



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE HISTÓRIA E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E
DINÂMICA DO ESPAÇO - PPGeo



AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NO CURSO
INFERIOR DO RIO BACANGA ATRAVÉS DO MÉTODO GALDIT

BRUNO NEVES MARTINS

São Luís

2019

BRUNO NEVES MARTINS

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NO CURSO
INFERIOR DO RIO BACANGA ATRAVÉS DO MÉTODO GALDIT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço – PPGeo, da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de Pesquisa: Dinâmica da Natureza e Conservação

Orientadora: Prof. Dra. Ediléa Dutra Pereira

São Luís

2019

Martins, Bruno Neves.

Avaliação da vulnerabilidade à intrusão salina no curso inferior do Rio Bacanga através do método Galdit / Bruno Neves Martins. – São Luís, 2019.

114 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Ediléa Dutra Pereira.

1.Vulnerabilidade. 2.Método GALDIT. 3.Bacia do Rio Bacanga. I.Título

CDU: 556.332.7(812.1)



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE HISTÓRIA E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E
DINÂMICA DO ESPAÇO - PPGeo

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO SALINA NO CURSO
INFERIOR DO RIO BACANGA ATRAVÉS DO MÉTODO GALDIT

Resultado:

Dissertação **Aprovada** em 28/02/2018 com distinção, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Geografia pela Comissão Examinadora composta por:

Dr. JOÃO PAULO CÁRCAMO LOBO FERREIRA, LNEC

Examinador Externo à Instituição

JORGE HAMILTON SOUZA DOS SANTOS, UFMA

Examinador Interno

EDILZA VIEIRA PEREIRA, UEMA

Presidente

São Luís

2019

*Dedico este Trabalho a Deus a Ele
Toda Honra e Toda Glória, a minha
família e amigos, sintam-se lembrados...*

AGRADECIMENTOS

Toda Honra e Glória a Deus, pela vida, pela iluminação, pela possibilidade de estar vivo, pela família e pela oportunidade de estudar.

A minha família pelo carinho, dedicação, incentivo e compreensão durante o processo o processo do sonho de tornar-me Mestre, em especial aos meus avós Francisco França Martins e Maria de Jesus Moraes Martins pelos ensinamentos de vida , aos meus pais Paulo de Tarso Moraes Martins e Vanderlice Moraes Martins pelo pela vida e apoio incondicional.

A Daniela e ao meu filho Luiz Francisco fontes de alegria e inspiração.

À Prof. Ediléa Dutra, pela coragem, determinação, compreensão e por topar o desafio.

Aos amigos Jocimar Silva Costa, Clebson Candido, Hélio Costa e Leonel Santana que contribuíram com suas análises criteriosas e muniram de materiais para essa empreitada. Aos amigos de PPGEO Jonas, Thais, Suellen, Davi, Gilberlene, Gustavo, Karla, Marly, Cris e Paula que tornaram essa caminhada mais leve

À toda coordenação pelo esforço e dedicação aos mestrandos, em especial a Nana.

Aos mestres da graduação pelo apoio, auxílio e por ter plantado a semente da pesquisa em nossos corações, em especial à Prof^ª. Ms. Karina Suzana que me apresentou a temática estudada.

Aos moradores do baixo curso do rio bacanga, que confiaram na pesquisa.

Aos alunos do LEBAC, Darlysson, Waldiana, Gabriel, Delony pelos trabalhos de campo, pelas pesquisas auxílio e companheirismo.

A Fundação de Amparo a Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Estado do Maranhão-FAPEMA, pelo apoio concedido à pesquisa.

À Universidade Estadual do Maranhão - UEMA pela oportunidade.

E a todos que estiveram ao meu lado contribuindo nesta empreitada.

*“Essa parte da minha vida, essa pequena parte, se chama felicidade”
Do filme “À Procura da Felicidade”*

RESUMO

A água é uma fonte imprescindível para o abastecimento humano e através dos tempos a busca por este recurso, tem se intensificado pela elevada procura por água de boa qualidade. A bacia do rio Bacanga, localizada inteiramente dentro dos limites do município de São Luís, mais precisamente na porção noroeste da Ilha do Maranhão, demarcada pelos pares de coordenadas geográficas: 2°31'50,85"S a 2°34'34,11"S e 44°18'14,22"W a 44°28'92,00" W, possui papel singular no abastecimento público de água do município de São Luís. Neste sentido, investiga-se a relação entre a perfuração de poços tubulares e a alta exploração das águas subterrâneas no curso inferior da bacia do rio Bacanga, fato este que poderá proporcionar a intrusão da cunha salina nos aquíferos das Formações Barreiras e Itapecuru. Nesta perspectiva, foi utilizado o método GALDIT proposto Chachadi e Lobo Ferreira (2001), utilizado em diversas partes do mundo, que analisa dados hidrodinâmicos de poços tubulares, para a avaliação do grau da vulnerabilidade à intrusão salina, classificando-a em vulnerabilidade alta ($\geq 7,5$), média ($5 - 7,5$) ou baixa (≤ 5). As letras do método refletem cada parâmetro analisado, como: G – Ocorrência do aquífero, A – Condutividade Hidráulica; L – Nível piezométrico; D – Distância da Linha de Costa; I – Estado atual da intrusão salina no aquífero (Bicarbonatos/Cloretos); e T – a espessura do aquífero. Nesta pesquisa descrevem-se as atividades desenvolvidas no período de agosto de 2016 a 2018 onde foram reunidos o levantamento de banco de dados do curso inferior da bacia do rio Bacanga, análise dos dados, tratamento e tabulação dos mesmos. Os dados foram tratados no software *AquiferWin32* para identificação dos parâmetros G – Ocorrência do aquífero e A – Condutividade Hidráulica; associada à espacialização dos dados utilizando-se técnicas de interpolação de dados espaciais para a espacialização das informações coletadas. Os resultados obtidos através do *AquiferWin32* apontam que o aquífero da área classifica-se como semi-confinado, obedecendo a curva de permanência proposta por *Theis* (1963), além de uma Condutividade Hidráulica (K) variando de $1,27 \times 10^{-7}$ m/s a $3,86 \times 10^{-6}$ m/s o que reflete em uma produtividade geralmente baixa a moderada. O parâmetro L - Nível Piezométrico na área de estudo apresentou uma variação do Nível Estático de 44,2 m a -38,5m indicando valores do parâmetro entre 2,5 a 7,5. O parâmetro D- Distância da linha de Costa na área de estudo a variação da linha de costa ocorreu de 119m (P-13) a 7.709m indicando o índice de 2,5 a 7,5 e 10 conforme (Chachadi e Lobo Ferreira, 2001). Para o Parâmetro I realça-se os trabalhos de campo para a identificação de poços tubulares, assim como para análise de água através da sonda multiparâmetro *Aquaread AP800* e de 6 (seis) amostras de poços tubulares enviadas ao

laboratório, além dos dados de poços cadastrados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente - SEMA. Apresentaram-se ainda, 21 (vinte e uma) amostras de água com o parâmetro salinidade da Barragem do Bacanga, as quais apontaram uma água com características salgada a salobra variando de 22ppt a 32,39ppt. Os resultados obtidos, através do método GALDIT, demonstraram que a vulnerabilidade à intrusão salina na área de estudo, em sua maior parte, encontra-se baixa a moderada, entretanto poços tubulares localizados na região norte da bacia, mais precisamente, os poços P-13, P-17, P-10 e P-28 apresentaram uma vulnerabilidade alta à intrusão salina e os poços tubulares da margem esquerda da bacia P-26, P-46, P-47, P-49, P-50, P-52 e P-5 e os poços tubulares da margem direita da bacia P-29, P-9, P-39, P-41, P-42, P-43, P-44 e P-45, que apresentaram uma vulnerabilidade moderada à intrusão salina (5,5 a 5,9). Ressalta-se que os poços tubulares da margem direita, exceto os P-29 e P-9, compõem a bateria dos poços tubulares do Sistema Produtor de Água do Sacavém exceto os P-29 e P-9, compõem a bateria dos poços tubulares do Sistema Produtor de Água do Sacavém para abastecimento público, pertencente à concessionária de água Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA. Ressalta-se que possivelmente essas vulnerabilidades alta e moderada foram ocasionadas pela sua proximidade a linha de costa, assim como pela dinâmica estuarina da área, excesso bombeamento de água subterrânea para abastecimento público e impermeabilizações nas áreas de recarga de aquíferos o que nos remete a uma maior atenção e monitoramento nessas regiões. O método apresentou resultados satisfatórios para a avaliação da entrada salina que é um fenômeno silencioso, mas presente diuturnamente em ambiente estuarino. Trata-se de um ambiente sensível e com uma exploração de água subterrânea constante. Esse método é bastante confiável e de fácil aplicabilidade, além de possibilitar a produção documentos cartográficos para um melhor planejamento territorial para a conservação dos recursos hídricos subterrâneos na Ilha do Maranhão. Assim, recomenda-se a preservação das áreas de recargas de aquífero presente no Parque Estadual do Bacanga, principalmente a área do Recanto Verde, maior controle nas autorizações e exploração de água subterrânea na bacia, execução de uma política de planejamento urbano e o monitoramento da qualidade da água subterrânea em períodos sazonais na bacia.

Palavras-chave: Vulnerabilidade, Método GALDIT; Bacia do rio Bacanga.

ABSTRACT

Water is an essential source for human supply and, over time, the search for this resource has been intensified by the high demand for good quality water. The Bacanga River basin, located entirely within the limits of the municipality of São Luís, more precisely in the northwestern portion of the Island of Maranhão, demarcated by the pairs of geographical coordinates: $2^{\circ} 31'50.85''\text{S}$ to $2^{\circ} 34'34, 11''\text{S}$ and $44^{\circ} 18'14,22''\text{W}$ at $44^{\circ} 28'92,00''\text{W}$, has a unique role in the public water supply of the municipality of São Luís. In this sense, the relationship between the drilling of tubular wells and the high exploitation of groundwater in the lower course of the Bacanga River basin, a fact that may provide the intrusion of the saline wedge into the aquifers of the Barreiras and Itapecuru Formations. In this perspective, the proposed GALDIT method Chachadi and Lobo Ferreira (2001), used in several parts of the world, which analyzes hydrodynamic data from tubular wells, was used to assess the degree of vulnerability to saline intrusion, classifying it as high vulnerability (≥ 7.5), medium (5 -7.5) or low (≤ 5). The letters of the method reflect each analyzed parameter, such as: G - Aquifer occurrence, A - Hydraulic Conductivity; L - Piezometric level; D - Distance from the Coast Line; I - Current status of saline intrusion in the aquifer (Bicarbonates / Chlorides); and T - the thickness of the aquifer. This research describes the activities carried out from August 2016 to 2018 where the survey of the database of the lower course of the Bacanga river basin, data analysis, treatment and tabulation of the data were gathered. The data were processed in the AquiferWin32 software to identify the parameters G - Aquifer occurrence and A - Hydraulic Conductivity; associated with data spatialization using spatial data interpolation techniques for the spatialization of collected information. The results obtained through AquiferWin32 show that the area's aquifer is classified as semi-confined, following the permanence curve proposed by Theis (1963), in addition to a Hydraulic Conductivity (K) varying from $1.27 \times 10^{-7} \text{ m / s}$ to $3.86 \times 10^{-6} \text{ m / s}$ which reflects a generally low to moderate productivity. The parameter L - Piezometric Level in the study area showed a variation of the Static Level from 44.2 m to 38.5 m indicating values of the parameter between 2.5 to 7.5. The parameter D- Distance from the coast line in the study area, the variation of the coast line occurred from 119m (P-13) to 7,709m indicating the index of 2.5 to 7.5 and 10 according to (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001). Parameter I highlights the field work for the identification of tubular wells, as well as for water analysis using the multiparameter probe Aquaread AP800 and 6 (six) samples of tubular wells sent to the laboratory, in addition to the registered well data. by the State Secretariat for the Environment - SEMA. Twenty-one (21) water samples were also presented

with the Bacanga Dam salinity parameter, which indicated a water with salty to brackish characteristics ranging from 22ppt to 32.39ppt. The results obtained, through the GALDIT method, demonstrated that the vulnerability to saline intrusion in the study area, for the most part, is low to moderate, however tubular wells located in the northern region of the basin, more precisely, the P- 13, P-17, P-10 and P-28 showed a high vulnerability to saline intrusion and the tubular wells on the left bank of the basin P-26, P-46, P-47, P-49, P-50, P -52 and P-5 and the tubular wells on the right bank of basin P-29, P-9, P-39, P-41, P-42, P-43, P-44 and P-45, which showed a moderate vulnerability to saline intrusion (5.5 to 5.9). It should be noted that the tubular wells on the right bank, except the P-29 and P-9, make up the battery of the tubular wells of the Sacavém Water Producing System except the P-29 and P-9, make up the battery of the tubular wells the Sacavém Water Producing System for public supply, which belongs to the water concessionaire Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA. It is noteworthy that possibly these high and moderate vulnerabilities were caused by its proximity to the coastline, as well as by the estuarine dynamics of the area, excessive pumping of underground water for public supply and waterproofing in the aquifer recharge areas, which leads us to a greater attention and monitoring in these regions. The method showed satisfactory results for the evaluation of the saline intake, which is a silent phenomenon, but present daily in an estuarine environment. It is a sensitive environment with constant groundwater exploitation. This method is very reliable and easy to apply, in addition to making it possible to produce cartographic documents for better territorial planning for the conservation of underground water resources on Maranhão Island. Thus, it is recommended to preserve the areas. Thus, it is recommended to preserve the aquifer recharge areas present in the Bacanga State Park, especially the Recanto Verde area, greater control over authorizations and exploration of groundwater in the basin, execution of an urban planning policy and monitoring of groundwater quality in seasonal periods in the basin.

Keywords: Vulnerability, GALDIT method; Bacanga river basin.

LISTA DE SIGLAS

ALUMAR - Consórcio de Alumínio do Maranhão S.A
CAEMA - Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DJI - *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology*

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI - *Environmental Systems Research Institute*
FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa e Desenvolvimento Científico do Maranhão
GPS - Global System Position
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABOHIDRO – Laboratório de Hidrobiologia
MA - Maranhão
NA – Nível de Água
ND – Nível Dinâmico
NE – Nível Estático
NUGEO - Núcleo Geoambiental - UEMA
PPGEO - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço
REGLA - Sistema Federal de Regulação de Usos
SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais
SGR – Sistema Geodésico de Referência
SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG - Sistema de Informação Geográfica
TIN - Triangulated Irregular Network
UEMA - Universidade Estadual do Maranhão
UTM - Universal Transversa de Mercator
VANT - Veículo Aéreo não tripulado

ZEE MA - Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA.....	24
Figura 2 - Normais climatológicas de precipitação acumulada entre os períodos de 1931 - 1960 e 1961 - 1990.....	25
Figura 3: Altura pluviométrica em São Luís de 2000-2016.....	26
Figura 4 - Seções esquemáticas ilustrando a distribuição espacial das unidades geológicas-geotécnicas (associação do substrato geológico e o relevo).....	26
Figura 5 - Mapa de uso e cobertura do solo do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA.....	30
Figura 6 – Padrão de drenagem dendrítica.....	31
Figura 7 – Mapa de Drenagem da Bacia do rio Bacanga - São Luís - MA. Fonte: Martins, 2018.....	32
Figura 8- Desembocadura do rio Bacanga com entradas periódicas da maré – São Luís.....	32
Figura 9- Arcabouço estrutural da porção setentrional do Maranhão.....	33
Figura 10 - Modelo geológico-geotécnico da Ilha do Maranhão - São Luís - MA.....	34
Figura 11 - Mapa Geológico da Ilha do Maranhão – São Luís – MA.....	37
Figura 12 - Organograma dos integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.....	42
Figura 13 - Interface do SIAGAS desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM.....	46
Figura 14 - Caracterização esquemática das zonas não saturada e saturada no subsolo.....	46
Figura 15 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.....	47
Figura 16 - Tipos de aquíferos quanto à pressão.....	48
Figura 17 – Parâmetros Hidrodinâmicos.....	49
Figura 18 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.....	57
Figura 19 - Fluxograma resumido da pesquisa.....	65
Figura 20 – Organização da base cartográfica da pesquisa.....	70
Figura 21-Mapa de Hipsometria da porção inferior da bacia do rio Bacanga.....	72
Figura 22 -Mapa de Declividade da porção inferior da bacia do rio Bacanga- São Luís –MA.....	73
Figura 23 - Mapa de localização dos poços tubulares no curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.....	75

Figura 24- Mapa hidrodinâmico de profundidade dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.....	84
Figura 25 - Mapa de nível dinâmico dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.	85
Figura 26- Tela de entrada de informações do AquiferWin32 para dados hidrodinâmicos dos poços tubulares.	89
Figura 27 - Especialização dos Parametros GALDIT	97
Figura 28–Laudo de análise de poço tubular (João do Poço).....	98
Figura 29–Laudo de análise de poço tubular (Supermercado Mateus - Cohama).....	98
Figura 30–Laudo de análise de poço tubular (P-02).....	99
Figura 31–Laudo de análise de poço tubular (P-15).....	99
Figura 32–Laudo de análise de poço tubular (P-16).....	100
Figura 33–Laudo de análise de poço tubular (P-18).....	100
Figura 34 - Mapa com os pontos de coleta de água	101
Figura 35– Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares da porção do curso inferior da bacia do Rio Bacanga- São Luis-MA	103
Figura 36 -Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA.	103
Figura 37 - Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA.....	104
Figura 38 -Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Salina pelo do método GALDIT do curso inferior da bacia do Rio Bacanga - São Luís- MA	106

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 1- Grandes aglomerados populacionais próximos ao curso do rio Bacanga.....	29
Foto 2 - Vista aérea do Parque Estadual do Bacanga.....	29
Foto 3 - Drone <i>Phantom3 Professional</i> utilizado durante a pesquisa.	62
Foto 4 - Sonda Multiparâmetro (A); Sonda Multiparâmetro com Medidor Elétrico Analógico de Nível Estático D'água (B).....	68
Foto 5 - Poço do tipo cacimba (A e B).	69
Foto 6 - Equipe de campo realizando análise físico-química através de sonda multiparâmetro (A e B).....	69
Foto 7 - Equipe de campo aferindo o nível de água em poço cacimba (A e B).	70
Foto 8 - Vista parcial do poço tubular P-32–Parque Estadual do Bacanga, São Luis/MA	76
Foto 9 - Vista parcial do poço tubular P-35 – Parque Estadual do Bacanga, São Luis/MA.	76
Foto 10 - Vista parcial do poço tubular P-39 – Parque Estadual do Bacanga, São Luis/MA. .	77
Foto 11- Vista aérea a jusante do rio Bacanga– São Luís-MA.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Distribuição das classes de uso e cobertura do solo do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA.....	30
Tabela 2–Valores médios dos parâmetros dos poços do Aquífero Itapecuru na Ilha do Maranhão – Ma.....	38
Tabela 3 - Valores de Condutividade hidráulica (K) e porosidade total (n) em diferentes materiais.	51
Tabela 4-Classes de Produtividade do aquífero.	52
Tabela 5 - Parâmetros DRASTIC.....	55
Tabela 6 - Nível de vulnerabilidade de aquífero à contaminação.	58
Tabela 7 - Variáveis do método GALDIT.....	59
Tabela 8 - Parâmetro "G" – <i>Groundwater</i>	59
Tabela 9 - Parâmetro "A" – Condutividade hidráulica.....	59
Tabela 10 - Parâmetro "L" - Nível Piezométrico	60
Tabela 11 - Distância à linha da costa.	60
Tabela 12 - Parâmetro "I" - Impacto do estado atual da intrusão marinha na região	60
Tabela13 - Parâmetro "T" - Espessura do Aquífero	61
Tabela 14- Planilha para cálculo do rebaixamento do aquífero na porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís - MA.	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -Compartimentação do relevo da bacia do rio Bacanga – MA.....	27
Quadro 2- Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís-MA.....	34
Quadro 3-Classificação e caracterização de aquíferos.	48
Quadro 4-Parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero.....	49
Quadro 5 -Parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos.....	50
Quadro 6 - Características físicas e químicas da água subterrânea	53
Quadro 7-Poços tubulares presentes no curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís- MA.....	79
Quadro 8- Variáveis do poço 25 (P25) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	90
Quadro 9- Variáveis do poço 10 (P10) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	91
Quadro 10- Variáveis do poço 26 (P26) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	92
Quadro 11- Variáveis do poço 1 (P1) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	93
Quadro 12- Variáveis do poço 22 (P22) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	94
Quadro 13- Variáveis do poço 13 (P13) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Curva base do poço 25 (P25) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	90
Gráfico 2- Curva base do poço 10 (P10) da porção do inferior da bacia do rio Bacanga.....	91
Gráfico 3- Curva base do poço 26 (P26) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	92
Gráfico 4- Curva base do poço 1 (P1) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	93
Gráfico 5- Curva base do poço 22 (P22) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	94
Gráfico 6- Curva base do poço 13 (P13) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA	95

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	21
1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	21
1.2. OBJETIVOS	23
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
2.1. ASPECTOS GERAIS	24
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO	33
2.2.1. Grupo Itapecuru.....	34
2.2.2. Grupo Barreiras	35
2.2.3. Depósitos Quaternários	36
2.2.4. Geologia Estrutural.....	37
2.3. O SISTEMA AQUÍFERO ITAPECURU E BARREIRAS	37
2.3.1. Aquífero Itapecuru e Aquífero Barreiras.....	38
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	39
3.1. ESPAÇO GEOGRÁFICO E A BACIA DO RIO BACANGA: formas, processos, estruturas, funções e seus reflexos ambientais	39
3.2. AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	40
3.2.1. Águas subterrâneas: domínios e competências	40
3.2.2. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH)	41
3.2.3. A Política Nacional de Recursos Hídricos e Águas Subterrâneas.....	42
3.2.4. Política Estadual de Recursos Hídricos	43
3.3. FUNDAMENTOS EM HIDROGEOLOGIA	46
3.3.1. Dados Hidrodinâmicos de Aquíferos	49
3.3.1.1. <i>Parâmetros de comparação entre Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), Vazão (Q) e Produtividade</i>	52
3.3.1.2. <i>Qualidade e classificação das águas subterrâneas</i>	53
3.4. VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS	54
3.4.1. Método DRASTIC	55
3.4.2. Método GOD	56
3.4.3. Método GALDIT	58

4.1. MATERIAIS	62
4.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	64
4.2.1. Delimitação da Área de Estudo e Definição da Escala do Trabalho.....	66
4.2.2. Elaboração da caracterização da área de estudo e fundamentação teórica.....	66
4.2.3. Trabalhos de Campo Coleta, Organização e Tratamento dos dados.....	67
4.2.4. Coleta de água nos poços para análise físico-química	67
4.2.5. Aferição do Nível Estático dos Poços	69
4.2.6. Organização do Banco de Dados Geográficos	70
4.2.7. Elaboração dos Mapas Temáticos	70
4.2.8. Modelo de Interpolação para Elaboração dos Mapas Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade.....	73
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.1. LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES	75
5.2. ANÁLISE DOS DADOS HIDRODINÂMICOS	84
5.3. ANÁLISE DOS PARÂMETROS TRANSMISSIVIDADE (T), CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K) E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (S) DOS POÇOS ATRAVÉS DO SOFTWARE <i>AQUIFERWIN 32</i>	86
5.4. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MÉTODO GALDIT	96
5.4.1. Parâmetro “G” - Ocorrência do Aquífero.....	96
5.4.2. Parâmetro “A” - Condutividade Hidráulica	96
5.4.3. Parâmetro “L” - Nível do Piezômetro	96
5.4.4. Parâmetro “D” - Distância da Linha de Costa (metros).....	97
5.4.5. Parâmetro “I”- Impacto do Estado Atual da Intrusão Marinha.....	97
5.4.6. Parâmetro - “T” - Espessura do Aquífero	102
5.4.7. Espacialização do método GALDIT	105
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
REFERÊNCIAS	107

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO

Nesse capítulo, será abordado o contexto atual das águas subterrâneas e sua relevância para o abastecimento hídrico da Ilha do Maranhão, indicando algumas problemáticas ambientais decorrentes da superexploração dos aquíferos e do uso e ocupação do solo de forma desordenada. Além disso, foi discutida a relevância do desenvolvimento de pesquisas com enfoque na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, indicando a problemática que impulsionou o desenvolvimento desta pesquisa, bem como as hipóteses levantadas.

