas, ou outros recursos), destinado a apoiar a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico. Considerando a complexidade da adoção imediata desta ação, sugere-se inicialmente a captação de recursos via CT-Hidro, multas, etc.

Ademais, pode-se criar uma rede de instituições parceiras para a elaboração de projetos de Reuso e Uso Eficiente da Água, e apoio na busca de financiamento para estes. Destaca-se que os usuários industriais poderiam propor projetos deste tipo, como já ocorre em outros estados. Seminários de trocas de experiência sobre o tema podem ser uma forma de dar início as tratativas no tema.

Existe a clara necessidade da execução de uma série de estudos e pesquisas de natureza técnico-científica, os quais devem envolver instituições de ensino e pesquisa, entre as quais podemos citar:

- Geologia aplicada à hidrogeologia, incluindo geologia estrutural (espacialização 3D das unidades aquíferas, principais estruturas, mapas de isópacas etc.); heterogeneidades e anisotropias, estudos de reservatórios (água); entre outros;
- Entendimento pleno do modelo conceitual e detalhamento da geometria e das condições de fluxo das águas subterrâneas dos principais aquíferos;
- Balanços hídricos mais completos e integrados, com elementos do ciclo hidrológico, interações águas superficiais – subterrâneas – atmosféricas e uso das águas (captações e pontos de lançamento), uso do solo e ações antrópicas;
- Origem das principais ocorrências de maiores concentrações ou valores anômalos de contaminantes ou sais (natural, antrópica, mista);
- Estudos de viabilidade, mapeamento e elenco de novas áreas mais propícias à exploração;

- Detalhamento de mapas de vulnerabilidade, notadamente nas áreas com vulnerabilidade alta ou extrema apresentadas neste trabalho;
- Estudos metodológicos e teórico-experimentais de determinação de zonas de captura de poços, de perímetros de proteção de poços (PPP), de perímetros de alerta e de zoneamento preventivo, e integração com ações de controle e monitoramento de fontes de poluição;
- Áreas contaminadas, incluindo mecanismos de transporte, mobilidade/fixação e persistência de contaminantes no solo/rochas e nas águas subterrâneas;
- Desenvolvimento e aplicação de tecnologias;
- Estabelecimento de indicadores para a temática de águas subterrâneas, sejam quanto a seus aspectos quantitativos ou qualitativos – estes devem associar-se a Planos Estratégicos, como Planos de Recursos Hídricos, Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH), Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) etc.

Entre os atores envolvidos nesta área destacam-se as universidades e centros de pesquisa, agências de fomento à pesquisa, órgãos de estado (CPRM, ANA, SEMA, , empresas de saneamento).

6.1.4. Área Estratégica IV - Fortalecimento Institucional

Ressalta-se a necessidade de melhoria no aspecto organizacional, a partir do fortalecimento técnico e institucional da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão – SEMA, assim como das secretarias de meio ambiente municipais, e pela melhoria na integração e articulação entre todas as secretarias de meio ambiente e de habitação dos municípios locais. Articulações para participação na elaboração do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Grande São Luís – PDDI são também de extrema importância, assim como da elaboração e revisão de planos diretores locais.

As principais iniciativas de cunho institucional sugeridas são:

- Fortalecimento e capacitação contínua de quadro técnico dos órgãos de estado, como a SEMA e maior aproximação com órgãos federais como CPRM, IBAMA, ANA, MMA, MME etc.). É particularmente importante aumento dos quadros técnicos de órgãos estaduais (SEMA, etc.) e municipais, extremamente carentes de capacitação;
- Cooperação entre atores, através de termos de compromisso, convênios, cartas de intenção e outros instrumentos de interação;
- Interação e trocas de experiência entre órgãos do estado, dos municípios, de universidades e empresas, como a CAEMA, a BRK e os SAAEs municipais;
- Divulgação e troca de experiência envolvendo estudos de casos, casos bem sucedidos e mal sucedidos.

Os atores envolvidos seriam representantes de diversas instituições, incluindo SEMA, FIEMA, UFMA, UEMA, CAEMA, BRK, CPRM, ANA, IBAMA, etc., além de entidades de classe, CREA, Associação de Geólogos, etc.



6.1.5. Área Estratégica V - Educação, Formação, Mobilização Social

Área estratégica que se refere à preparação das gerações atual e futura para participar de políticas públicas desenvolvidas na implementação da gestão dos recursos hídricos.

As ações devem ser desenvolvidas em todos os níveis educacionais, desde o nível fundamental ao superior, possibilitando a introdução dos conceitos de gestão em todas suas fases de desenvolvimento.

O programa de comunicação visa, por um lado, informar a sociedade sobre as ações desenvolvidas e sobre as formas de sua participação e, por outro, prestar contas sobre os resultados alcançados. Deve promover o desenvolvimento e a difusão de técnicas sustentáveis para aumentar a disponibilidade hídrica e o uso eficiente da água, instituir programas de participação pública para o envolvimento das comunidades locais na gestão da água e saneamento e campanhas de conscientização orientadas para aprofundar o conhecimento sobre possíveis crises hídricas, seus impactos e encontros.

Em termos de capacitação técnica para diversos públicos destaca-se que a ANA oferece vários cursos de capacitação presenciais, semipresenciais e a distância (<https://capacitacao.ead.unesp.br/>) voltados para a gestão de recursos hídricos para públicos diversos. Ademais, voltado para os gestores, diversas universidades do país têm oferecido vagas para o Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), apoiadas pela ANA e pela CAPES (<https://www.feis.unesp.br/#!/pos-graduacao/profagua/>).