1.1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A água é uma fonte imprescindível para o abastecimento humano e através dos tempos a busca por este recurso tem se intensificado pela elevada procura por água de boa qualidade associado ao desafio frente às mudanças climáticas com alterações significativas na quantidade de chuvas em diversas partes do mundo.

Diante dessa situação, a humanidade tem como tarefa garantir o acesso da mesma para todos, isso por sua vez, se torna complexo diante da crescente demanda populacional mundial, exigindo assim, a busca por novas fontes para que se possa ter um fornecimento com qualidade e quantidade suficientes.

No Brasil está concentrada cerca de 12% de toda água superficial do planeta, entretanto, sua distribuição em todo território não se apresenta de forma homogênea. Um exemplo disso é a região hidrográfica da Amazônia que representa aproximadamente 81% da disponibilidade hídrica do país, enquanto a região do semiárido brasileiro apresenta déficits significativos, segundo Costa (2011).

O Estado do Maranhão, o qual possui um número significativo de rios e riachos de regimes perenes e intermitentes, a exemplo de outros estados brasileiros, criou leis específicas para tratar de questões de gestão dos recursos hídricos de forma regional, tendo como eixos normativos a Lei Estadual nº 8.149/2004 que trata dos Recursos Hídricos do Estado e do Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos (MARANHÃO, 2004), que estabelece diretrizes para a gestão deste recurso. No que se refere à legislação que trata das águas subterrâneas, tem-se a Resolução CONAMA nº 396 de 03 de abril de 2008 (BRASIL, 2008) e o Decreto Estadual nº 34.847 de 14 de maio de 2019 (MARANHÃO, 2019), onde foram estabelecidas as diretrizes para enquadramento das águas subterrâneas, das condições e padrões de qualidade das águas, outorga dentre outras. No que se refere sobre o uso das águas subterrâneas no Maranhão assinala-se que apesar de complementares, tem atendido uma demanda significativa, abastecendo mais de 76% das cidades maranhenses, com fornecimento hídrico da ordem de 85.106 m³/ano, conforme Costa (2003). Contudo, dados disponibilizados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente- SEMA, apontam que esse percentual passou para uma ordem de 85% da demanda hídrica para fins de consumo humano.

A Ilha do Maranhão, situada na porção central do Golfão Maranhense, possui rios de pequena vazão, de caráter estuarino com entrada de macromarés com amplitude de aproximadamente 7 metros em períodos de 6 em 6 horas onde se encontram as bacias hidrográficas do rio Bacanga, do Anil, do Paciência, do Tibiri, dos Rios dos Cachorros e mais uma dezena de outros rios e riachos presentes no ambiente fluviomarinho em decorrência da entrada da cunha salina no continente.

O rio Bacanga é fortemente influenciado pelas marés, as quais chegam a atingir cotas de sete metros de amplitude, condicionando a formação de uma cunha de água salgada no interior da bacia hidrográfica por ocasião das preamares (PEREIRA, 2006).

Contudo, o abastecimento de água para fins de consumo humano na Ilha do Maranhão são advindos, majoritariamente, das reservas de águas subterrâneas dos aquíferos Barreiras e Itapecuru que armazenam em seus poros considerável volume de água doce. O conhecimento da relação entre o número de poços tubulares e a superexploração das águas subterrâneas em áreas costeiras é de fundamental importância para proteção dos aquíferos, para prevenir a entrada da cunha salina.

O homem vem ocupando os espaços geográficos, na maioria das vezes, de forma indiscriminada e sem conhecer as vulnerabilidades e potencialidades do espaço ocupado. Nas últimas décadas a ação antrópica na bacia do rio Bacanga se intensificou, devido ao

desenvolvimento socioeconômico (instalações de empreendimentos Industriais) promovendo uma crescente quantidade de perfurações de poços tubulares nesta área.

Desta forma, torna-se relevante o entendimento da dinâmica da água subterrânea para avaliar o avanço da cunha salina, para isso utilizando-se do método GALDIT visando subsidiar a gestão das águas subterrâneas na Ilha do Maranhão.

Hipótese

- A superexploração, por meio de perfuração de poços tubulares, no curso inferior do rio Bacanga poderá favorecer a intrusão da cunha salina nos aquíferos Barreiras e Itapecuru para o interior da Ilha do Maranhão.
- O represamento da água salgada pela barragem do rio Bacanga, situada em sua foz, vem promovendo a intrusão salina ao longo das margens do referido rio.
- As macromarés favorecem a entrada da cunha salina ao longo das margens do rio Bacanga.

1.2. OBJETIVOS

Avaliar a vulnerabilidade à intrusão salina no curso inferior da bacia do rio Bacanga na cidade de São Luís/MA, utilizando o GALDIT.

Especificamente, buscou-se:

- Cadastrar os poços tubulares e cacimba na área do curso inferior da bacia do rio Bacanga visando atualização do banco de dados dos poços;
- Levantamento dos dados hidrodinâmicos do comportamento do aquífero na área;
- Realizar análise físico-química das águas dos poços tubulares selecionados;
- Elaborar a carta de vulnerabilidade à intrusão da cunha salina na bacia;
- Apresentar documentos com informações hidrogeológicas e cartográficas que permitam aos órgãos governamentais estabelecerem dispositivos legais para preservação e conservação das áreas vulneráveis à intrusão salina.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

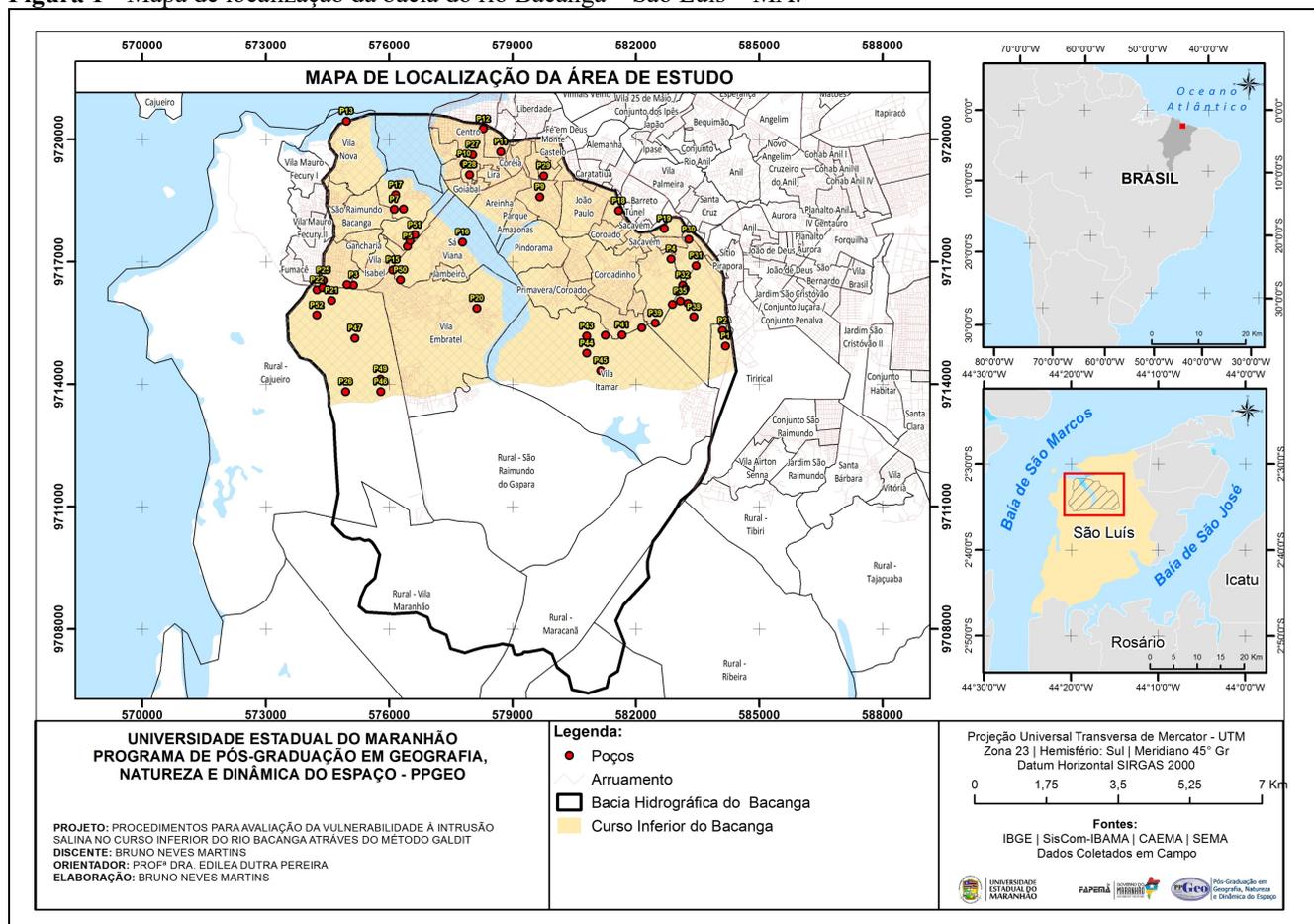
No presente capítulo, são apresentados os aspectos gerais relativos à área de estudo, tais como: localização, clima, geomorfologia, pedologia, recursos hídricos e o uso do solo. Ademais, são abordados temas mais específicos e imprescindíveis à compreensão desta pesquisa, como a situação do contexto geológico e hidrogeológico.

2.1. ASPECTOS GERAIS

A bacia do rio Bacanga, localiza-se no município de São Luís, na porção noroeste da Ilha do Maranhão, delimitado pelos pares de coordenadas geográficas: 02°31'50.85”S a 02°34'34.11”S e 44°18'14.22”W a 44°28'92.00” W, SGR – Sistema Geodésico de Referência – SIRGAS2000.

O acesso rodoviário principal se faz pela rodovia federal BR - 135, após atravessar o Estreito dos Mosquitos, canal que liga a Ilha do Maranhão ao continente maranhense (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA.



Fonte: Martins, 2018

Clima

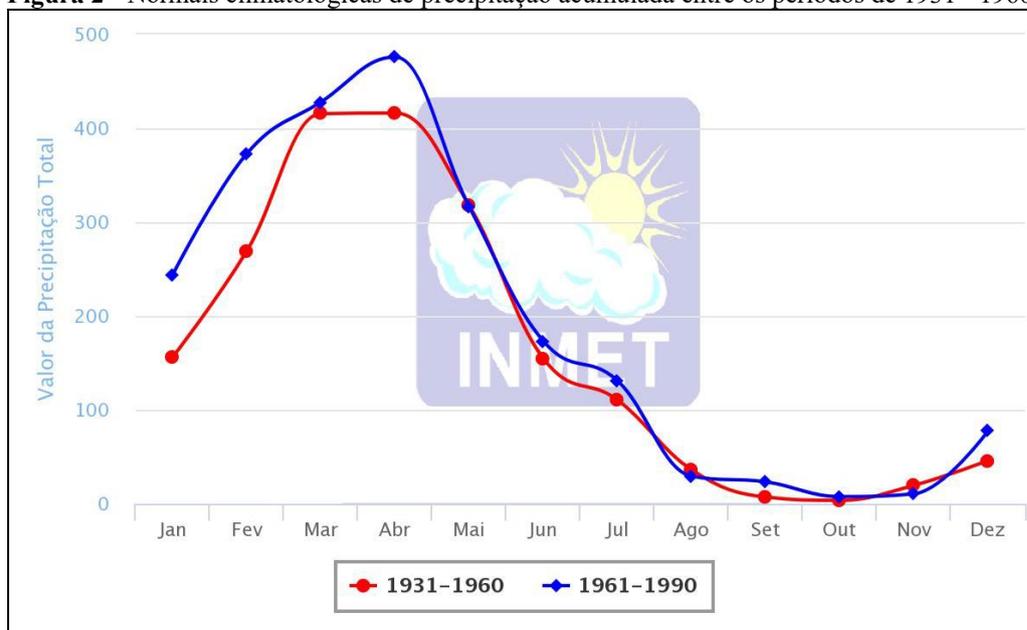
Com base na classificação de Köppen, a Ilha do Maranhão insere-se no tipo Aw quente e úmido com duas estações bem distintas: uma seca (inverno) e outra chuvosa (verão), além do subtipo climático Aw' quente e úmido com chuvas de verão e outono, nas baixadas e no litoral.

A precipitação na Ilha do Maranhão geralmente ultrapassa os 2.000mm/ano, sendo o período chuvoso demarcado nos meses de janeiro a junho e o período seco de julho a dezembro (Figura 02).

A análise da série temporal dos dados climatológicos do período 2000-2016 da rede do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, indicaram os anos de 2009 e 2011 como os anos excepcionalmente chuvosos com o acumulado pluviométrico anual de 2.847,8 e 2.713,3 mm respectivamente (Figura 03).

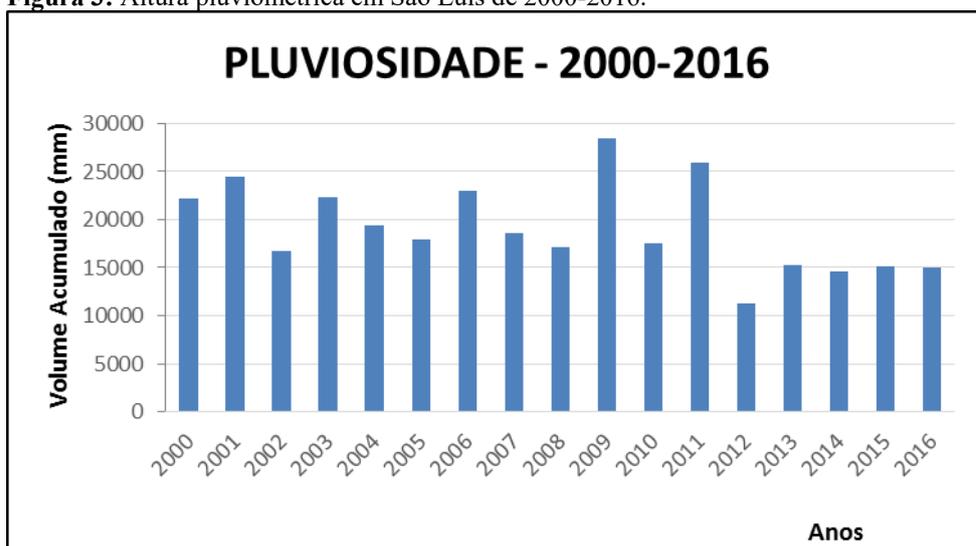
As direções predominantes dos ventos são nas direções NE e E ao longo de todo o ano, com velocidades mais elevadas nos meses secos, quando as médias mensais se situam em torno de 7m/s. Na estação chuvosa, há maior ocorrência de calmarias e de ventos dos setores menos frequentes de SE a NW. A umidade média anual do ar é em torno de 80% (LEBAC, 2012).

Figura 2 - Normais climatológicas de precipitação acumulada entre os períodos de 1931 - 1960 e 1961 - 1990.



Fonte: INMET (2018).

Figura 3: Altura pluviométrica em São Luís de 2000-2016.

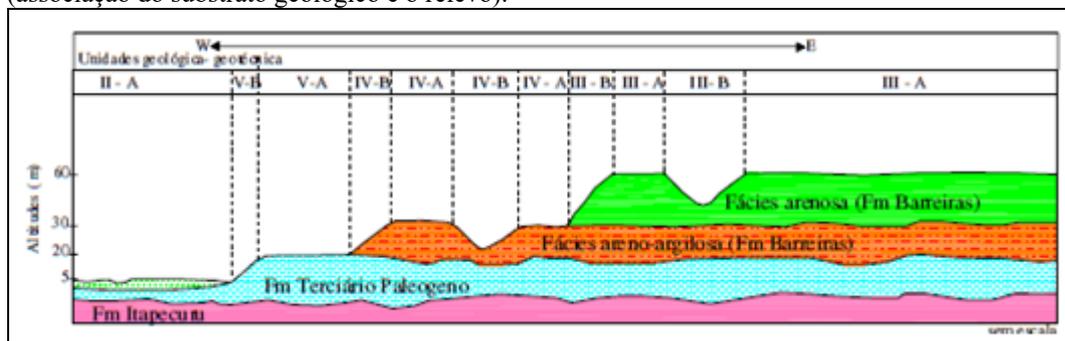


Fonte: INMET (2017).

Geomorfologia

A geomorfologia da Ilha do Maranhão, mais especificamente na área de estudo, situa-se no centro da Planície Fluviomarinha do Golfão Maranhense. O curso inferior do rio Bacanga encontram-se as altitudes de 60-40 m, as formas de tabuleiros, nos níveis de 20 a 30 metros as suaves colinas e nas baixas altitudes (0 - 5m) as planícies fluviomarinhas (Figura 04, Quadro 01), conforme Pereira (2006). As formas de relevo encontram-se intensamente dissecadas. Segundo Bezerra (2011) as planícies fluviomarinhas são ocupadas por manguezais e influenciadas por agentes oceanográficos como correntes e marés; as planícies fluviais são faixas rebaixadas sujeitas a inundações periódicas pelo rio Bacanga e seus afluentes durante o período chuvoso e pelas marés.

Figura 4 - Seções esquemáticas ilustrando a distribuição espacial das unidades geológicas-geotécnicas (associação do substrato geológico e o relevo).



Fonte: Pereira (2006).

Quadro 1 -Compartimentação do relevo da bacia do rio Bacanga – MA.

DOMÍNIO MORFOESTRUTURAL	UNIDADE GEOMORFOLÓGICA	SUBUNIDADES LOCAIS DO RELEVO
Bacia Costeira de São Luís.	Planície Fluvio-marinha do Golfão Maranhense.	Tabuleiros e colinas dissecadas, planícies fluviais e fluvio-marinhas.

Fonte: Pereira (2006).

Solos

Conforme o levantamento pedológico realizado por Maranhão (1998) na escala de 1:100.000, com adaptações para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) na área de estudo destacam-se os Argissolos Vermelho-Amarelos Concrecionários, Gleissolos, Neossolos Quartzarênicos e Solos Indiscriminados de Mangue. Conforme Pereira (2006) os solos da área de estudo são residuais e caracterizam-se por sua expressiva “concentração de ferro nos sedimentos areno-argilosos, argilo-arenosos, areia fina, sendo, geralmente, capeado por extensas formações de laterita (petroplintitas), cuja gênese está diretamente relacionada com as condições geológicas e do clima tropical”.

Ocupação Antrópica

Quanto ao processo de ocupação antrópica, a bacia do rio Bacanga no decorrer das décadas, possui quadros elevados de ocupação. Para Diniz (1993), um período de grande crescimento populacional ocorreu nas décadas de 50 e 60 do século XX, devido à migração de famílias vindas do sertão nordestino, expulsas da grande seca dos anos 50.

No ano de 1969, o Governo do Estado do Maranhão, iniciou a construção de uma barragem, a qual ficou conhecida como Barragem do Bacanga - interferência esta que alavancou o processo de ocupação da bacia, uma vez que diminuiu as distâncias entre a rodoviária de São Luís e o Porto do Itaqui, além de favorecer condições de povoamento das margens do rio Bacanga. Ferreira (2007) aponta que:

[...] os principais objetivos da construção da barragem foram a ligação rodoviária entre São Luís e o porto de Itaqui, reduzindo a distância de 36 km para 9 km; favorecer a ocupação imobiliária, decorrente do crescimento da cidade, para o estabelecimento de novas áreas urbanas [...](FERREIRA, 2007).

A barragem facilitou o processo de expansão urbana que foi se consolidando nas áreas circunvizinhas, graças ao controle da elevação da maré e, sobretudo a instalação de grandes empreendimentos como a Vale S/A, Porto do Itaqui e o Consórcio de Alumínio do Maranhão – ALUMAR, que juntos contribuíram significativamente para o povoamento da bacia, assim como para o crescimento populacional da Ilha do Maranhão.

[...] Após a construção da Barragem do Bacanga, o nível da água do reservatório foi mantido, aproximadamente, na cota 2,5 metros, o que permitiu a ocupação de áreas marginais ao reservatório que eram alagadas durante as preamares. A formação de um lago artificial através do represamento do rio auxiliou no processo de urbanização e saneamento da cidade. Em 1973, a inauguração da Avenida Médici dentro dos limites da área inundada do lago obrigou a manutenção do nível da lâmina de água bem abaixo da sua real capacidade de acumulação e contribuiu ainda mais para a ocupação de áreas que naturalmente ficavam submersas na maré enchente, como é o caso dos bairros de Areinha, Coroado e Coroadinho (FERREIRA, 2007).

Desta forma, a área de estudo destaca-se por possuir grandes aglomerados populacionais (Foto 1), com destaque para o bairro Coroadinho, com um grande número de famílias, além dos bairros Coroado e Sá Viana que surgiram graças a interferência da barragem. O baixo curso apresenta importantes áreas de interesse público como o Aeroporto, o Terminal Rodoviário e a Universidade Federal do Maranhão - UFMA, além de áreas de interesse econômico como a Área do Porto do Itaqui, Vale S/A e de interesse ambiental. Destaca-se o Parque Estadual do Bacanga criado em 1944 pelo presidente Getúlio Vargas como área estratégica para a proteção e conservação dos mananciais superficiais e subterrâneos (Foto 2), vem passando por reduções significativas de seus limites, uma redução de mais de 20% da área original dando lugar a áreas de ocupações irregulares (consolidada em UC e consolidada). O Quadro 2 e Figura 05 indicam as respectivas áreas e porcentagens das classes de uso e cobertura do solo do curso inferior do rio Bacanga, com base nas imagens Pleiade ONU Habitat/UFMA.

Foto 1- Grandes aglomerados populacionais próximos ao curso do rio Bacanga.



Fonte: Martins, 2018.

Foto 2- Vista aérea do Parque Estadual do Bacanga



Fonte: Martins, 2018.

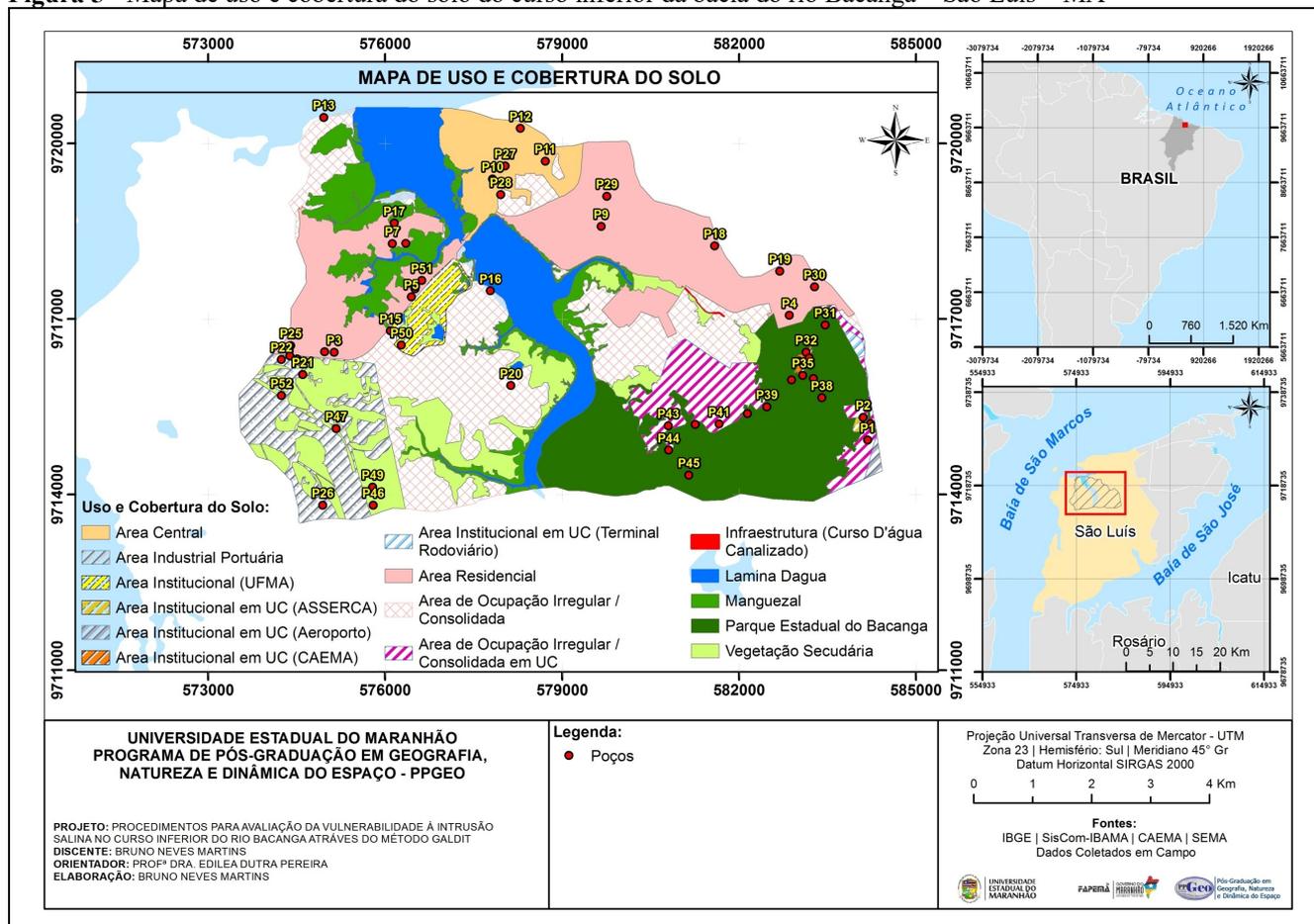
A distribuição destas categorias de uso e cobertura do solo e percentuais na área de estudo pode ser identificada na (Tabela 1) e mapa abaixo (Figura 5):

Tabela 1 -Distribuição das classes de uso e cobertura do solo do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA

Classes de Uso e Cobertura	Área (km ²)	%
Área Institucional (Aeroporto)	0,1031	0,19
Área Institucional (ASSERCA)	0,0595	0,11
Área Institucional em UC (CAEMA)	0,0697	0,13
Área Institucional (Terminal Rodoviário)	0,0782	0,14
Área de Ocupação Irregular / Consolidada	9,6853	17,48
Área Central	2,6416	4,77
Área de Ocupação Irregular / Consolidada em UC	2,7926	5,04
Área Industrial Portuária	2,9574	5,34
Área Institucional (UFMA)	0,8688	1,57
Infraestrutura (Curso D'água Canalizado)	0,0079	0,01
Parque Estadual do Bacanga	9,6459	17,41
Vegetação Secundária	5,8646	10,59
Área Residencial	10,6603	19,24
Lamina D'água	5,8005	10,47
Manguezal	4,1583	7,51
Área Total	55,3937	100,00

Fonte: Martins, 2018

Figura 5 - Mapa de uso e cobertura do solo do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís – MA



Fonte: Martins, 2018

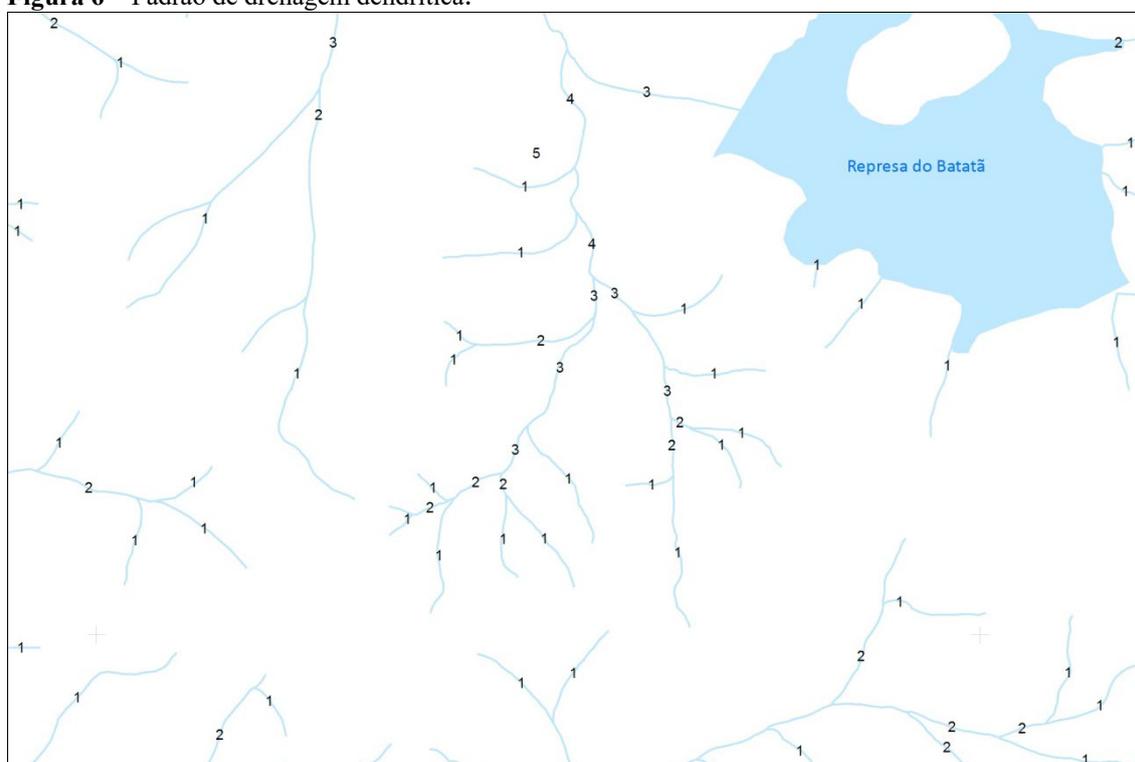
Recursos Hídricos

Entende-se a bacia hidrográfica como uma unidade natural de análise da superfície terrestre passível de ocorrerem interações dos processos atuantes na esculturação do relevo (COOKE E DOORNKAMP, 1990; CHORLEY, 1984; CHRISTOFOLETTI, 1980).

A rede de drenagem e as características do meio físico configuram-se como elementos fundamentais na análise da paisagem, refletidos nos índices morfométricos. As informações quantitativas indicaram o comportamento da dinâmica da água na bacia.

A bacia do rio Bacanga tem uma área de 105,57km² e perímetro de 44,29km, padrão dentrítico e hierarquia de 5^a ordem (Figura 6), conforme *Strahler* (1952) e padrão de escoamento exorréico (CHRISTOFOLETTI, 1980).

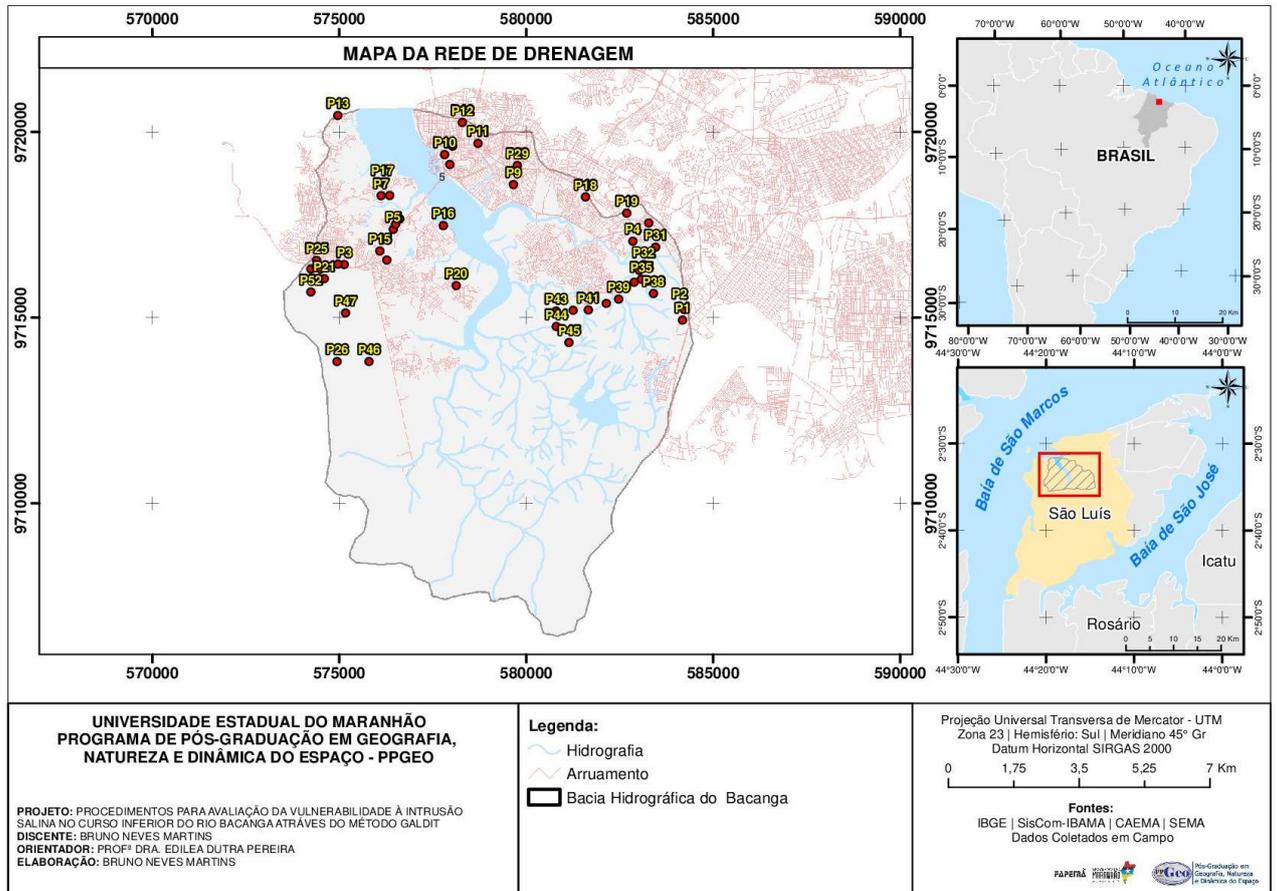
Figura 6 – Padrão de drenagem dendrítica.



Fonte: Martins, 2018

Destaca-se que bacia do rio Bacanga se encontra em ambiente estuarino, sujeita à entrada periódica da maré com amplitude de até 7 metros (Figuras 7 e 8). Pritchard (1967) classifica como ambiente estuarino um corpo de água costeiro, semifechado, o qual possui uma ligação livre com o mar aberto e no interior do qual a água do mar se dilui de forma mensurável, com água doce proveniente de drenagem terrestre.

Figura 7 – Mapa de Drenagem da Bacia do rio Bacanga - São Luís - MA.



Fonte: Martins, 2018

Figura 8- Desembocadura do rio Bacanga com entradas periódicas da maré – São Luís.



Fonte: Imagem Google Earth (2018).

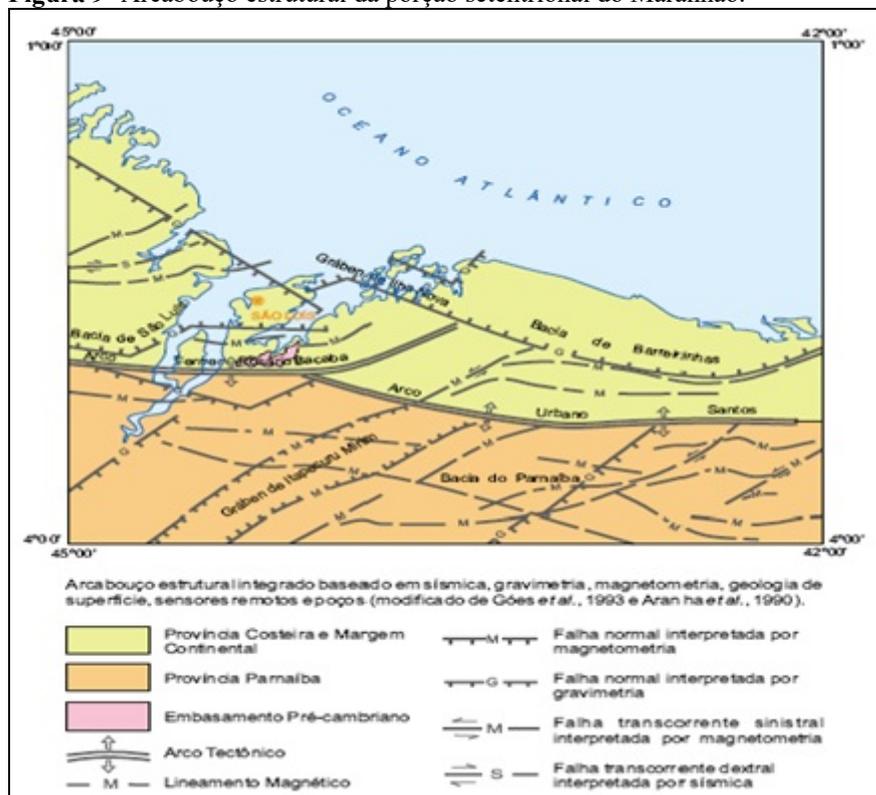
2.2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Ilha do Maranhão é parte integrante da Bacia Costeira de São Luís – Grajaú, a qual foi formada por rifteamento fissural durante o Cretáceo (RODRIGUES *et al.*, 1994), (KLEIN e SOUSA, 2012). Góes e Rosseti (2001) reconheceram a Bacia Costeira, através de dados de subsuperfície, com base em dados geofísicos através de perfis de raios gama.

Confronta-se ao norte pela plataforma continental, a sul pelos Altos Estruturais Arco Ferrer - Urbano Santos, disposto aproximadamente E-W, a leste pelo Horst de Rosário e a oeste pelo Arco de Tocantins (PEREIRA, 2006), além disso, Rodrigues *et al.* (1994) destacaram que a Bacia de São Luís ocupa aproximadamente 33.000 km² da porção continental e possui uma coluna sedimentar de 4.500 m (Figura 09).

A sedimentação na Bacia de São Luís iniciou-se com as rochas do Cretáceo do Grupo Itapecuru (Unidade Indiferenciada, Formação Alcântara e Formação Cujupe) e do Neógeno com os arenitos do Grupo Barreiras e, finalmente, pelos Depósitos Quaternários representados pelos aluvionares, de mangues, eólicos litorâneos e litorâneos (Quadro 02; Figuras 10 e 11). A estratigrafia é descrita conforme proposta (Klein e Sousa *et al.*, 2012; Rossetti, 2001 e Pereira, 2006).

Figura 9- Arcabouço estrutural da porção setentrional do Maranhão.



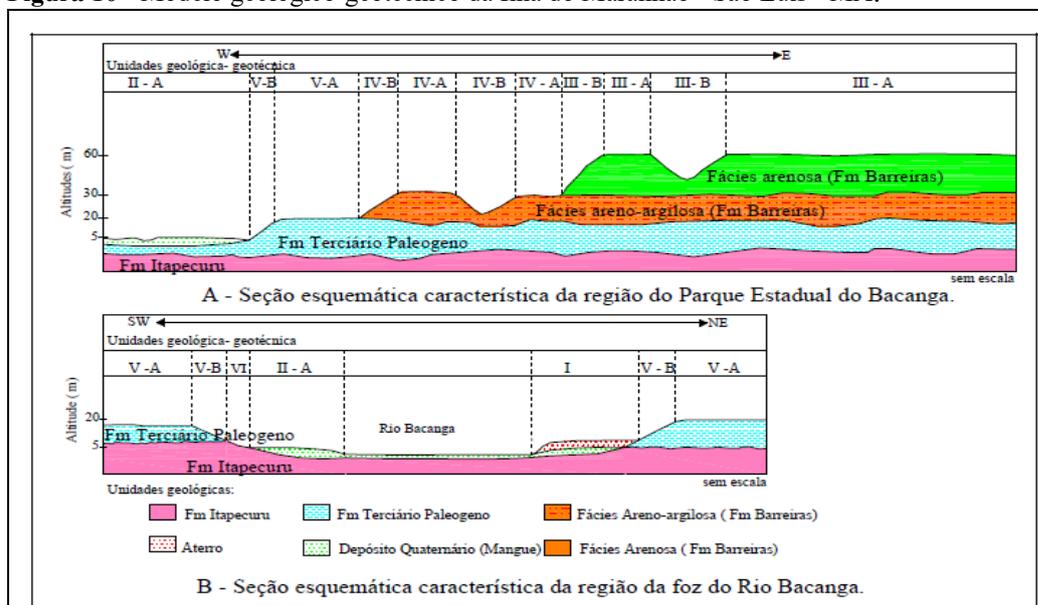
Fonte:Goes *et al.* (1990) e Aranha *et al.* (1993) *apud* Veiga Jr. (2000).

Quadro 2- Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís-MA.

Idade		Estratigrafia		
QUATERNÁRIO	Pleistoceno /Holoceno	Depósitos Aluvionares Depósitos Mangues Depósitos Eólicos Litorâneos Depósitos Litorâneos Depósitos Coluvionares		
		NEÓGENO	Mioceno Plioceno	Grupo Barreiras
CRETÁCEO	Cenomaniano Maastrichtiano			GRUPO ITAPECURU
	Albiano	Neo	Formação Alcântara	
		Meso		
		Eon	Unidade Indiferenciada	
Aptiano		Formações Codó e Grajaú		
Pré-Cambriano e Paleozóico		Embasamento		

Fonte: Klein e Sousa *et al.* (2012); Rossetti (2001); Pereira (2006).

Figura 10 - Modelo geológico-geotécnico da Ilha do Maranhão - São Luís - MA.



Fonte: Pereira (2006).

2.2.1. Grupo Itapecuru

O Grupo Itapecuru é composto pela Formação Cujupe, Formação Alcântara e Unidade Indiferenciada. Representado por uma espessa sucessão sedimentar, constituída por argilitos e

arenitos finos de origens flúvio deltaica e estuarina – lagunar, representando respectivamente as seqüências deposicionais (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997). Nos trabalhos de Rodrigues *et al.* (1994) o Grupo Itapecuru é considerado como Formação Itapecuru.

Segundo Rossetti e Truckenbrodt (1997); Rossetti (2001) e Costa (2006) apontaram a deposição de idade incerta (Cretáceo Superior - Neógeno Inferior), consistindo de aproximadamente 25 a 40m de arenitos caulíníticos, com texturas predominantemente fina a muito fina, bem selecionados, com colorações branca ou rósea a amarelada, os quais intercalaram-se a argilitos de cores branca e cinza a violácea. Subordinadamente ocorreu conglomerados intraformacionais (ROSSETTI e TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI, 2001).

A exposição desse grupo encontra-se nos paredões das falésias de Alcântara, com espessura de 20m, onde se encontra sua seção-tipo. Em São Luís ocorre na falésia da Praia do Boqueirão, ao lado do Porto de Itaqui e na praia de São Francisco, Praia da Guia, Praia do Araçagi e ao longo da bacia do Rio Bacanga (Figura 11)

2.2.2. Grupo Barreiras

Os sedimentos da Formação Barreiras são areno-argilosos de coloração róseo-avermelhada, siltitos maciços de cores amarela a ocre, ferruginizados e, ocasionalmente, conglomeráticos, desorganizados. Apresentam um perfil imaturo, com sedimentos inconsolidados, argilosos, com areias disseminadas, amarelados a avermelhados, com nódulos e blocos de concreções ferruginosas (RODRIGUES *et al.*, 1994). Em 2012 essa Formação passou ao *status* de Grupo, conforme (KLEIN e SOUSA, 2012).

As sucessões sedimentares estuarinas que gradam para cima a depósitos fluviais como consequência da transladação de ambientes deposicionais mais proximais sobre estuarinos durante os estágios finais de período de mar alto. Ainda, como verificado no norte do Brasil, os depósitos estuarino-fluviais da Formação Barreiras são limitados em seu topo por superfície de descontinuidade contendo paleossolo lateríticos onde o nível concrecionário apresenta-se sob forma de colunas verticais que atingem até 4m de espessura, mas o qual pode apresentar diferentes graus de preservação ao longo das falésias (ROSSETTI, GÓES e VALERIANO, 2007).

Rossetti (2005) realizou estudos para identificação do paleoambiente baseado na litologia, estruturas e relações de fácies, associado a fósil traço, indicando um sistema transicional marinho com significantes entrada de água doce, típico de ambiente estuarino.

O Grupo Barreiras aflora, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros (Figura 11).