Também de grande importância, deve-se ressaltar o interesse da ANA e da CPRM na realização de cursos de nivelamento dos profissionais vinculados aos recursos hídricos no Estado do Maranhão, no uso do Sistema de Informações Geográficas - SIG elaborado para este projeto, bem como no aprofundamento de sua compreensão sobre os temas tratados em cada volume deste relatório.

Deve ter como principais participantes técnicos da SEMA e das secretarias de meio ambiente municipais, das universidades (UFMA e UEMA, principalmente), dos centros de pesquisa, de órgãos públicos estaduais diversos, companhias de saneamento, ANA e CPRM.

É importante destacar que nem todas as Estratégias de Gestão levantadas e discutidas ao longo deste Estudo estão incluídas nesta síntese do PAE. Neste sentido, no ANEXO 3 do Volume IV do Relatório Final é apresentada uma Tabela com Propostas de Estratégias de Gestão, separadas por grandes temas (saneamento básico, recargas naturais e urbanas, resultados das atividades antrópicas e controle da poluição, etc.), e subtemas, discriminando as ações, atores envolvidos e executores, bem como onde aparecem no Estudo. A maior parte destas estratégias está relacionada à área Estratégica II, mas há outras relacionadas às demais áreas estratégicas, bem como outras transversais a todas.

REFERÊNCIAS

- ANA. (2017). Atlas Esgotos - Despoluição de Bacias Hidrográficas. Agência Nacional de Águas – ANA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Brasília-DF.
- ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1991. 381 p. e-Book. ISBN: 978-0-0808-8694-7.
- ARAÚJO, E. P.; TELES, M. G. L.; LAGO, W. J. S. (2009). Delimitação das bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão a partir de dados SRTM. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p 4631-4638
- BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.
- CHACHADI, A.G; LOBO-FERREIRA, J.P. Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter. In: PROCESSING Workshop on Modelling in Hydrogeology. Chennai, India: Anna University, 2001. p.143-156
- CLARK, I.; FRITZ, P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York: Lewis Publishers, 1997. 328p
- DINIZ, J.A.O.; MONTEIRO, A. de B.; SILVA, R. de C.; PAULA, T.L. F. de. Manual de Cartografia Hidrogeológica. RECIFE: CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2014, 119p. il. Color. Programa de Cartografia Hidrogeológica.
- FOSTER, S.S.D. Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. In: VAN DUIJVENBOODEN, W.; VAN WAEGENIGH, H.G. (eds.) Vulnerability of Soil and Ground Water Pollutants. Haia: TNO Committee on Hydrological Research Information, 1987. p. 69-86.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data. Pan American Centre for Sanitary Engineering and. Environmental – CEPIS, Lima, p. 81, 1988.
- GAMA, J.R.N.F.; ARAÚJO, E.P.; LOPES, J.R.; TELES, M.G.L.; SANTOS, A.H.M.; CARVALHO FILHO, R. Solos e bacias Hidrográficas da Ilha do Maranhão. São Luís: UEMA, 2012
- IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - Caracterização e quadros de análise comparativa da governança metropolitana no Brasil: arranjos institucionais de gestão metropolitana (componente 1). Rio de Janeiro: IPEA, 2014. p. 8.
- LEI FEDERAL Nº 11.445 (2007). Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm



LEI FEDERAL Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO (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, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos>

LEI FEDERAL Nº 9.984, DE 17 DE JULHO DE 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. (Redação dada pela Lei nº 14.026, de 2020). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9984

LEI MUNICIPAL 6.321 (2018). Estabelece e organiza o sistema de Limpeza Urbana e de Gestão Integrada dos Resíduos sólidos no Município de São Luís, e dá outras providências. Disponível em: http://www.saoluis.ma.gov.br/midias/ANEXOs/2560_lei_6.321.pdf. Acessado em junho de 2019

LIMA, D. B. S. (2013). Reciclagem de Resíduos sólidos no Município de São Luís, Maranhão: Implicações no contexto Saúde e Ambiente. Dissertação de Mestrado. Centro de ciências Biológicas e da Saúde. Universidade Federal do Maranhão-UFMA. São Luís-MA.

MACE, R. E.; MULLICAN, W. F. & WAY, T. Estimating Groundwater Availability in Texas. Texas Water Development Board – TWDB. Texas. 16 p. 2001.

MANOEL FILHO, J.; CASTRO, V.L.L. Avaliação e Exploração do Aquífero Dunas-Barreiras na Região do Subsistema Lacustre do Bonfim – RN. Águas Subterrâneas, [S. l.], n. 1, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22572>. Acesso em: 18 jun. 2021.

PEREIRA et al. Medidas hidroquímicas e isotópicas em águas subterrâneas que abastecem o município de São Luís – Maranhão. Rev. Águas Subterrâneas Nº18/ Janeiro, 2004.

PEREIRA, L., SANTIAGO, M. M. F., MENDONÇA, L. A. R., FRISCHKORN, H., MENDES FILHO, J. Caracterização isotópica das águas subterrâneas da Ilha de São Luís/MA-Brasil. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo-SP, 2002.

SANTOS, J. do N.; PEREIRA, E.D. Carta de suscetibilidade a infiltração de água no solo na subbacia do rio Maracanã – MA. Cadernos de Pesquisa, São Luís, v. 20, n. especial, julho 2013. DOI: <https://doi.org/10.18764/2178-2229.v20n.especialp63-71>.

SNIS (2018). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2016. Ministério das Cidades - MC, Brasília-DF.

UEMA/NUGEO. (2017). Universidade Estadual do Estado do Maranhão – Núcleo Geoambiental. Laboratório de Meteorologia. Informes Climáticos.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA. Mapeamento do Uso do Solo da Ilha do Maranhão: relatório técnico. Núcleo Geoambiental. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, 2016. 12 p. Inclui mapa

ISBN
978-65-5664-255-3



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