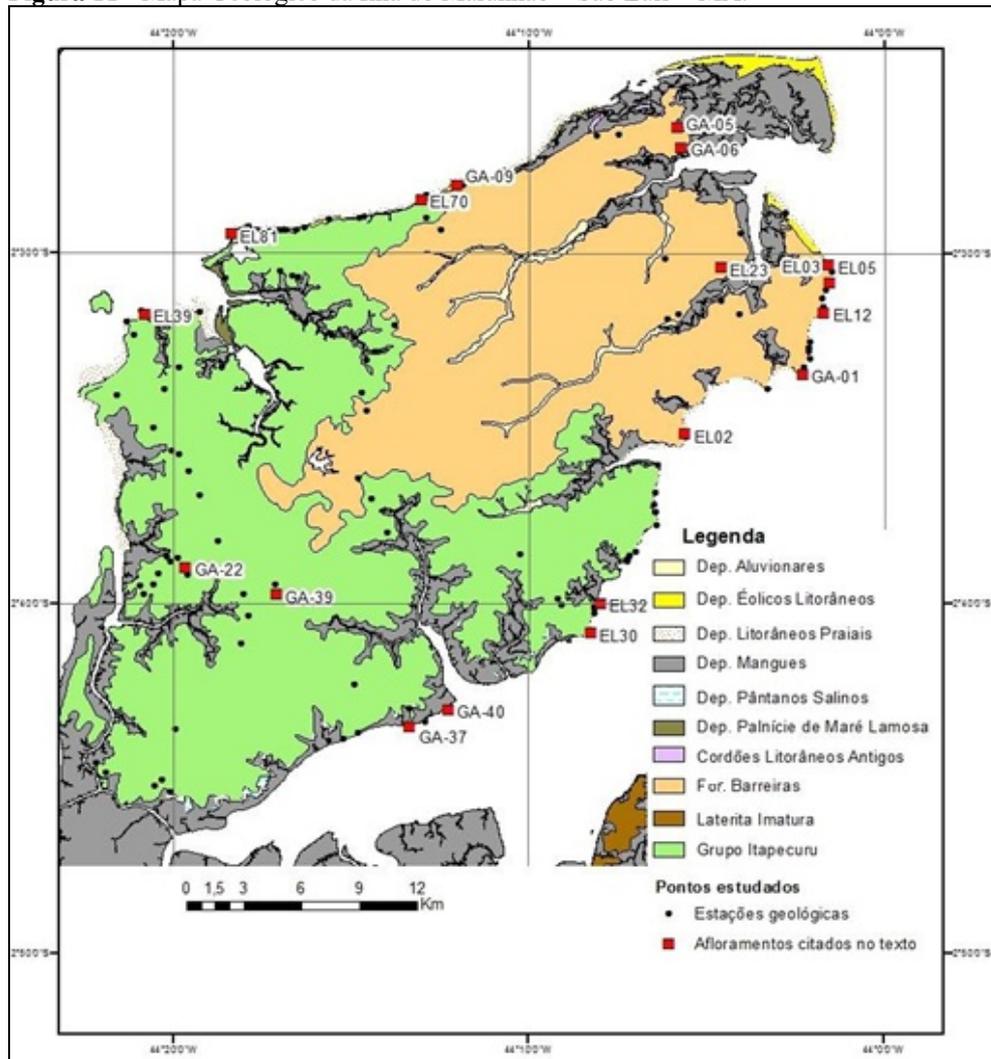
2.2.3. Depósitos Quaternários

As coberturas quaternárias holocênicas, na área trabalhada, englobam os depósitos diferenciados em: depósitos de mangues (QHm), depósitos flviomarinhos (QHfm), depósitos aluvionares e coluvionares.

Esses depósitos estão localizados próximos ao litoral, geralmente submetidos à ação das marés e estão associados aos depósitos de cordões litorâneos. São constituídos por lamas arenosas, plásticas, não adensadas, maciças e bioturbadas, areias finas, quartzosas. São originados por processos de tração/suspensão subaquosa, pela ação das marés; representando fácies de intermaré/submaré rasa e pela migração de dunas de acreção lateral; constituem fácies de canal e barras de canal (VEIGA JR., 2000). Os manguezais são típicos e extensos nessas áreas, principalmente no curso inferior da bacia do Rio Bacanga.

Os depósitos quaternários ocorrem em ambientes fluviais, flviomarinho e marinhos litorâneos e recobrem todas as demais unidades estratigráficas aflorantes na Bacia de São Luís (Figura 11).

Figura 11 - Mapa Geológico da Ilha do Maranhão – São Luís – MA.



Fonte: CPRM (2017), com modificações.

2.2.4. Geologia Estrutural

Os sistemas de lineamentos, a partir de fotointerpretação, indicaram direção preferencial para NE-SW e NW-SE e menos frequentes nas direções NNE-SSW e WNW-ENE, nos terrenos cretácicos e terciários da Bacia de São Luís (RODRIGUES et al., 1994). Esta estruturação está marcada por alinhamentos de drenagem na bacia do rio Bacanga e rio Paciência.

2.3. O SISTEMA AQUÍFERO ITAPECURU E BARREIRAS

As informações acerca da hidrogeologia local foram obtidas através de pesquisas

realizadas anteriormente pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM, estudos realizados por Pereira (2006), além de embasar-se nos conhecimentos geológicos e informações coletadas através de dados de perfurações de poços tubulares e manuais existentes.

Na Ilha do Maranhão predomina o Aquífero livre Barreiras e o semi-confinado Itapecuru.

2.3.1. Aquífero Itapecuru e Aquífero Barreiras

No curso inferior da bacia do rio Bacanga, segundo Rodrigues *et al.* (1994), a unidade hidrogeológica predominante na área é o aquífero Itapecuru, o qual é conhecido por não ser um bom aquífero para exploração de água subterrânea, apesar de fornecer água para o abastecimento de pequenas áreas. Esta formação possui limitações em armazenar água subterrânea. Destaca-se como área favorável a exploração áreas com espessa camada de sedimentos Neógenos, oriundos do Grupo Barreiras, os quais são essencialmente arenosos.

Em função de suas características litológicas, o Aquífero Itapecuru é considerado como de baixo potencial, todavia, conforme Rodrigues *et al.* (1994) seu potencial hidrogeológico é classificado como satisfatório para poços tubulares com demanda de vazão inferior a 40m³/h e profundidades de até 250 metros.

Através da tabela com os parâmetros dos poços tubulares da Ilha do Maranhão, Rodrigues *et al.* (1994) elenca os valores médios encontrados nessa formação (Tabela 02):

Tabela 2–Valores médios dos parâmetros dos poços do Aquífero Itapecuru na Ilha do Maranhão – Ma.

Profundidade (m)			Nível Estático (m)			Rebaixamento (m)		
Mínima	Média	Máxima	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
36	85	185	0,5	19	51	0,5	9	56

Fonte: Rodrigues *et al.* (1994).

Com relação às constantes hidrodinâmicas para o Aquífero Itapecuru, foram determinadas por Rebouças e Silva (1972) na área do Itaqui, em teste realizado pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA, uma Transmissividade ($T= 7 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), Condutividade Hidráulica ($K= 1,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) e um Armazenamento de $S= 3,5 \times 10^{-2}$.

Por sua vez, o aquífero Barreiras é considerado como a unidade hidrogeológica mais promissora à captação de água na Ilha do Maranhão, onde “sua litologia é constituída, a partir da base, por arenitos pouco consolidados, vermelhos e amarelados, apresentando leitos de

areias e argilitos continentais” (RODRIGUES *et. al.*, 1994).

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo, apresentam-se os conteúdos fundamentais ao entendimento tanto dos procedimentos metodológicos propostos quanto dos resultados obtidos, com enfoque em cinco temas centrais, quais sejam: espaço geográfico e Bacia do Bacanga, as águas subterrâneas, ordenamento jurídico brasileiro e vulnerabilidade de aquíferos.

3.1. ESPAÇO GEOGRÁFICO E A BACIA DO RIO BACANGA: formas, processos, estruturas, funções e seus reflexos ambientais.

A partir da concepção de Milton Santos (1978) sobre o Espaço e suas estruturas (Formas, Processos, Estruturas e Funções) constatam-se as seguintes observações na bacia do rio Bacanga:

Forma/Estruturas: Partindo da premissa da forma designar o aspecto visível, a bacia do rio Bacanga se apresenta por formas variadas, uma vez que seus espaços são compostos por um aglomerado de conjuntos residenciais, ocupações irregulares, unidades de conservação (Parque Estadual do Bacanga e APA do Maracanã), equipamentos sociais, como: Universidade Federal do Maranhão - UFMA, infraestruturas hidráulicas da barragem do Bacanga, reservatório Batatã; e a antiga Estrada de Ferro Norte/Sul, em que seu conjunto de formas retratam um mosaico variado da composição espacial da bacia.

Função: É a atividade desempenhada pelo objeto criado. A bacia do rio Bacanga possui como função principal ser uma unidade produtora de água. Tal importância singular da bacia reflete no reservatório Batatã e no Sistema de Abastecimento Público do Sacavém, os quais são responsáveis por cerca de 20% de toda água consumida no município de São Luís. Na bacia está também inserida a Universidade Federal do Maranhão, além de ser via de escoamento de cargas para o Porto do Itaqui.

Processos: É a ação contínua entre os objetos e a sociedade que compõem o aspecto dos processos na bacia, desta forma, a bacia se reflete como unidade produtora de água, o que em seu processo histórico sofreu e sofre transformações ambientais.

Assim, diante dos aspectos supra em que Milton Santos (1978) sugere o estudo do Espaço Geográfico – enquanto totalidade – em que a ocupação deste pode refletir em consequências ambientais.

Neste sentido, diante do crescimento populacional e conseqüentemente da demanda hídrica, a intrusão da cunha salina pode ser exemplificada como exemplo prático de sérias conseqüências ambientais em decorrência do uso desordenado do solo.

3.2. AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

O Estado do Maranhão, o qual possui um número significativo de rios e riachos de regimes perenes e intermitentes, a exemplo de outros estados brasileiros, criou leis específicas para tratar de questões de gestão dos recursos hídricos de forma regional, tendo como eixos normativos a Lei Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, Lei nº 8.149 de 15 de junho de 2004 (MARANHÃO, 2004), que estabelece diretrizes para a gestão deste recurso, e em relação à legislação que trata das águas subterrâneas, tem-se a Resolução CONAMA Nº 396 de 03 de abril de 2008 (BRASIL, 2008) e o através do Decreto Estadual Nº 34847 DE 14 de maio de 2019 (MARANHÃO, 2019), onde foram estabelecidas as diretrizes para enquadramento das águas subterrâneas, das condições e padrões de qualidade das águas, outorga, fiscalizações e outras.

3.2.1. Águas subterrâneas: domínios e competências

O termo competência pode ser entendido como “a faculdade juridicamente atribuída a uma entidade ou a um órgão ou agente do Poder Público para emitir decisões. Competências são as diversas modalidades de poder de que servem os órgãos ou entidades estatais para realizar suas funções” (SILVA, 1998).

Conforme a Constituição Federal (artigo 22, inciso IV), a União dispõe competência legislativa privativa na temática das águas, seja superficiais e subterrâneas, ou seja, tem habilitação exclusiva para editar normas jurídicas, regras e fixar princípios para disciplinar as atividades políticas e administrativas referentes a esta temática (FERREIRA, 1990).

A partir da Constituição Federal de 1988 as águas subterrâneas deixaram de pertencer por acessão ao proprietário do terreno, que até então delas usufruía livremente. Salvo prejuízos aos aproveitamentos anteriores, foram declaradas como bens das unidades federativas, ou seja, foram classificadas em seu Art. 26, I, como bens públicos de uso comum, podendo ser utilizadas por todos, tornaram-se inalienáveis, portanto, não podem ser vendidas, transferidas ou doadas. Extinguiu-se assim, o direito de propriedade privada, reconhecido no ordenamento jurídico anterior e seu uso se sujeita a outorga, a água pode ser utilizada de forma gratuita ou retribuída (VILLAR, 2008, p. 58).

A Constituição brasileira em seu Art. 23, VI, afirma que o dever de proteger o meio ambiente é uma obrigação de todas as entidades da federação, não restando dúvidas de que a

proteção das águas subterrâneas é de responsabilidade das três esferas de poder: União, Estados e Municípios. Todavia, por haver uma carência de políticas federais sobre a temática que forneça diretrizes básicas para gestão, “a tutela jurídica das águas subterrâneas acabou sendo desempenhada quase que exclusivamente, de maneira completamente distinta, pelos estados, mesmo quando partilham o mesmo aquífero” (VILLAR, 2008).

Como forma de conciliar os conflitos de competências no que concerne aos aquíferos transfronteiriços ou que pertençam a mais de um estado, a Resolução nº 15/2001 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) afirma que caberá ao Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos articular a integração dos diversos órgãos dos governos federal, estaduais e do Distrito Federal.

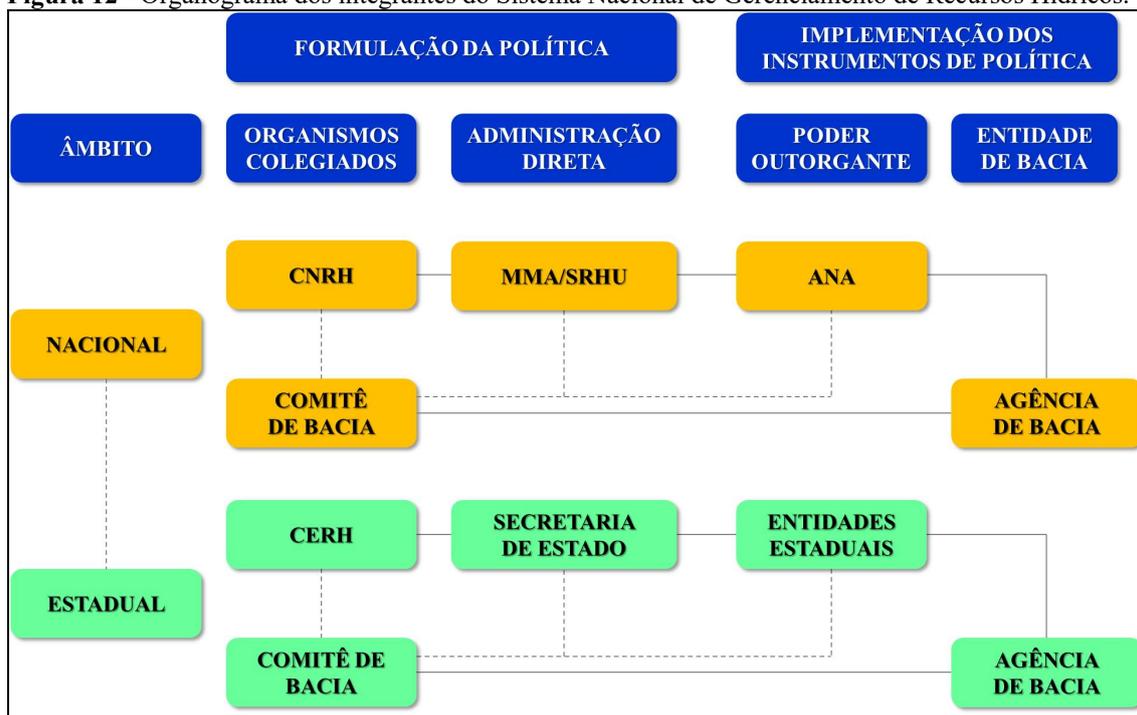
3.2.2. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH)

O Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos ocorre na forma de instituições, que têm em suas estruturas a participação de diferentes setores da sociedade, tendo, desta forma, como objetivo maior, a gestão descentralizada do uso da água, onde todos têm o direito constitucionalmente garantido de participar das negociações e das tomadas de decisões.

A Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997), a qual institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, a partir do art. 32 cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que tem como objetivos: I - coordenar a gestão integrada das águas; II - arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos; III - implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos; IV - planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e V - promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Conforme o art. 33 da Política Nacional de Recursos Hídricos, alterado pela Lei Federal nº 9.984, de 17 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), os membros integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos são: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos; a Agência Nacional de Águas; os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal; os Comitês de Bacia Hidrográfica; os órgãos dos poderes públicos federal, estaduais, do Distrito Federal e municipais cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos; e as Agências de Água (Figura 12).

Figura 12 - Organograma dos integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.



Fonte: MMA (2017).

Para Villar (2008) o Conselho Nacional de Recursos Hídricos é o órgão mais expressivo da hierarquia do SINGREH, sendo este de caráter normativo e deliberativo. Esse órgão é presidido pelo Ministro do Meio Ambiente e composto por representantes de Ministérios e Secretarias Especiais da Presidência da República, membros dos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, usuários de recursos hídricos (irrigantes; indústrias; concessionárias e autorizadas de geração de energia hidrelétrica; pescadores e usuários da água para lazer e turismo; prestadoras de serviço público de abastecimento de água e esgotamento sanitário; hidroviários) e, por representantes de organizações civis de recursos hídricos (consórcios e associações intermunicipais de bacias hidrográficas; organizações técnicas e de ensino e pesquisa, com interesse na área de recursos hídricos; organizações não governamentais).

No âmbito desse conselho foi criada a Câmara Técnica de Águas Subterrâneas cujos objetivos são: inserir a gestão de águas subterrâneas na Política Nacional de Recursos Hídricos, promover o gerenciamento das águas subterrâneas, compatibilizar as legislações relativas à exploração e à utilização destes recursos, propor mecanismos de proteção e ações mitigadoras/ compensatórias e resolver conflitos.

3.2.3. A Política Nacional de Recursos Hídricos e Águas Subterrâneas

Instituída pela Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), que ficou conhecida como “Lei das Águas”, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabeleceu instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal (aqueles que fazem parte mais de um estado ou fazem fronteira) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), descrito anteriormente.

A PNRH ficou conhecida por sua peculiaridade descentralizadora, por criar um sistema nacional que integra União, estados e o cidadão, por inovar com a instalação de comitês de bacias hidrográficas que une poderes públicos nas três instâncias, usuários e sociedade civil na gestão de recursos hídricos, a PNRH é considerada uma lei moderna que criou condições para identificar conflitos pelo uso das águas, por meio dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas, e arbitrar conflitos no âmbito administrativo.

A Lei Federal nº 9.433/97 deu maior abrangência ao Código de Águas, de 1934 (BRASIL, 1997 e 1934), que centralizava as decisões sobre gestão de recursos hídricos no setor elétrico. Ao estabelecer como fundamento o respeito aos usos múltiplos e como prioridade o abastecimento humano e dessedentação animal em casos de escassez, a Lei das Águas deu outro passo importante tornando a gestão dos recursos hídricos democrática. Todavia, esta lei não conseguiu atingir as peculiaridades da gestão dos recursos hídricos subterrâneos, conforme Villar (2008),

“O problema se agrava porque o conhecimento técnico sobre os aquíferos muitas vezes é limitado, o que dificulta a formulação de uma política de gestão. A incerteza técnica e os conhecimentos limitados aliados a falta de técnicos especializados e de uma legislação estruturada, bem como o desconhecimento do tema por parte da sociedade, além do caráter “oculto” das águas subterrâneas, favorecem o esquecimento desse tema na hora de formular e implementar as políticas públicas. Dificilmente as águas subterrâneas serão consideradas uma prioridade para os administradores públicos” (VILLAR, 2008, p. 65).

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento foi um dos principais avanços para a gestão das águas, todavia, no caso das águas subterrâneas, a bacia hidrogeológica não se equipara à bacia hidrográfica, o que pode provocar problemas na gestão dos aquíferos se não houver um grau significativo de cooperação entre os órgãos gestores.

3.2.4. Política Estadual de Recursos Hídricos

A Lei Estadual nº 8.149 de 15 de junho de 2004 dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) bem como do Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Estado do Maranhão e define a bacia hidrográfica como “unidade físico-territorial

para implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos e a atuação do Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos” (Art.2º, inc. V) (MARANHÃO, 2004), seguindo o que foi disposto na Política Nacional.

Seus principais objetivos são: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes de uso inadequado dos recursos naturais, que ofereçam riscos à saúde e à segurança pública, e prejuízos econômicos e sociais; a utilização racional das águas superficiais e subterrâneas dentre outros, visando à proteção e conservação dos mananciais e de áreas dotadas de características fisiográficas indutoras da recarga natural de aquíferos, para a manutenção da dinâmica das águas superficiais.

Para fundamentar e orientar à implementação e gerenciamento da PERH foram criados o Plano Estadual de Recursos Hídricos e os Planos Diretores de Bacia Hidrográfica, que em seu Art. 6º, inciso I propõe a elaboração de um “inventário e diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos elaborados por bacia hidrográfica ou por conjunto de bacias”. Considera-se a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, contudo a implementação da política de proteção dos recursos hídricos no Estado do Maranhão ainda é deficiente.

Em todo seu escopo, o texto da Lei Estadual nº 8.149/04 discorre vagamente sobre as águas subterrâneas, para tanto, o poder executivo do Estado do Maranhão criou por meio do Decreto nº 28.008/2012 a regulamentação da PERH com relação às águas subterrâneas, definindo a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA como responsável pela “emissão das licenças de obras de captação de águas subterrâneas, a autorização do uso da água como também o monitoramento qualitativo e a fiscalização, por meio de suas unidades administrativas” (Art.2º) (MARANHÃO, 2004).

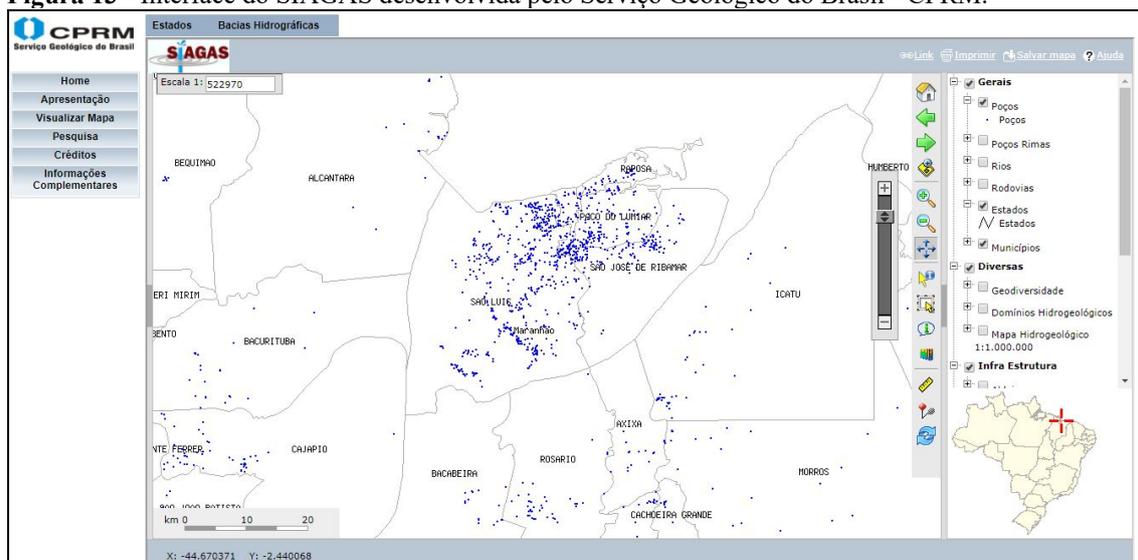
Neste decreto são definidas as ações de gerenciamento das águas subterrâneas, compreendendo: adoção de medidas relativas à sua conservação, preservação e recuperação; monitoramento quali-quantitativo e o planejamento de seu aproveitamento racional; a outorga e o licenciamento para perfuração de poço; o cadastro de poços tubulares e escavados; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; o Sistema Estadual de Informações de Águas Subterrâneas; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; os programas destinados à capacitação profissional na área de recursos hídricos; as campanhas educativas visando conscientizar a sociedade para a utilização racional dos

recursos hídricos do Estado; Fundo Estadual de Recursos Hídricos; a fiscalização dos direitos de uso dessas águas, sanções e penalidades.

Com relação à conservação dos mananciais subterrâneos, destaca-se o Programa Permanente de Conservação e Preservação das Águas Subterrâneas - PPPAS previsto na Lei Federal nº 5.405, de 08 de abril de 1992 (BRASIL, 1992), o qual terá as seguintes finalidades: avaliar continuamente as disponibilidades hídricas subterrâneas, coibindo a superexploração localizada ou regional do aquífero que incorra em risco de exaustão ou comprometimento na continuidade de sua exploração; analisar continuamente a qualidade química e bacteriológica das águas subterrâneas, identificando e procurando sanar ou minimizar os efeitos produzidos pelos focos de poluição, evitando que processos de degradação venham a se alastrar em todo o aquífero; nos aquíferos costeiros, acompanhar continuamente a evolução da interface água doce/água salgada, face ao aumento da exploração por novos poços perfurados; acompanhar a execução das ações programadas no Plano Estadual de Recursos Hídricos e nos Planos Diretores de Bacias Hidrográficas, no que se refere às águas subterrâneas.

Para gerir todos os dados obtidos sobre os recursos hídricos, estes serão organizados sob a forma de um Sistema Estadual de Informação e compatibilizados com o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, e outros sistemas relacionados com a gestão de recursos hídricos ao qual será incorporado, na forma da Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997). Para isto, a lei recomenda que o Sistema de informação a ser adotado deva ser o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS do Serviço Geológico do Brasil - CPRM (Figura 13) ou compatível com este. A SEMA, atualmente utiliza este Sistema Federal de Regulação de Usos – REGLA de responsabilidade da Agência Nacional de Águas - ANA.

Figura 13 - Interface do SIAGAS desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

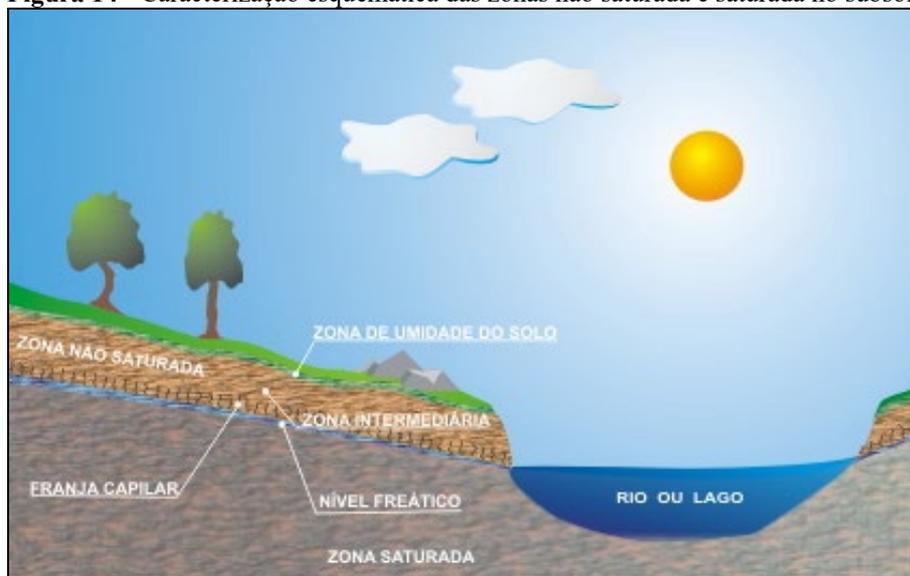


Fonte: CPRM (2017).

3.3. FUNDAMENTOS EM HIDROGEOLOGIA

O ciclo hidrológico funciona de forma fundamental para o abastecimento das águas subterrâneas, pois ao se infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma área denominada de Zona não Saturada ou Zona de aeração, que consiste na região em que os poros não estão totalmente preenchidos e que possuem água e ar (Figura 14).

Figura 14 - Caracterização esquemática das zonas não saturada e saturada no subsolo.



Fonte: ABAS (2017).

O restante da água que por ação da gravidade continua o seu percurso até chegar às camadas mais profundas e encontrando a Zona Saturada. Nesta todos os poros encontram-se preenchidos por água, e inicia-se a franja capilar. Logo denominada de água subterrânea.

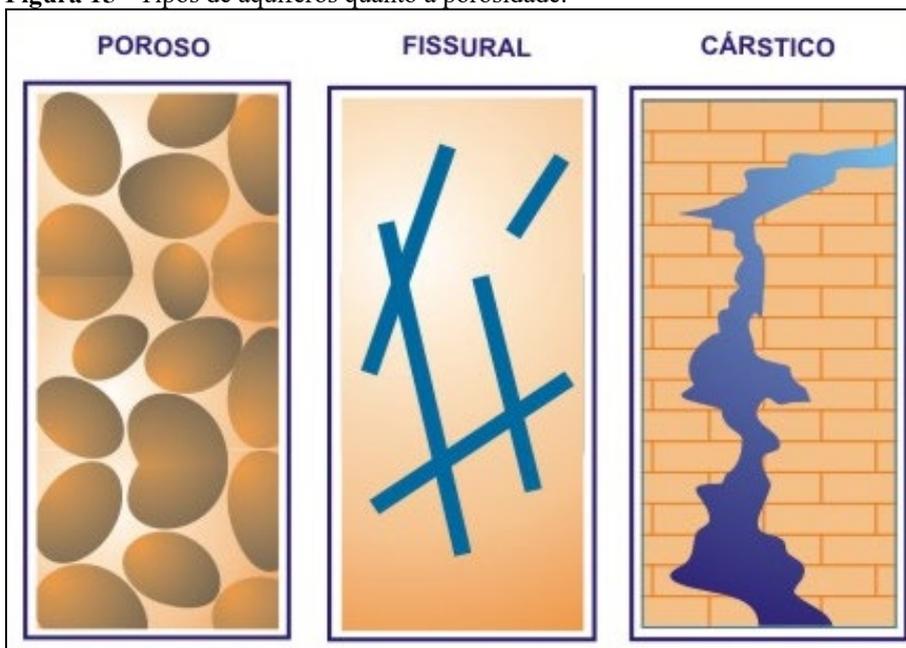
A água subterrânea por sua vez, ao preencher os poros, ocupa espaços definidos nas rochas denominados aquíferos. Estes na literatura são estudados e classificados de acordo com características intrínsecas do meio em que ocupa.

A denominação de aquífero segundo Iritani (2008) “é um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos”.

Os aquíferos também podem ser classificados de acordo com a porosidade da rocha (Figura 15). Para Brown (2000):

A porosidade pode ser classificada em porosidade primária e porosidade secundária. A porosidade primária ocorre geralmente em rochas sedimentares, dando origem aos aquíferos porosos. A porosidade secundária está ligada aos meios anisotrópicos, originando o aquífero fissural, no caso de fraturas e fissuras em rochas cristalinas (principalmente Ígneas e Metamórficas) e o aquífero cárstico, no caso da dissolução de rochas carbonáticas (BROWN, 2000, p.15).

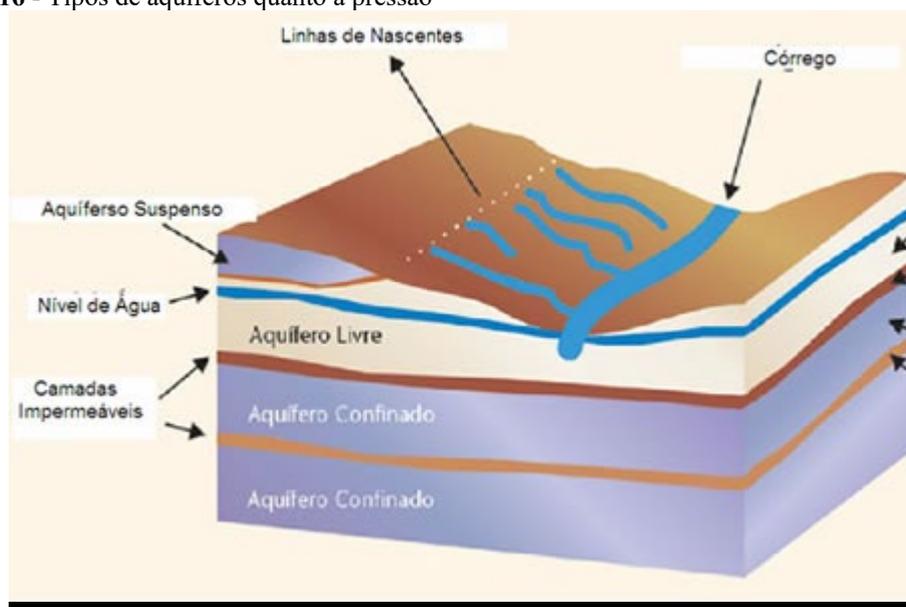
Figura 15 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.



Fonte: ABAS (2017).

Além da classificação segundo a sua porosidade, os aquíferos podem ser classificados segundo a pressão a que a água está submetida, podendo ser: livre, suspenso, semiconfinado e confinado (Figura 16).

Figura 16 - Tipos de aquíferos quanto à pressão



Fonte: CPRM, 2010

A descrição dos aquíferos adotada neste trabalho é segundo Rodrigues *et al* (1984), sendo eles (Quadro 3)

Quadro 3-Classificação e caracterização de aquíferos.

Tipo de Aquífero	Descrição
Confinado	<p>Também chamado sob pressão, é um aquífero no qual a pressão da água no topo é maior do que a pressão atmosférica. Compreende dois tipos: confinado não drenante e confinado drenante.</p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>Confinado não drenante</u>: é um aquífero cujas camadas limítrofes, superior e inferiores, são impermeáveis. - <u>Confinado drenante</u>: é um aquífero no qual pelo menos uma das camadas limítrofes é semipermeável, permitindo a entrada ou saída de fluxos pelo topo e/ou pela base, por drenança ascendente ou descendente.
Livre	<p>O aquífero livre se caracteriza por uma camada permeável parcialmente saturada de água, limitada na base por uma camada impermeável ou semipermeável. Estando a água nele armazenada submetida unicamente a ação da pressão atmosférica (ABGE, 1981).</p>
Suspenso	<p>Aquífero suspenso é um caso especial de aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável de extensão limitável e situada entre a superfície freática regional e o nível do terreno.</p>

Fonte: Adaptado Rodrigues *et al* (1984).

3.3.1. Dados Hidrodinâmicos de Aquíferos

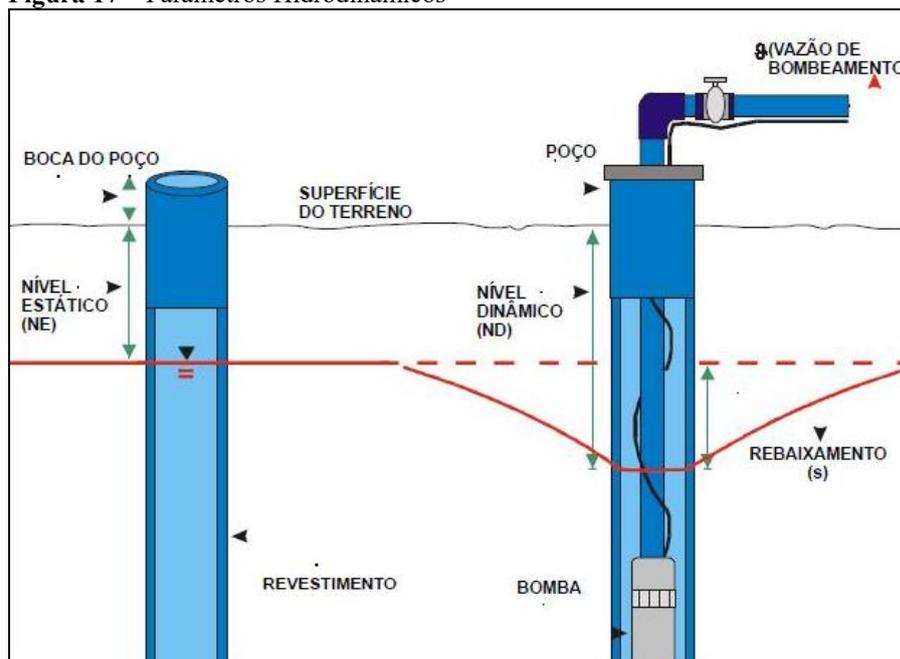
Os parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero são fundamentais nas avaliações dos recursos hídricos subterrâneos de uma determinada região (Quadro 4, Figura 17). A partir destes podemos observar o comportamento hidrodinâmico de cada poço e em constatar locais com maior ou menor vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

Quadro 4-Parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero

Parâmetros	Descrição
Profundidade	Refere-se quanto foi perfurado de rocha até atingir o aquífero fornecedor de água subterrânea.
Nível estático (NE)	É a distância da superfície do terreno ao nível da água dentro do poço antes de iniciar o bombeamento.
Nível dinâmico (ND)	É a distância da superfície do terreno ao nível da água dentro do poço depois de iniciar o bombeamento.
Vazão	É o volume de água por unidade de tempo extraído do poço por um equipamento de bombeamento
Rebaixamento	Nível da água dentro do poço é a distância entre o nível estático (NE) e o nível dinâmico (ND).

Fonte: Adaptado Rodrigues *et al.* (1984).

Figura 17 – Parâmetros Hidrodinâmicos



Fonte: Feitosa e Costa Filho (1998).

Conforme Feitosa e Manoel Filho (1997), a água tem sido fonte de preocupação desde os primórdios da humanidade. Perguntas como: de onde vem a água? E qual a sua qualidade? São constantemente realizadas por cientistas, hidrólogos, geólogos e engenheiros, os quais permanecem estudando para melhorar o conhecimento sobre o assunto.

De acordo com Feitosa e Manoel Filho (1997), a água, a nível microscópico, possui um movimento por um meio poroso, que possui uma grande dificuldade de estudo pela presença de irregularidades entre os poros e canalículos os quais o fluido deve passar.

Assim, buscaram-se métodos que possam explicar a relação entre o fluxo que atravessa uma camada de areia e o gradiente hidráulico, o que resultou no conceito de condutividade hidráulica, desenvolvido por Henry Darcy.

O mesmo percebeu que a vazão é proporcional à diferença de cargas hidráulicas ($h_1 - h_2 = \Delta h$) era inversamente proporcional à distância (L) entre os piezômetros 1 e 2, o que resultou na relação $Q = K (h_1 - h_2) / L$

A partir de então, foi possível o estudo de outros parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos (Quadro 5), Porosidade, Carga Hidráulica, Condutividade Hidráulica (K), Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S).

Quadro 5 -Parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos.

Parâmetro	Descrição	Formula
Porosidade	A porosidade pode ser classificada em porosidade primária e porosidade secundária. A porosidade primária ocorre geralmente em rochas sedimentares, dando origem aos aquíferos porosos. A porosidade secundária está ligada aos meios anisotrópicos, originando o aquífero fissural, no caso de fraturas e físsuras em rochas cristalinas (principalmente Ígneas e Metamórficas) e o aquífero cárstico, no caso da dissolução de rochas carbonáticas.	$n = V_v / V$ n= porosidade Total; V _v =volume de vazios; V= volume total
Carga Hidráulica	Trata-se da energia mecânica de um líquido em movimento que é composta basicamente de três componentes: a energia cinética, a energia potencial gravitacional e a energia de pressão.	
Condutividade Hidráulica (K)	O coeficiente de proporcionalidade K que aparece na Lei de Darcy pode ser chamado de condutividade hidráulica e leva em conta as características do meio, incluindo porosidade, tamanho e	$K = T / b$ K=Condutividade Hidráulica;

	distribuição das partículas, forma das partículas, arranjo das partículas, bem como as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica). A Condutividade Hidráulica depende das características do meio poroso e das propriedades dos fluidos. A condutividade pode ser expressa por m/s ou cm/s. Ela pode ser determinada a partir de softwares, fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo.	T= Trasmisividade; b= Espessura do Aquífero
Transmissividade (T)	A Transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.	$T = K \cdot b$ K=Condutividade Hidráulica; T= Trasmisividade; b= Espessura do Aquífero
Coefficiente de Armazenamento (S)	É a capacidade de o aquífero armazenar e transmitir água, dependendo das propriedades do meio poroso.	

Fonte: Adaptado Rodrigues *et al.* (1984).

Os parâmetros supracitados estão diretamente interligados aos sedimentos que compõe a rocha, desta forma Fetter (1988) aponta os diferentes sedimentos e suas respectivas Condutividades Hidráulicas (*K*) e porosidade total (*n*). (Tabela 03).

Tabela 3 - Valores de Condutividade hidráulica (*K*) e porosidade total (*n*) em diferentes materiais.

Sedimentos	Condutividade hidráulica (m/s)	Porosidade total <i>n</i> (%)
Cascalho	$1 \cdot 10^{-4}$	25-50
Areia bem selecionada	$10^{-3} - 10^{-5}$	20-35
Silte Arenoso, areia fina	$10^{-5} - 10^{-7}$	10-20
Silte, Areia Siltica, Argila arenosa	$10^{-6} - 10^{-8}$	35-50
Argila	$10^{-8} - 10^{-11}$	33-60
Rochas sedimentares		
Arenito	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$	5-30
Folhelho	$10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$	21-41
Calcário	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$	0-20
Rochas Cristalinas		
Granito	$8 \times 10^{-9} - 10 \times 10^{-4(4)}$	0,1
Basalto	$2 \times 10^{-11} - 10 \times 10^{-7(4)}$	3-35

Rocha Cristalina Faturada	$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-4(4)}$	0-10
---------------------------	--	------

Fonte: Adaptado de Fetter (1988).

3.3.1.1. Parâmetros de comparação entre Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K), Vazão (Q) e Produtividade

Os aquíferos são considerados a unidade hidrogeológica fundamental sendo frequentemente subdivididos e seus limites não coincidem obrigatoriamente com os limites das unidades estratigráficas, pois uma determinada formação geológica frequentemente apresenta variações litológicas, locais ou regionais, alterando suas capacidades aquíferas, conforme Diniz *et al* (2012).

Desta forma, apoiando-se nos trabalhos de Struckmeier e Margat (1995) e Diniz *et al* (2012), os aquíferos apresentam as seguintes classes de produtividade, conforme (Tabela 4):

Tabela 4-Classes de Produtividade do aquífero.

Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Vazão (m ³ /h)	Produtividade
$\geq 4,0$	$\geq 10^{-02}$	$> 10^{-04}$	≥ 100	Muito Alta: Fornecimentos de água de importância regional (abastecimento de cidades e grandes irrigações). Aquíferos que se destacam em âmbito nacional.
$2,0 \leq Q/s < 4,0$	$10^{-03} < T < 10^{-02}$	$10^{-05} < K < 10^{-04}$	$50 \leq Q < 100$	Alta: Características semelhantes à classe anterior, contudo situando-se dentro da média nacional de bons aquíferos.
$1,0 \leq Q/s < 2,0$	$10^{-04} < T < 10^{-03}$	$10^{-06} \leq K < 10^{-05}$	$25 \leq Q < 50$	Moderada: Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas.
$0,4 \leq Q/s < 1,0$	$10^{-05} < T < 10^{-04}$	$10^{-07} \leq K < 10^{-06}$	$10 \leq Q < 25$	Geralmente baixa, porém localmente moderada: Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado.
$0,04 \leq Q/s < 0,4$	$10^{-06} < T < 10^{-05}$	$10^{-08} < K < 10^{-07}$	$1 \leq Q < 10$	Geralmente baixa, porém localmente muito baixa: Fornecimentos contínuos dificilmente são garantidos.
$< 0,04$	$< 10^{-06}$	$< 10^{-08}$	$< 1,0$	Pouco Produtiva ou Não Aquífera: Fornecimentos insignificantes de água. Abastecimentos restritos ao uso de bombas manuais.

Fonte: Diniz *et al* (2012).

3.3.1.2. Qualidade e classificação das águas subterrâneas

A qualidade da água é um assunto amplamente discutido em todo mundo, este tema se refere especialmente, segundo Mestrinho (2011) sobre a avaliação das impurezas que são retratadas por suas características físicas, químicas e biológicas, traduzidas em termos de parâmetros, que permite classificar a água por seu conteúdo mineral, caracterizar a sua potabilidade e apontar anomalias de substâncias tóxicas. Estas características são (Quadro 6):

Quadro 6 - Características físicas e químicas da água subterrânea

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Parâmetro	Descrição
Turbidez (uNT)	Representa a dificuldade da penetração da luz nas águas causada pelas partículas em suspensão (plânctons, bactérias, argilas, siltes e partículas orgânicas e inorgânicas finamente divididas).
Cor (uH)	Resulta da presença do material dissolvido e em suspensão. A cor verdadeira decorre do material dissolvido e é obtida após a remoção da turbidez. Pode apresentar uma cor arroxeadada quando rica em ferro, negra quando rica em manganês, e amarelada por ácidos húmicos.
Temperatura (°C)	Tem influencia nos processos bioquímicos e na solubilidade dos gases dissolvidos nas águas. É difícil medir a temperatura real da água em aquíferos.
Condutividade Elétrica (µS/cm)	É capacidade de transmitir corrente elétrica por meio das substâncias dissolvidas. Dependem do tipo, concentração, valência e mobilidade da espécie iônica e da temperatura. E águas doces naturais, os valores geralmente encontrados estão entre 5 µS/cm e 50µS/cm, e na água do mar, entre 50 µS/cm e 50.000 µS/cm. É um importante parâmetro nos estudos hidro químicos, pois está relacionada ao tipo de material em contato com a água. É comum encontrar águas de condutividade mais alta associados a calcários e basaltos, e mais baixa, a granitos e quartzitos.
Salinidade	Representa a quantidade total de sais dissolvidos em um determinado volume de água.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
pH	É o logaritmo negativo da concentração de íons de hidrogênio na água resultante do equilíbrio químico das reações. Regula a precipitação de muitos metais e a capacidade de ataque químico da água; em valores de pH < 5, grande parte dos metais está presente na forma iônica, e nos mais altos tendem a precipitar. Nas águas, a faixa de pH está entre 5,5 e 8,5.
Acidez (CaCO ₃)	É a capacidade quantitativa de reação da água com uma base forte (ou de neutralizar a base) até determinado valor de pH. Esta associada a ácidos fortes (ácido nítrico, clorídrico, sulfúrico), ácidos fracos (ácido carbônico e acético) e sais hidrolisáveis (sulfato de ferro e alumínio)
Alcalinidade	Capacidade de a água neutralizar um ácido. Representa a soma de bases neutralizáveis, presentes como bicarbonato, carbonato, hidroxila e outros compostos (boratos, fosfatos, silicatos).
Dureza (mg/L CaCO ₃)	Capacidade de a água em precipitar sabão e formar incrustações pela presença de Ca (Cálcio) e Mg (Magnésio) sob a forma de carbonatos, sulfatos e cloretos.

Fonte: Adaptado de Mestrinho (2011).

Serão considerados os parâmetros físicos e químicos da água, para melhor caracterização da variável I (Impacto do estado atual da intrusão marinha na região) que exige a relação de Bicarbonatos (HCO₃) e Cloretos (Cl⁻).

3.4. VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

A vulnerabilidade de aquíferos é um tema de destaque, isso se dá pela sua significativa relevância frente à necessidade de fontes alternativas de abastecimento público e crescente população.

Kasenow (2002) elenca que:

Além da crescente demanda por água, a escassez, a poluição, as catástrofes causadas por inundações e o envelhecimento das infraestruturas hídricas estão se tornando mais graves. Portanto, a necessidade de planejamento e gerenciamento de desastres está crescendo rapidamente. Esses problemas são especialmente mais significativos nos países em desenvolvimento. As sociedades desenvolvidas também estão se tornando mais vulneráveis, pois são altamente dependentes da água (Kasenow, 2002, tradução nossa).

O termo vulnerabilidade foi inicialmente mencionado por Albinet e Margat (1970), na época tratada apenas como a capacidade do aquífero resistir a cargas contaminantes.

Segundo Sobrinho *et al.* (2015) “para o uso sustentável do aquífero é importante avaliar sua vulnerabilidade”. Inúmeras análises com a temática vulnerabilidade de aquíferos têm sido realizadas em diversos países e utilizando os métodos que possibilitam tal análise como, por exemplo, o método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987) e o método GOD (FOSTER; HIRATA, 2002), que computam um conjunto de indicadores influenciadores na propagação de um poluente após sua deposição no solo.

Todavia, em se tratando aquíferos costeiros o perigo a intrusão salina torna-se fator principal por estar em contato direto e constante com a cunha salina que se apresenta em diversas direções, como por exemplo, horizontal devido à percolação vinda do mar diretamente para o aquífero ou vertical oriundo de camadas superiores salinizadas como manguezais e estuários. Com isso, para aquíferos costeiros, é indispensável à utilização de uma metodologia apropriada para mapear a distribuição espacial das áreas litorâneas, e que leve em conta os fatores hidrogeológicos, principalmente aqueles que podem ser obtidos com certa facilidade nos órgãos gestores de recursos hídricos ou através de experimentos simples e rápidos (SOBRINHO *et al.*, 2015).

Assim, o principal método utilizado no que tange a temática intrusão salina, destaca-se o método GALDIT, proposto por Chachadi e Lobo-Ferreira (2001). Desta forma, descreve-se os métodos DRASTIC, GOD e GALDIT.

3.4.1. Método DRASTIC

Modelo proposto por Aller *et al.* (1987), observa e analisa a vulnerabilidade e sua susceptibilidade a poluição através da combinação de sete valores hidrogeológicos a fim de classificar o grau de vulnerabilidade como negligente, baixo, moderado, alto e muito alto. O método propõe a análise dos seguintes parâmetros, conforme (Tabela 5):

Tabela 5 - Parâmetros DRASTIC.

FATOR DRASTIC	SIGLA	PESO
Profundidade	D - Depht	5
Recarga	R-Recharge	4
Meio Aquífero	A- Aquifer characteristic	3
Solo	S- Soil media	2

Topografia	T- Topography	1
Impacto da Zona Vadosa	I- Impact of the insaturate zone	5
Condutividade Hidráulica	C – Conductivity hydraulic	3

Fonte: Adaptado de Aller *et al.* (1987).

3.4.2. Método GOD

O método GOD proposto por Foster e Hirata (1988) avalia a vulnerabilidade do aquífero, utilizando três parâmetros. Cada parâmetro do GOD influencia diretamente na determinação da vulnerabilidade do aquífero (Figura 18), pois estes podem tanto favorecer a vulnerabilidade como impedi-la, sendo estes:

G - Tipo de Aquífero: Considerando que os tipos de ocorrências de aquíferos são livre, confinado e confinado drenante, e que cada um destes reflete o nível de contato deste com a superfície do terreno. O modo de ocorrência do aquífero tem grande correlação com o seu grau de vulnerabilidade natural.

O - Litologia e o Grau de Consolidação da Zona Vadosa ou Camadas Confinantes: O solo e a litologia situados acima da zona saturada do aquífero condicionam o tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de sua atenuação. O solo corresponde à parte da zona vadosa onde estão localizadas as raízes das plantas. Cada tipo de solo tem sua capacidade de atenuação. Um solo essencialmente arenoso tem menor capacidade de atenuação do que um solo argiloso. A litologia situada acima da zona saturada do aquífero contribui com a capacidade de atenuação desse meio, uma rocha de granulometria grossa tem menor capacidade de atenuação do que uma rocha de granulometria fina.

D - Profundidade da Água no Aquífero: A profundidade da água no aquífero corresponde à profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a zona saturada do aquífero.

A cada um destes parâmetros é atribuído um valor que varia de 0 a 1, sendo:

- Tipo de ocorrência da água subterrânea (G), onde os valores são obtidos dentro de um intervalo de 0 a 1.
- Classificação dos estrados acima da zona saturada do aquífero em termos do grau de consolidação e caráter litológico (O), esta propriedade conduzirá a um segundo ponto na escala de 0,3 a 1,0.
- Determinação da profundidade do nível freático (D), que definirá o terceiro ponto, na escala de 0,4 a 1,0.

Após a pontuação das três etapas acima é feito o produto dos valores, ou seja:

$$\text{Vulnerabilidade} = \text{valor de G} \times \text{valor de O} \times \text{valor de D}$$

A classificação de vulnerabilidade do aquífero (Figura 18) após o produto dos parâmetros relacionados pode ser classificada como:

Insignificante: Desconsidera as camadas confinantes com fluxos verticais descendentes não significativos;

Baixo: Vulnerável a somente alguns contaminantes conservadores, em longo prazo, quanto contínua e amplamente lançados ou lixiviados;

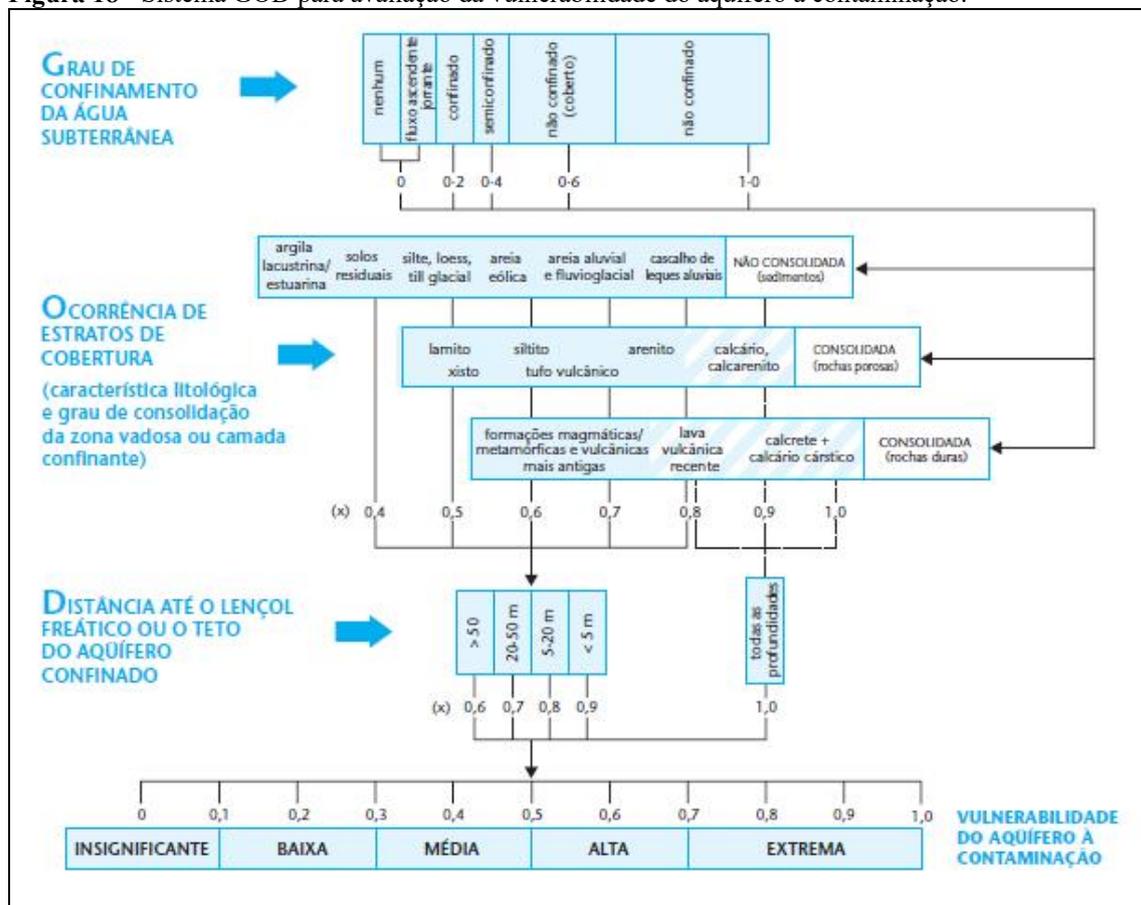
Médio: Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançado;

Alto: Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles pouco móveis e pouco persistentes,

Extremo: Vulnerável a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de poluição.

Na (Tabela 6) o resumo desta classificação, considerando os valores atribuídos aos parâmetros.

Figura 18 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



Fonte: Foster (2006).

Tabela 6 - Nível de vulnerabilidade de aquífero à contaminação.

Extrema	0,7-1,0
Alta	0,5-0,7
Média	0,3-0,5
Baixa	0,1-0,3
Insignificante	0,0-0,1

Fonte: Foster (2006) com adaptações.

3.4.3. Método GALDIT

O método GALDIT foi desenvolvido por Chachadi e Lobo Ferreira (2001) tendo como objetivo avaliar a vulnerabilidade a intrusão marinha nas regiões costeiras de clima tropical da Índia. Embora, seu objetivo original tenha sido apenas as condições do litoral indiano, seus parâmetros universais (variáveis) podem ser aplicados em qualquer aquífero costeiro.

O termo GALDIT é um acrônimo formado pelas iniciais em inglês, destacadas abaixo, dos seguintes parâmetros:

- *Groundwater Occurrence (Ocorrência do Aquífero)*
- *Aquifer Hydraulic Conductivity (Condutividade Hidráulica).*
- *Height of Groundwater Level above Sea Level (Nível Piezométrico) .*
- *Distance from the Shore (Distância da Linha de Costa).*
- *Impact of existing status of seawater intrusion in the area (Impacto do estado atual da intrusão marinha) .*
- *Thickness of the aquifer, which is being mapped (Espessura do aquífero).*

A metodologia GALDIT utiliza seis parâmetros, considerados necessários para desenvolver um sistema de mapeamento que, segundo os seus criadores (CHACHADI & LOBO-FERREIRA, 2001), "é simples o suficiente para aplicar usando os dados disponíveis, e ainda assim capaz de fazer melhor uso dos dados disponíveis de uma maneira tecnicamente válida e útil". A adoção de um índice tem a vantagem de, em princípio, eliminar ou minimizar a subjetividade no processo de classificação (CHACHADI, 2005).

Todos os dados são manipulados com a utilização de planilha eletrônica e uma ferramenta de SIG (Sistema de Informações Geográficas), que são utilizados para elaborar os mapas temáticos nos quais são dispostos os valores para cada índice a área onde este se encontra aplicado.

A aplicação do método consiste na atribuição de valores para as seguintes variáveis, conforme (Tabela 7).

Tabela 7 - Variáveis do método GALDIT.

Parâmetro GALDIT	Valor do coeficiente de ponderação
G - ocorrência do aquífero	1
A - condutividade hidráulica	3
L - nível do piezômetro	4
D - distância da linha de costa (m)	4
I - impacto do estado atual da intrusão marinha	1
T - espessura do aquífero	2

Fonte: LNEC (2011).

G – Ocorrência de Aquíferos: refere-se ao tipo de aquífero, que pode ser confinado, livre, semiconfinado ou limitado por uma ou mais fronteiras (Tabela 8).

Tabela 8 - Parâmetro "G" – *Groundwater*.

G- ocorrência do aquífero	Valor do índice
Aquífero Confinado	10
Aquífero Livre	7,5
Aquífero Semiconfinado	5
Aquífero Limitado	2,5

Fonte: LNEC (2011).

A – Condutividade hidráulica: este parâmetro é utilizado para medir a velocidade de fluxo de água no aquífero, para o mar. A condutividade hidráulica de um aquífero define-se na capacidade de transmitir água e depende diretamente da porosidade do local. A condutividade, esta diretamente ligada à intrusão marinha, ou seja, quanto maior for seu valor, maior será a intrusão. Muitas das vezes, este fenômeno ocorre devido ao grande exploração, ocasionando desta forma o rebaixamento do nível da água promovendo o avanço da água do mar para o continente (Tabela 9).

Tabela 9 - Parâmetro "A" – Condutividade hidráulica

A - condutividade hidráulica (m/dia)	Valor do índice
Elevada > 40	10
Média 10 – 40	7,5
Baixa 5 – 10	5
Muito baixa < 5	2,5

Fonte: LNEC (2011).

L – Nível piezométrico: refere-se ao nível de água subterrânea medida em relação ao nível do

mar. É um parâmetro essencial para o sucesso do método, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina (Tabela 10).

Tabela 10 - Parâmetro "L" - Nível Piezométrico

L - nível do piezômetro/ (intervalo -m)	Valor do índice
Elevada < 1	10
Média 1 - 1,5	7,5
Baixa 1,5 – 2	5
Muito baixa > 2	2,5

Fonte: LNEC (2011).

D - Distância à linha da costa: este parâmetro diz que quanto maior for a distância (perpendicular) do aquífero relacionado ao mar, menor será o valor deste índice (Tabela 11).

Tabela 11 - Distância à linha da costa.

D - distância da linha de costa (m)	Valor do índice
Muito perto < 500	10
Perto 500 – 750	7,5
Meia distância 750 – 1000	5
Longe > 1000	2,5

Fonte: LNEC (2011).

I – Impacto do estado atual da intrusão marinha na região: reflete o desequilíbrio que pode existir entre a água do mar e a água doce, por alteração do equilíbrio hidráulico em condições naturais, como resultado da atividade antropogênica já existente na zona (Tabela 12).

Tabela 12 - Parâmetro "I" - Impacto do estado atual da intrusão marinha na região

I – impacto do estado atual da intrusão marinha na região (CI-/ [HCO₃⁻+ CO₃²⁻]) em Epm na água doce	Valor do índice
Alta > 2	10
Média 1,5 – 2	7,5
Baixa 1 - 1,5	5
Muito baixa < 1	2,5

Fonte: LNEC (2011).

T – Espessura do aquífero: a espessura do aquífero se refere à espessura saturada do aquífero confinado e que desempenha um papel importante no controle da intrusão marinha (Tabela 13).

Tabela13 - Parâmetro "T" - Espessura do Aquífero

T - espessura do aquífero (m)		Valor do índice
Grande	> 10	10
Média	7,5 – 10	7,5
Pequena	5 - 7,5	5
Muito pequena	< 5	2,5

Fonte: LNEC (2011).

Após a análise e adequação de todas as variáveis será realizado o cálculo de todos os parâmetros, através da seguinte equação:

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

Conhecido o valor resultante do cálculo far-se-á o enquadramento da vulnerabilidade, sendo considerada vulnerabilidade elevada $\geq 7,5$; vulnerabilidade moderada 5–7,5; vulnerabilidade baixa ≤ 5 .

O presente método foi aplicado em várias partes do mundo como, por exemplo, Aquífero Monte Gordo, Portugal (LOBO FERREIRA *et al.*, 2005) Zona costeira de Goa (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2005), bacia hidrográfica do Pindaré (PEREIRA *et al.*, 2011) e Zona de costa da Guiné-Bissau (TERCEIRO e LOBO FERREIRA, 2010), Região Costeira da Índia (SATISHKUMAR *et al.* (2016), Mediterrâneo (ZAAROUR, 2017) e outros.

Desta forma, para esta pesquisa utiliza-se o método GALDIT por ser o mais adequado frente aos objetivos apresentados, considerando que a área de estudo se encontra totalmente inserida em um ambiente costeiro sujeito a constante entrada do prisma de maré em decorrência das marés altas chegando a atingir 7 metros. Além disso, o intenso povoamento da região implicou na construção de vários poços tubulares e cacimbas para suprir a necessidade hídrica tanto para consumo humano, quanto para o uso de importantes indústrias localizadas nas proximidades da zona portuária de São Luís.

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo, são apresentados os materiais utilizados, os procedimentos metodológicos adotados e a descrição das atividades desenvolvidas em cada etapa de trabalho, de modo a alcançar os objetivos propostos.

4.1. MATERIAIS

Para caracterização e estimativa das propriedades hidrogeológicas e hidrodinâmicas da área de estudo, como profundidade, nível estático, nível dinâmico, condutividade hidráulica, entre outros parâmetros, foram utilizados relatórios técnicos com dados hidrogeológicos dos poços tubulares fornecidos pelo banco de dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA com dados dos poços tubulares pertencentes à Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA e particulares.

Durante os trabalhos de campo foi utilizado um GPS da marca *Garmin* modelo E-Trex 10 para marcação dos poços tubulares e cacimbas encontradas nas comunidades visitadas. Além disso, para registro das atividades e análise da ocupação antrópica, realizou-se um sobrevoo na área de estudo com um veículo aéreo não tripulado (VANT ou Drone, do inglês zangão), da marca DJI modelo *Phantom3 Professional* (Foto 3).

Foto 3 – Drone *Phantom3 Professional* utilizado durante a pesquisa.



Fonte: Martins, 2018.

A coleta de informações físico-química dos poços foi realizada através de sonda multiparâmetro da marca *Aquaread AP800*. Para mensuração do nível estático dos poços utilizou-se um medidor elétrico analógico de nível d'água.

Na etapa de coleta, organização e tratamento dos dados foram empregados dois softwares: o *Excel* (MICROSOFT CORPORATION, 2010) para a organização das informações e cálculo de variáveis relativas ao teste de bombeamento; e o software *Aquifer Win32¹* (*Environmental Simulations, Inc.*, 2003) utilizado para simular o comportamento do nível da água durante os testes de bombeamento e a obtenção dos dados hidrodinâmicos como Condutividade Hidráulica (K), Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S).

Os valores das propriedades hidrogeológicas do modelo foram obtidos dos resultados dos testes de bombeamento a partir dos poços tubulares localizados na área de estudo. Uma vez que o modelo é construído no *Aquifer Win32*, ele pode ser usado tanto para os resultados de previsão como para análise do teste do aquífero atual, com os resultados se obtém os parâmetros G – Ocorrência do Aquífero e o parâmetro A – Condutividade Hidráulica. Para aquisição do parâmetro “L”- Nível Piezométrico foi utilizada a base topográfica do Instituto das Cidades – INCID com intervalo de 1 em 1 metro posteriormente lançadas em uma planilha em *Excel* cujo valor da cota foi subtraído pelo nível estático dos poços. Para o parâmetro “D”- Distância da Linha de Costa foi utilizada a ferramenta régua do *software* ArcGIS (ESRI, 2015) para aferir a distância dos poços em relação a linha de costa. Quanto ao parâmetro “T”- Espessura do Aquífero foram analisados os perfis litológicos de 13 poços situados no curso inferior da bacia para a determinação da espessura do aquífero em cada poço tubular e posteriormente elaboradas as figuras ilustrativas da espessura do aquífero da área de estudo. Após a obtenção dos dados os parâmetros obtidos foram comparados com os valores de ponderação e coeficientes propostos por Chachadi e Lobo-Ferreira (2001).

Os mapas temáticos de Localização, Drenagem, Uso e Ocupação, Hipsometria, Declividade, Mapas Hidrodinâmicos de Profundidade e Nível Dinâmico, as interpolações espaciais e a criação do banco de dados da pesquisa foram gerados através do *software* ArcGIS Desktop versão 10.4 (ESRI, 2015).

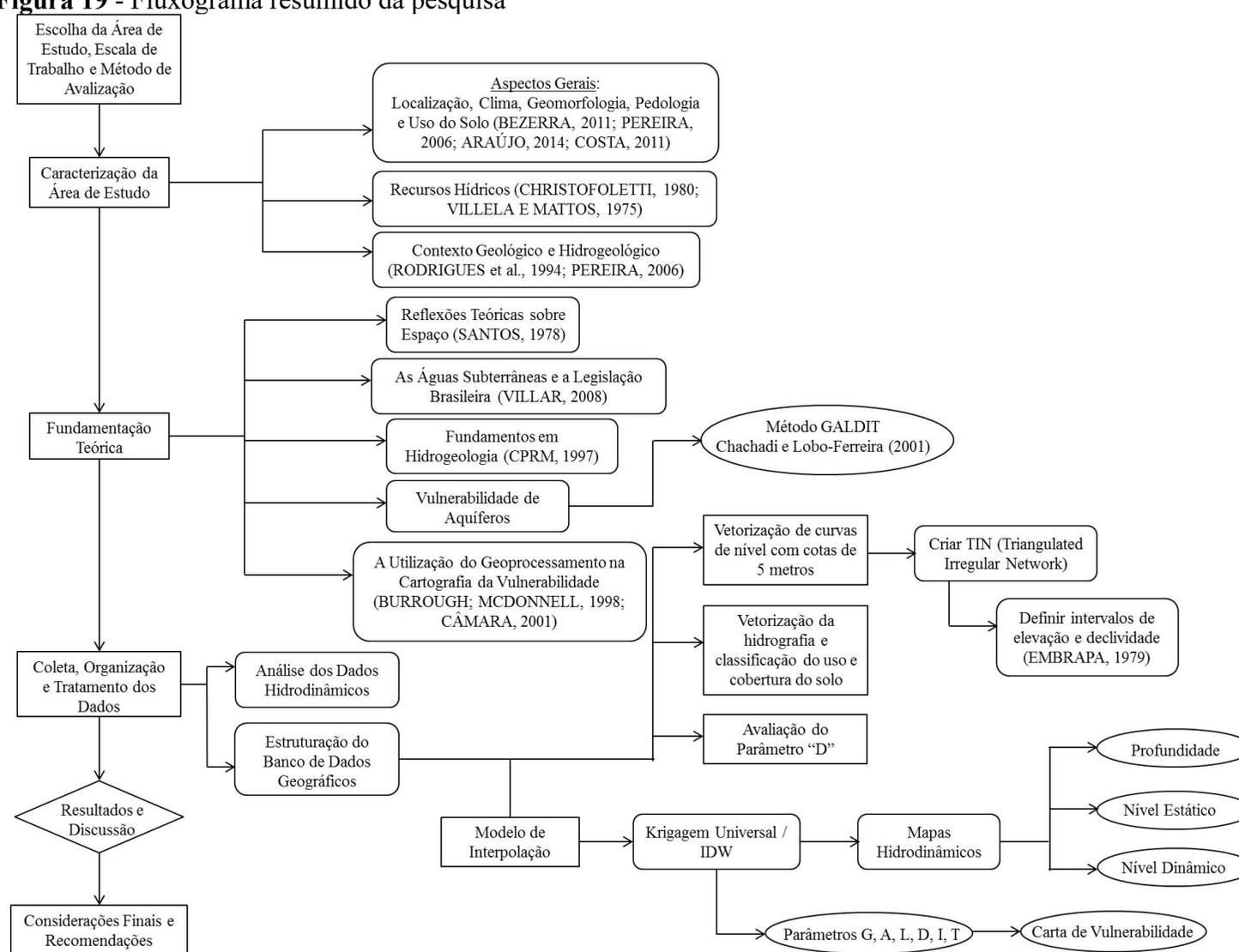
¹O *Aquifer Win32* é um software de avaliação de teste de aquífero. A interface do usuário permite que os ajustes sejam feitos para os parâmetros do aquífero e do poço à medida que a informação é atualizada e verificada.

4.2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi estruturada em 08 etapas de trabalho (Figura 19), quais sejam:

- I.** Delimitação da área de estudo e definição da escala do trabalho;
- II.** Caracterização da área de estudo;
- III.** Fundamentação teórica;
- IV.** Trabalhos de Campo, Coleta de amostras de água subterrânea.
- V.** Organização dos dados e Estruturação do banco de dados geográficos;
- VI.** Geração dos mapas temáticos;
- VII.** Discussão dos resultados;
- VIII.** Considerações finais e recomendações.

Figura 19 - Fluxograma resumido da pesquisa



Fonte: Martins, 2018

4.2.1. Delimitação da Área de Estudo e Definição da Escala do Trabalho

A delimitação da área de estudo baseou-se em literaturas específicas que tratam de bacias hidrográficas. A delimitação da bacia do rio Bacanga com uma área de 105 km² foi ratificada nos trabalhos de Pereira (2006) e Bezerra (2011).

A escala de trabalho dos mapas de vulnerabilidade foi definida com base nas Cartas Topográficas da Diretoria de Serviços Geográficos – DSG (1980) do Exército Brasileiro, com escala de 1:10.000.

Entende-se como bacia hidrográfica ou bacia de drenagem como a área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Assim sendo, após gerar o Modelo Digital de Terreno – MDT foi traçado o perfil longitudinal do terreno, o qual possibilitou a investigação do decaimento topográfico da área para delimitação do curso inferior do rio Bacanga, conforme a disposição dos canais de drenagem existentes.

4.2.2. Elaboração da caracterização da área de estudo e fundamentação teórica

Para uma melhor compreensão de aspectos relevantes para o desenvolvimento dessa pesquisa, efetuou-se a caracterização da área de estudo, concentrando-se principalmente na geologia e hidrogeologia, em âmbito regional e local, bem como numa visão global sobre os recursos hídricos. Para tanto, foram consultados três tipos de base de dados, quais sejam:

I. Publicações Científicas: referem-se a dissertações, teses, anais de eventos científicos, periódicos nacionais e internacionais, com enfoque naqueles mais atuais, a fim de alicerçar as proposições, tendo como principais autores estudados Lobo Ferreira e Chachadi (2001), Feitosa e Manoel Filho (1997), Rebouças (1984), Pereira (2006), Bezerra (2011), Fetter (1988) dentre outros, assim como ratificar as considerações acerca dos dados e resultados obtidos.

II. Relatórios Técnicos: correspondem a documentos referentes à situação dos recursos hídricos. Esses dados foram obtidos junto à Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SEMA e à Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA.

III. Documentos Cartográficos: representam o Mapa Geológico do Estado do Maranhão (CPRM); Carta de Zoneamento Hidrogeológico e de Pontos de Água – Folha São Luís - SA 23-Z-A (RODRIGUES et al, 1994), arquivos formato *shapefile* de Pereira (2006),

Bezerra (2011) e dados coletados em campo.

4.2.2.1. Trabalhos de Campo Coleta, Organização e Tratamento dos dados.

Os dados dos poços tubulares existentes na área da bacia do rio Bacanga foram adquiridos a partir do acervo da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA e da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais - SEMA.

Estes dados foram georreferenciados e organizados em planilhas Excel, com a presença de informações como: coordenadas geográficas, profundidade, vazão, nível estático, nível dinâmico, proprietário, finalidade do uso e outros. Além analisar as características hidrogeologias dos poços, foram tabulados os dados das análises físico-químicas da água dos poços. Realça-se ainda, a existência – em alguns casos – de perfil litológico e teste de bombeamento, o que viabilizará a classificação dos aquíferos em livre, semiconfinado e confinado, por exemplo.

Os trabalhos de campo foram executados em parceria com alunos de graduação em Geografia da Universidade Federal do Maranhão – UFMA do Laboratório de Estudo de Bacias - LEBAC, onde foram realizados o mapeamento sistemático e a coleta de água subterrânea na área de interesse.

4.2.3. Coleta de água nos poços para análise físico-química

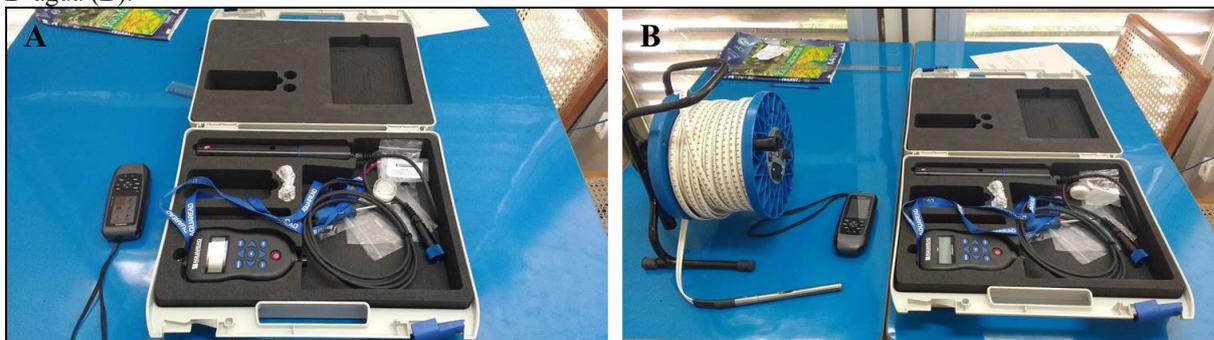
A atividade se inicia a partir de um encontro prévio com os líderes comunitários o Senhor Sebastião Santos – União de Moradores da Vila Dom Luís e o Senhor José Ferreira do Nascimento – Conselho Político da Vila Embratel, que se disponibilizaram para conversar com a comunidade a fim de esclarecer a importância do trabalho e para obtenção de maior número de poços mapeados.

Para a execução dos trabalhos de campo foi realizada uma análise prévia dos limites da bacia, dos bairros que compreendem a área da bacia e o levantamento prévio de poços existentes tendo como base a SEMA e a CAEMA.

As informações foram coletadas no período chuvoso, assim como na preamar, uma vez que proporcionalizaria um maior esclarecimento sobre fenômeno da cunha salina e o comportamento do aquífero frente à amplitude de maré juntamente com os compostos inorgânicos presentes nas águas subterrâneas advindos das rochas e sedimentos do Grupo Barreiras e Itapecuru.

Foi realizada análise de água subterrânea *in situ com* 8 (oito) poços com a sonda multiparâmetro da *Aquaread AP800* (Foto 4) que visa à avaliação de parâmetros como Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pH, Salinidade, Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Oxigênio Dissolvido (OD), Turbidez (uNT), de propriedade do LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias da Universidade Federal do Maranhão. Através desses parâmetros teremos uma caracterização física da água, atual da área de estudo, principalmente dos teores de salinidade e condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) que indicaram a presença de sais na água. Sendo um passo inicial para a avaliação da qualidade das águas subterrâneas da área de estudo, propiciando a obtenção do parâmetro I (impacto do estado atual da intrusão marinha) do método GALDIT que busca a correlação de Cloretos e Bicarbonatos existentes.

Foto 4 - Sonda Multiparâmetro (A); Sonda Multiparâmetro com Medidor Elétrico Analógico de Nível Estático D'água (B).



Fonte: Martins, 2018.

Inicialmente, a sonda passou por um processo de lavagem de seus sensores de temperatura, pH, com água destilada. Posteriormente, realizou-se a coleta da água nos poços cacimbas estudada e finalmente inserida a sonda para a realização da leitura.

Foram analisados inicialmente 06 (seis) poços do tipo cacimba na comunidade Dom Luís (Foto 5). Elenca-se ainda a averiguação dos dados dos poços tubulares disponibilizados pela SEMA, os quais continham as informações supra, assim como informações adicionais como por exemplo, Cloretos, Magnésio, Carbonetos, dentre outros. Avaliou-se ainda os parâmetros da qualidade da água do rio Bacanga (Foto 6) para a avaliação da salinidade do mesmo.

Foram enviadas também, amostras de água subterrânea em diferentes pontos da bacia do Bacanga ao Laboratório de Água da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do Parâmetro I - Estado atual da Intrusão salina, sendo um passo significativo para a correlação entre cloretos e bicarbonatos, conforme determina o método GALDIT.

Foto 5 - Poço do tipo cacimba (A e B).



Fonte: Martins, 2018.

Foto 6 - Equipe de campo realizando análise físico-química através de sonda multiparâmetro (A e B)



Fonte: Martins, 2018.

4.2.4. Aferição do Nível Estático dos Poços

Trata-se de uma etapa muito importante desta pesquisa, pois visa analisar o comportamento do aquífero aferindo o nível de água subterrânea, através Medidor Elétrico Analógico de Nível D'água (Foto 7), com essa informação será possível o atendimento da variável do parâmetro “L”, o qual avalia o nível piezométrico.

Foto 7 - Equipe de campo aferindo o nível de água em poço cacimba (A e B).



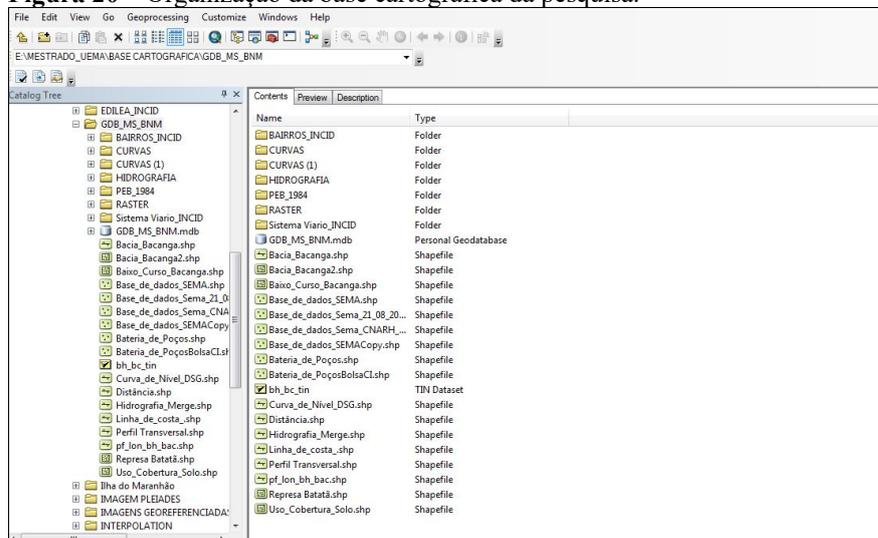
Fonte: Martins, 2018.

4.2.5. Organização do Banco de Dados Geográficos

Depois de realizadas todas as coletas e pesquisas necessárias à obtenção das variáveis utilizadas na etapa de geração e integração dos mapas temáticos, iniciou-se a estruturação do banco de dados geográficos em ambiente SIG. A partir da importação da planilha Excel para o *software ArcGIS Desktop* versão 10.4 (ESRI, 2015), criou-se um arquivo *shapefile* do tipo ponto, para representar espacialmente cada um dos 52 poços utilizados na pesquisa e seus respectivos atributos cadastrais e numéricos.

Nesse banco de dados geográficos, também foram incluídos os demais arquivos vetoriais utilizados nessa pesquisa (Figura 20).

Figura 20 – Organização da base cartográfica da pesquisa.



Fonte: Martins, 2018.

4.2.6. Elaboração dos Mapas Temáticos

Esta etapa consistiu na elaboração de mapas em ambiente SIG utilizando o software ArcGIS Desktop 10.4 tais como: Drenagem, Hipsometria, Declividade, Localização dos Poços Tubulares, Profundidade dos Poços Tubulares, Nível Dinâmico e Uso e Ocupação do Solo.

Hipsometria

A hipsometria é uma técnica de representação da elevação de um terreno através de cores. Geralmente é utilizado um sistema de graduação de cores que varia dos tons mais quentes aos mais frios, representando respectivamente as áreas com maiores e menores elevações.

Sua elaboração é realizada dentro do ambiente SIG através da extensão *3D Analyst Tools*, utilizando como fonte de entrada de dados, curvas de nível, as quais nesta pesquisa foram vetorizadas utilizando cartas topográficas DSG²-São Luís na escala de 1:10.000.

O processo para transformar curvas de nível em um Modelo Digital de Terreno se dá através de uma técnica denominada Rede Triangulada Irregular³ (TIN) a qual consiste em uma representação baseada em vetores de uma superfície. O TIN é composto de uma série de triângulos contíguos e não sobrepostos que são conhecidos como faces. Eles são construídos a partir de uma série de pontos usando uma técnica chamada triangulação de *Delaunay*, na qual uma rede que conecta cada ponto aos seus vizinhos mais próximos é construída para formas de faces triangulares

Os TINs são construídos a partir de uma série de pontos irregularmente espaçados que são significativos para a superfície, como por exemplo, picos, vales ou locais onde a inclinação muda abruptamente.

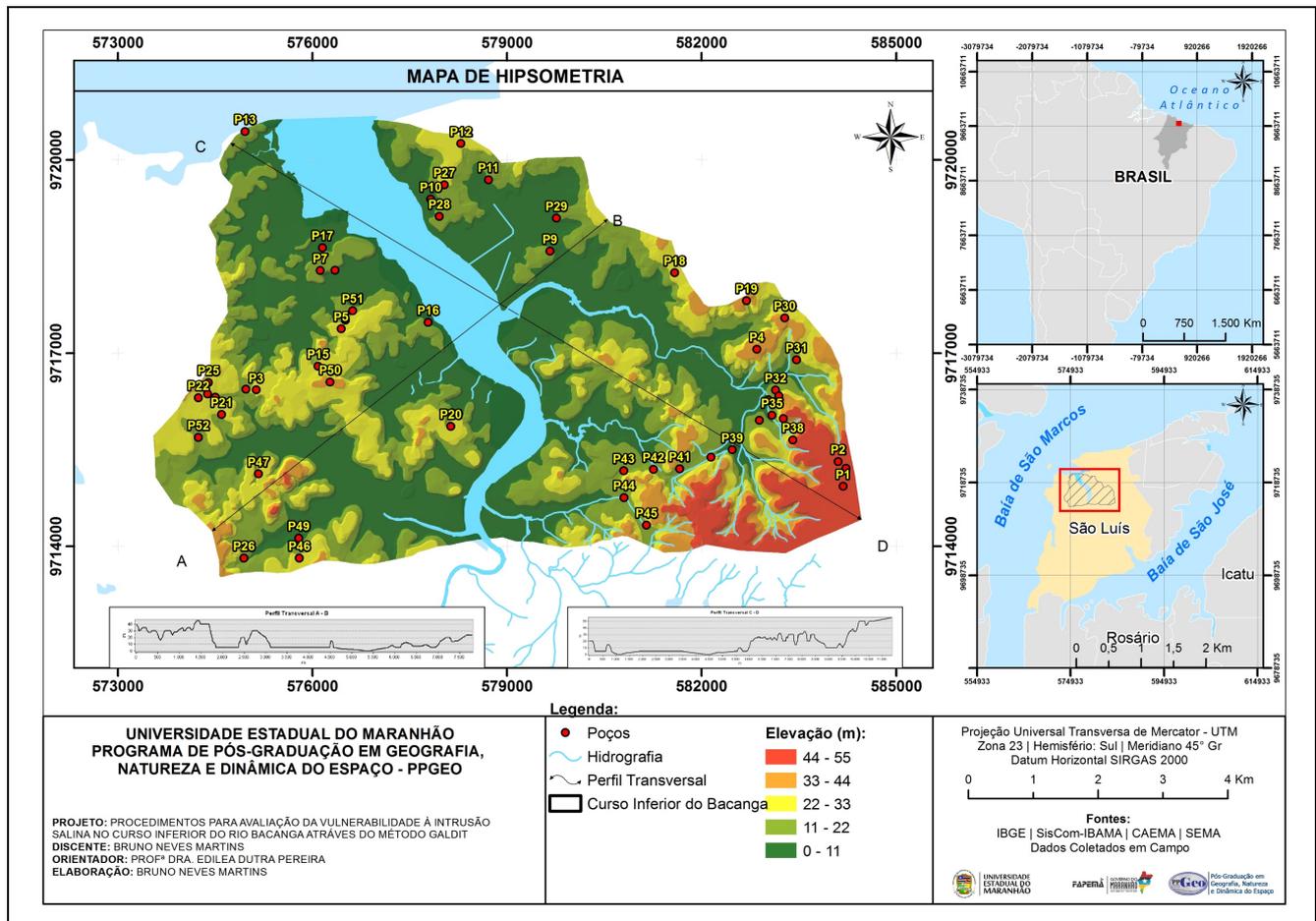
Depois de gerado o TIN do curso inferior da bacia do rio Bacanga, foram determinados os intervalos de altitude em metros (0-11; 11-22; 22-33; 33-44; 44-55) em *Elevation* para representação digital do terreno.

Como resultado deste procedimento tem-se o Mapa de Hipsométrico do curso inferior da bacia do Bacanga (Figura 21).

²Diretoria de Serviço Geográfico atribuída por Portaria Ministerial de 1953.

³*Triangulated Irregular Network*.

Figura 21-Mapa de Hipsometria da porção inferior da bacia do rio Bacanga.



Fonte: Martins, 2018

Declividade

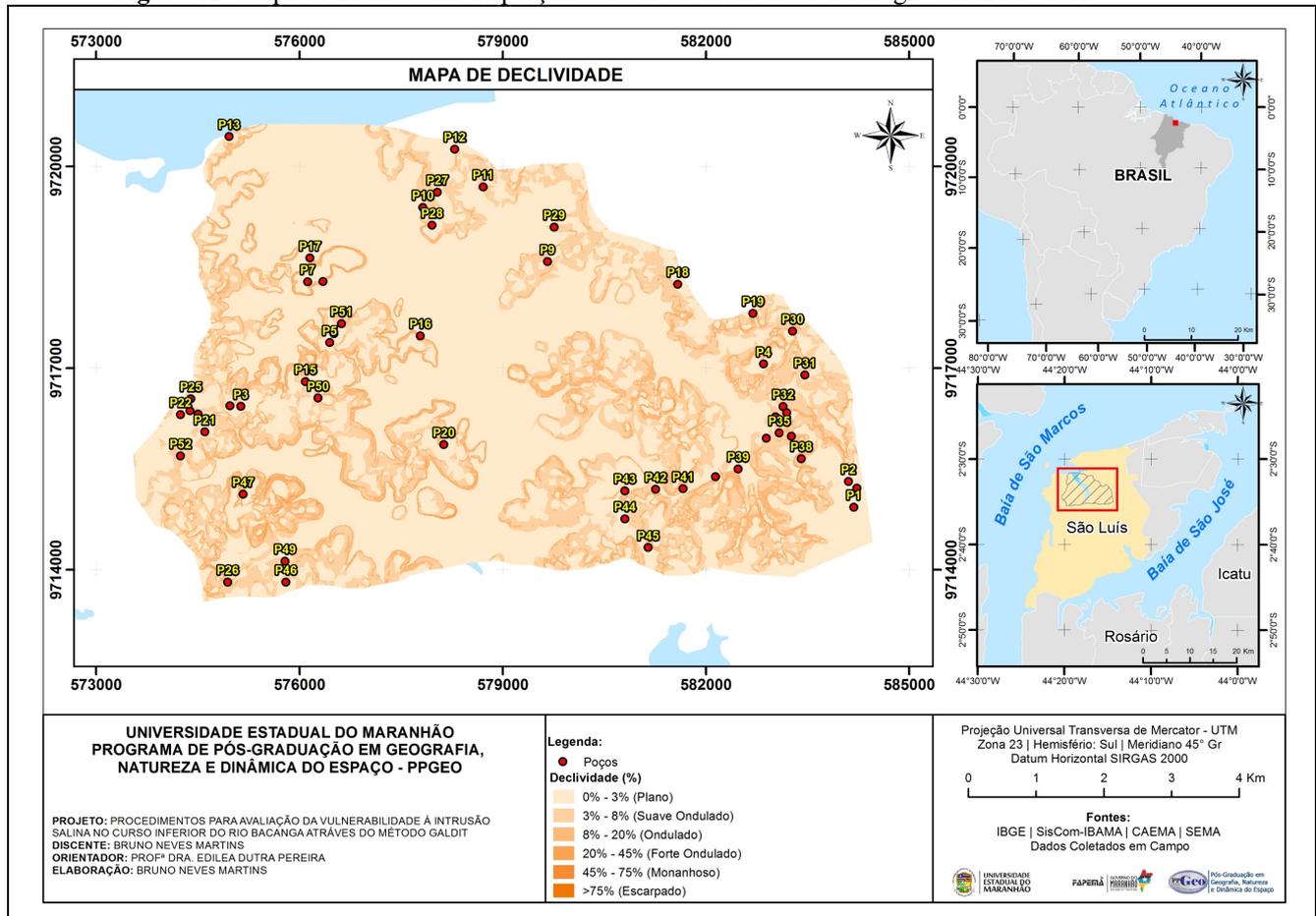
O mapa de declividade é uma ferramenta de relevante importância no apoio a estudos geológicos, hidrológicos, ecológicos e geomorfológicos. A geração de mapas temáticos de classes de declividade tem se destacado como uma técnica importante na detecção de áreas críticas para deslizamento de encostas, análises de terreno para contextualização urbana, no planejamento de lavouras agrícolas e na identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de inundações (CPRM, 2010).

Assim como o mapa hipsométrico, o processo de elaboração do mapa de declividade leva em consideração a Rede Triangulada Irregular, mas neste caso com o uso da ferramenta *Slope*.

A metodologia adotada como referência na atribuição das classes de declividade (Figura 22) foi a do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e EMBRAPA (Plano 0 a 3%, Suave ondulado 3 a 8%, Ondulado 8 a 20%, Forte ondulado 20 a 45%, Montanhoso 45 a 75% e Escarpado > 75%).

Com base nos resultados obtidos, observou-se que o relevo do curso inferior da bacia do rio Bacanga encontra-se classificado, em sua maior parte, como plano (0 a 3%) e Suave Ondulado (3 a 8%).

Figura 22 -Mapa de Declividade da porção inferior da bacia do rio Bacanga- São Luís –MA.



Fonte: Martins, 2018

Modelo de Interpolação para Elaboração dos Mapas Hidrogeológicos e de Vulnerabilidade

Modelos de interpolação de dados são amplamente usados e desenvolvidos pelo mundo todo, por exemplo, auxiliam na análise de dados climáticos, de elevação e declividade.

O objetivo da interpolação espacial é criar uma superfície que modela os fenômenos amostrados da melhor maneira possível. Para fazer isso, começa-se com um conjunto de medidas conhecidas e, usando método de interpolação, se estima os valores desconhecidos para a área (UFES, 2017).

O modelo de interpolação espacial de dados está intrinsecamente ligado à correlação espacial, em que se inspira da Primeira Lei da Geografia formulada por Waldo Tobler (UFES, 2017) que pontua “valores espacialmente próximos tendem a ter uma correlação de valores

semelhantes”.

Dentre os métodos de interpolação de dados temos o Inverso do Quadrado da Distância (IDW) e *Krigagem* (Ordinária e Universal), por exemplo.

O modelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW) considera o conceito de autocorrelação espacial. Assume que quanto mais próximo do ponto de amostra estiver da célula cujo valor será estimado, mais próximo o valor da célula se assemelhará do valor do ponto de amostra. (UFES, 2017)

A *Krigagem* é um dos mais complexos e poderosos interpoladores. Aplica sofisticados métodos estatísticos que consideram as características únicas de seus conjuntos de dados. O modelo utiliza uma matemática sofisticada, medindo distância entre todos os possíveis pares de pontos, utilizando a informação para modelar a autocorreção espacial para a superfície particular que se deseja interpolar.

Existem dois métodos de *Krigagem* utilizados, conforme UFES (2017): Ordinária e Universal.

Krigagem Ordinária: assume que os dados não possuem uma tendência, que a tendência de ponderação deve ser uma suposição pessoal de ponderação.

Krigagem Universal: assume que há uma tendência nos dados. Para esta dissertação será utilizada a *Krigagem* Universal para a Carta de Vulnerabilidade, assim como nos Mapas Hidrodinâmicos de Profundidade, Nível Estático e Nível Dinâmico dos poços do curso inferior da bacia do rio Bacanga.

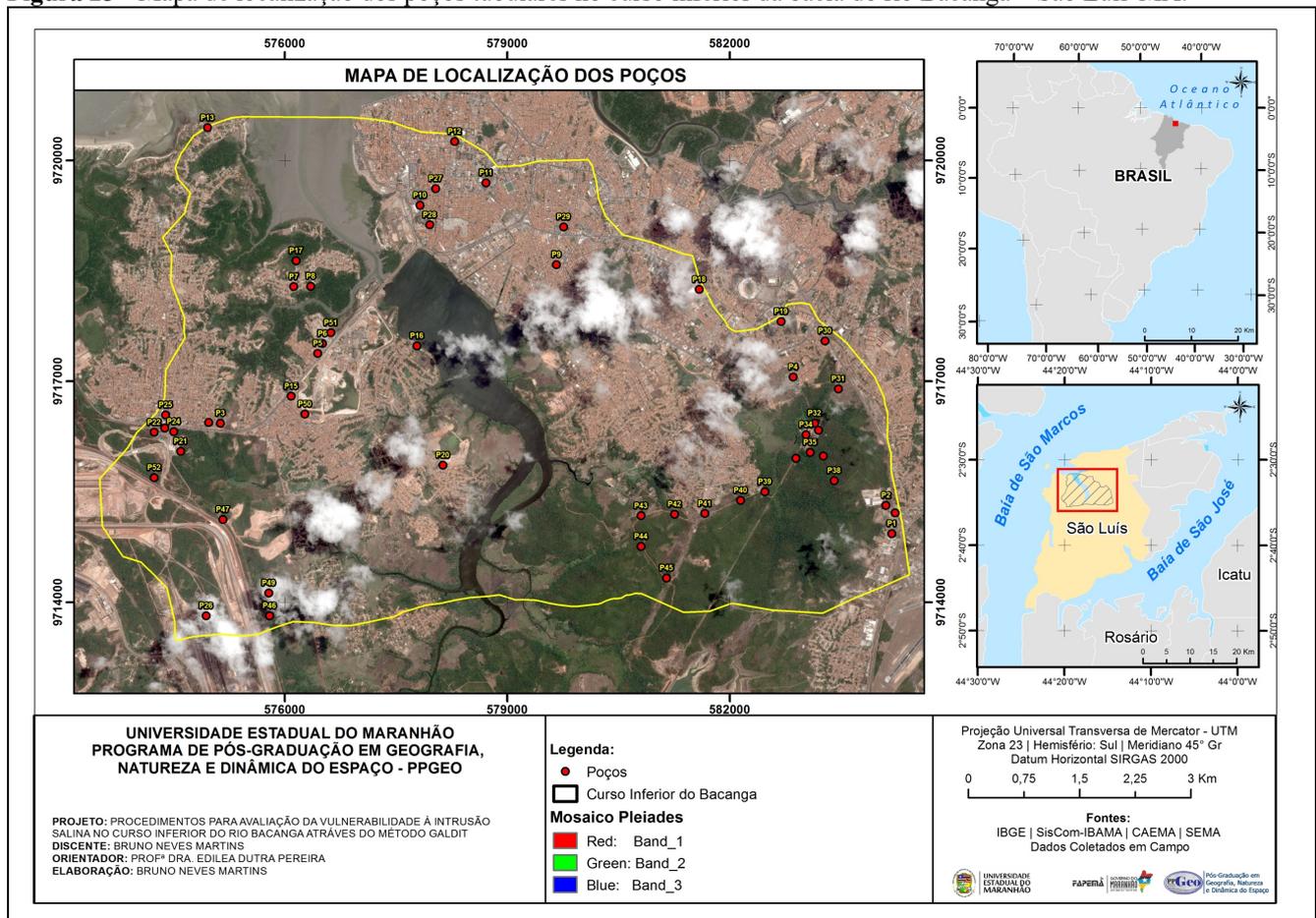
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados e discutidos os resultados alcançados a partir do desempenho sistemático dos procedimentos metodológicos apresentados.

5.1. LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS TUBULARES

Os poços tubulares localizados no curso inferior do rio Bacanga foram cadastrados a partir da base de dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA, da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA e através de mapeamento de campo em comunidades inseridas na área de estudo. Foram cadastrados um quantitativo 52 poços, sendo 48 poços tubulares e 04 poços cacimbas (Figura 23).

Figura 23 - Mapa de localização dos poços tubulares no curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.



Fonte: Martins, 2018

Dentre os poços cadastrados, foram realizadas visitas de campo para registros fotográficos (Fotos 8, 9 e 10) e análise de alguns poços selecionados aleatoriamente em toda

área de estudo, além disso, efetuou-se um levantamento fotográfico aéreo, através de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT ou Drone) da marca *DJI* modelo *Phantom3 Professional*, a fim de obter imagens do curso inferior do rio Bacanga (Foto 11).

Foto 8 – Vista parcial do poço tubular P-32–Parque Estadual do Bacanga, São Luís/MA.



Fonte: Martins, 2018

Foto 9- Vista parcial do poço tubular P-35 – Parque Estadual do Bacanga, São Luis/MA.



Fonte: Martins, 2018.

Foto 10 - Vista parcial do poço tubular P-39 – Parque Estadual do Bacanga, São Luis/MA.



Fonte: Martins, 2018.

Foto 11- Vista aérea a jusante do rio Bacanga– São Luís-MA.



Fonte: Martins, 2018.

Visando atender a metodologia proposta, foram catalogadas as informações hidrogeológicas dos poços tais como: Profundidade (PROF.), Nível Estático (NE) e Nível Dinâmico (ND). Contudo, informações adicionais estão presentes do banco de dados da

pesquisa tais como: número da autorização (outorga), Poço Tubular ou Cacimba, coordenadas geográficas dos poços, dentre outras (Quadro 7).

Quadro 7-Poços tubulares presentes no curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.

Poço	Processo/SEMA	Proprietário	Município	Finalidade	ESTE	SUL	Região Hidrográfica	Tipo de Manancial	Aquífero	Prof (m)	NE (m)	ND (m)	Vazão m³_h	Período_h
P1	15070024845/2015	Concreto Redimix do Brasil SA	São Luís	Comércio e Serviços	584182,19	9714928,88	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo		68	27,1	32,7	5	8
P2	15120002402/2015	Caema	São Luís	Abastecimento público	584104,2962	9715313,429	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo		120	33,95	47,31	47	20
P3	15050019465/2015	Construtora Star Ltda	São Luís	Consumo Humano	575136,65	9716427,8	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo		40	6	28	2,5	2
P4	15120007425/2015	Centrais Elétricas do Norte do Brasil SA	São Luís	Outros	582851,5299	9717059,19	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Barreiras	80	26,4	30,87	8	5
P5	16030013751/2016	Liquigás Distribuidora S/A	São Luís	Consumo Humano	576446,2572	9717376,886	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Itapecuru	100	32	32	4	10
P6	16050034773/2016	Parmenio Empreendimentos Imobiliários Ltda	São Luís	Consumo Humano	576508,0923	9717511,958	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Barreiras	98	39,1	49,5	6	8
P7	16100014023/2016	Caema	São Luís	Abastecimento público	576123,4119	9718283,795	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Barreiras	108	29,58	56,4	10	20
P8	0202511/2014	Caema	São Luís	Abastecimento público	576350,0848	9718287,973	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Itapecuru	108	29,58	56,4	10	18
P9	16090024805/2016	Caema	São Luís	Abastecimento público	579661,6903	9718581,867	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo	Itapecuru	181	44,9	56,7	60	20
P10	15040007865/2015	Mateus Supermercados	São Luís	Consumo Humano	577823,39	9719389,16	Ilhas Maranhenses	Subterrâneo		122	43	46	5	8

P1 1	141200074 26/2014	Bompreço Supermercado do Nordeste Ltda	São Luís	Consumo Humano	578714 ,51	971969 2,97	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		72	6	36,6	10	2
P1 2	160300016 00/2016	Sousa Barroso Engenharia e Serviços Ltda	São Luís	Consumo Humano	578290 ,5223	972025 3,935	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o	Barre iras	75	8	69	0,7	16
P1 3	151100010 00/2015	Caema	São Luís	Consumo Humano	574962 ,4651	972044 2,085	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o	Itape curu	120	45,9 6	76,2 9	17	20
P1 4		João do Poço	São Luís	Consumo Humano	574975 ,8114	971643 8,076	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		15	6,26	0	0	0
P1 5		Ferreira	São Luís	Consumo Humano	576088 ,341	971679 6,127	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		12	2,59	0	0	0
P1 6		Prof. Big	São Luís	Consumo Humano	577784 ,096	971747 8,72	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		8	1,16	0	0	0
P1 7	160700089 77/2016	Coimbra e Santiago	São Luís	Consumo Humano	576156 ,6417	971863 4,742	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		70	6,1	20,2	4	8
P1 8		Mateus Supermercados	São Luís	Consumo Humano	581585 ,4414	971824 6,09	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o	Barre iras	77	13,6	36,8	0	0
P1 9		Refrescos Guararapes	São Luís	Outros	582692 ,1467	971781 2,193	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		100	26,0 5	30,5 9	24	20
P2 0		Vitral Construção e Incorporação Ltda	São Luís	Consumo Humano	578132 ,1691	971586 0,338	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o	Barre iras	112	14	52	0	0
P2 1		Vale	São Luís	Indústria	574601 ,637	971604 8,312	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		150	42,8 1	49,0 9	11	20
P2 2		Vale	São Luís	Indústria	574243 ,8613	971630 6,733	Ilhas Maranhense	Subterrâne o	Itape curu	149	35,3 5	71,0 6	0	0

							s								
P2 3		Estrela Transportes Ltda	São Luís	Consumo Humano	574385 ,9444	971636 4,692	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo	Itape curu	50	12,2	33,8 8	4,3	2	
P2 4		Vale	São Luís	Indústria	574506 ,62	971631 4,52	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		136	19,5	46,4 6	39,4	20	
P2 5		Taguatur Taguatinga Transporte e Turismo Ltda	São Luís	Consumo Humano	574398 ,65	971654 2,1	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo	Itape curu	115	13,1 8	2,22	12	7	
P2 6		Vale	São Luís	Indústria	574943 ,81	971381 4,85	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		136	19,5	46,4 6	39,4	20	
P2 7	133493/20 13	Posto Luciana	São Luís	Consumo Humano	578034 ,7805	971961 4,473	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		60	7,2	12,4 5	6	2	
P2 8	157861/20 13	Protonatis Médica Cirúrgica	São Luís	Consumo Humano	577957 ,2447	971912 3,618	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		74	23,5 2	53,2	2,7	4	
P2 9	1387/2011	Aberlado Santos e Cia	São Luís	Indústria	579760 ,7969	971909 4,599	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		50	25	32	5	1	
P3 0	123411/20 13	Posto Americano	São Luís	Consumo Humano	583281 ,379	971754 6,859	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		60	12	16	10	4	
P3 1		Caema-P01B	São Luís	Abastecimen to Público	583462 ,2756	971689 7,013	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		142	21,4 4	44	0	0	
P3 2		Caema-P02	São Luís	Abastecimen to Público	583140 ,8317	971642 7,399	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		31	3,3	6,29	13,62	0	
P3 3		Caema-P01	São Luís	Abastecimen to Público	583193 ,2765	971633 5,25	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		142	21,4 4	44	80	0	

P3 4		Caema-P16	São Luís	Abastecimen to Público	583026 ,4803	971627 3,935	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		163	44,0 7	49,5 3	13	0
P3 5		Caema-P15	São Luís	Abastecimen to Público	583081 ,9271	971603 4,396	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		170	36,0 3	54,8 5	28,28	0
P3 6		Caema-P3C	São Luís	Abastecimen to Público	582890 ,4153	971595 4,672	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		152	26,3	34,4	9,89	0
P3 7		Caema-P13	São Luís	Abastecimen to Público	583261 ,0092	971598 2,09	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		58	6,15	8,85	17,6	0
P3 8		Caema-P17	São Luís	Abastecimen to Público	583405 ,9574	971565 0,38	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		160	49,5 9	63,8 4	31,3	0
P3 9		Caema-P4	São Luís	Abastecimen to Público	582473 ,2499	971549 7,395	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		158	15,2 3	40,3	72	0
P4 0		Caema-P5	São Luís	Abastecimen to Público	582142 ,7522	971538 0,904	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		150	44,8 5	58,4	31,68	0
P4 1		Caema-P6	São Luís	Abastecimen to Público	581663 ,9898	971520 3,086	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		168	46,7 5	79,6 9	20,84	0
P4 2		Caema-P7	São Luís	Abastecimen to Público	581256 ,3525	971519 4,109	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		160	49,8 5	64,6	31,6	0
P4 3		Caema-P8	São Luís	Abastecimen to Público	580802 ,3869	971517 2,874	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		174	23,8 5	29,3	15	0
P4 4		Caema-P9	São Luís	Abastecimen to Público	580805 ,2367	971475 5,272	Ilhas Maranhense s	Subterrâne o		153	42,7 5	56,8 9	31,6	0
P4 5		Caema-P10	São Luís	Abastecimen to Público	581147 ,7717	971432 8,264	Ilhas Maranhense	Subterrâne o		160	38,2 5	52,4	39,6	0

							s							
P4 6		Vale	São Luís	Indústria	575798 ,9337	971381 5,381	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		118	41,7	76,0 6	19,72	20
P4 7		Vale	São Luís	Indústria	575170 ,9019	971512 3,161	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		142, 7	41	58,3 5	39,77	0
P4 8		Lima Comercial de Combustível	São Luís	Comércio e Serviços	584227 ,1437	971521 0,798	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		60	6,8	11,2	0	2
P4 9		Vale	São Luís	Indústria	575787 ,9393	971412 4,456	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		132	38,0 2	63,8 4	26,16	20
P5 0		Desconhecido	São Luís		576274	971655 2	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		151	64,3 2	79,2 2	25,54	0
P5 1		Serveng Civilsan	São Luís	Indústria	576622 ,7783	971765 8,065	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		102	54,1	79,1	0	0
P5 2		Vale	São Luís	Indústria	574243	971569 1	Ilhas Maranhense s	Subterrâneo		150	51	69,5	16,18	0

Fonte: Martins, 2018

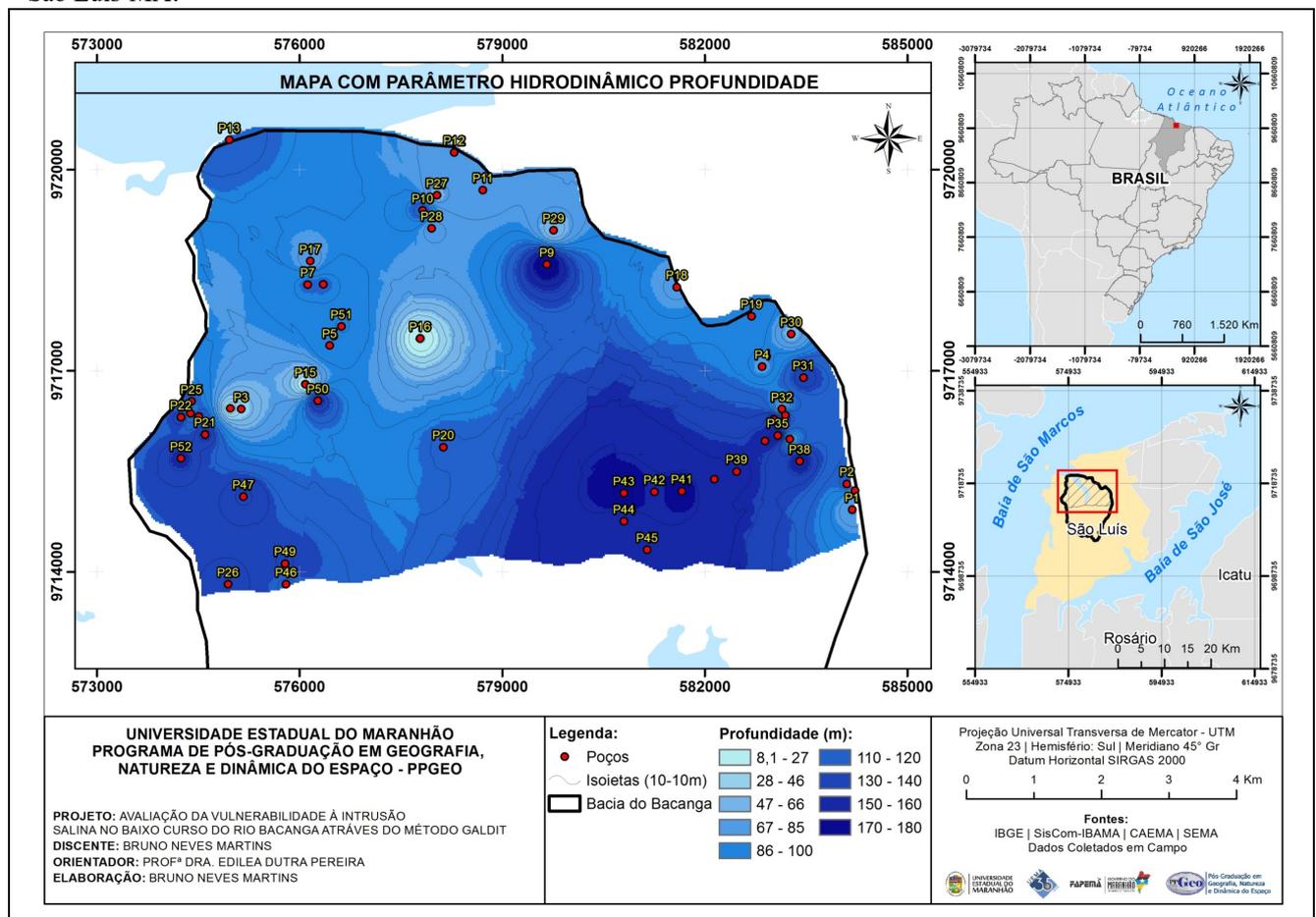
Os poços tubulares foram escolhidos sistematicamente em distâncias relativas para que não haja tendências nos resultados finais desta pesquisa, desta forma, buscaram-se poços com raio mínimo de 500 metros, assim, para evitar o fator de autocorreção espacial exacerbado.

5.2. ANÁLISE DOS DADOS HIDRODINÂMICOS

A partir das informações tabuladas foi gerado o mapa hidrodinâmico de profundidade dos poços (Figura 24), possibilitando assim, uma análise do comportamento da profundidade dos mesmos na bacia.

Observa-se que os poços tubulares (P-2, P-31, P-35, P-38, P-39, P-41, P-43, P-44 e P-45) apresentam profundidades que variam de 120m a 174m e encontram-se na margem direita do rio Bacanga na área de recarga de aquífero com altitudes que variam de 33-44m, com nível estático de 15-49m. Esses poços tubulares apresentam nível dinâmico que variam de 40m a 80m para estabilização a vazão de exploração, exceto o poço tubular P-43 que apresentou nível dinâmico de 29m e altitude 16m (Figura 25).

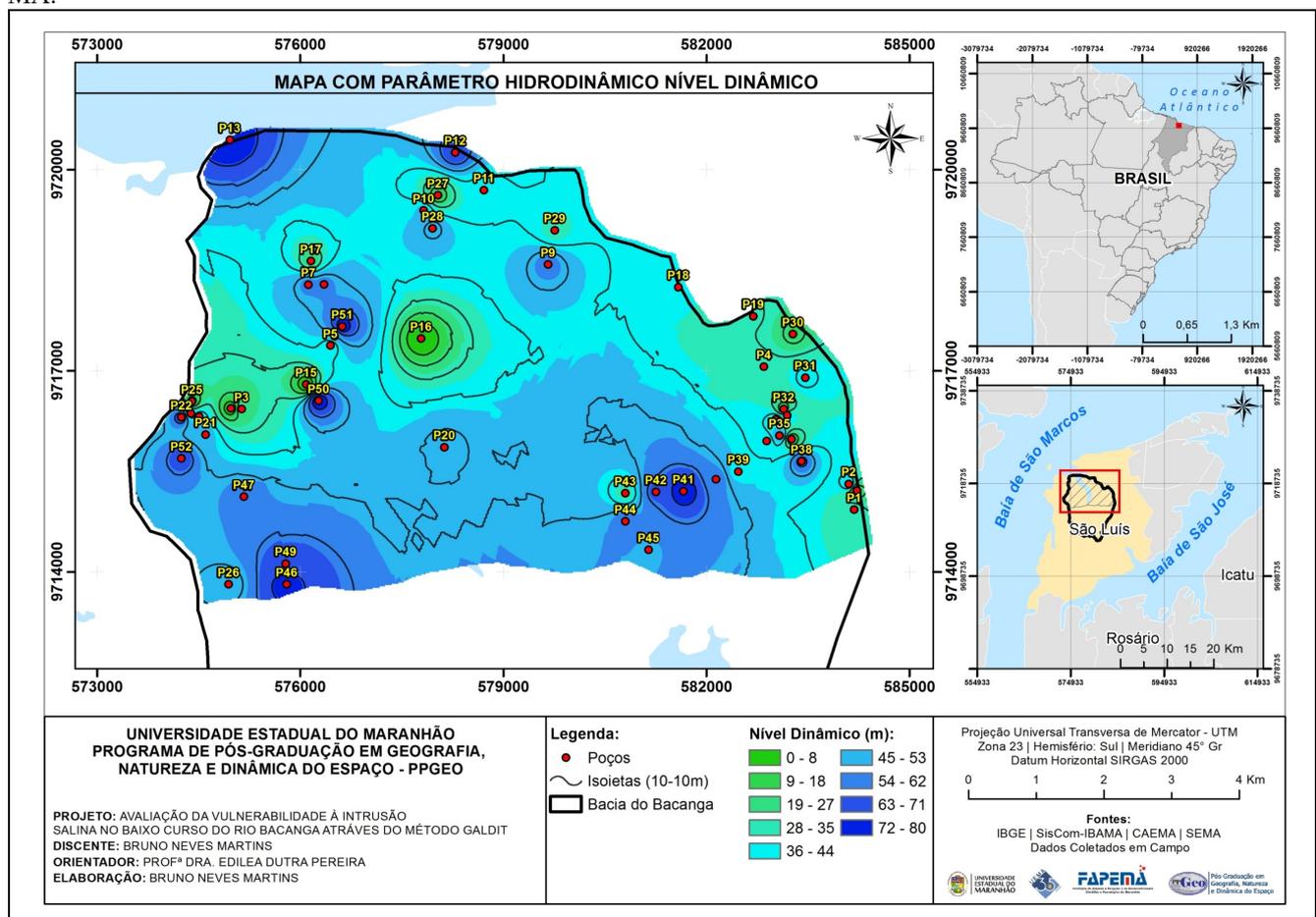
Figura 24- Mapa hidrodinâmico de profundidade dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.



Fonte: Martins, 2018

Na margem esquerda as áreas de recargas dos poços tubulares (P-5, P-15, P-20, P-21, P-22, P-25, P-26, P-46, P-47 e P-52) apresentaram profundidades que variam de 100m a 150m e com altitudes que variam de 22-44m e com nível estático variando de 32 a 76m e nível dinâmico variando de 14m a 51m (Figura 25). Destaca-se que as áreas de recarga da margem direita do rio Bacanga apresentam as maiores altitudes e nível mais rasos em relação às áreas de recarga da margem esquerda.

Figura 25 - Mapa de nível dinâmico dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga – São Luís-MA.



Fonte: Martins, 2018

5.3. ANÁLISE DOS PARÂMETROS TRANSMISSIVIDADE (T), CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K) E COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (S) DOS POÇOS ATRAVÉS DO SOFTWARE AQUIFERWIN 32.

Para essa atividade foi criada uma planilha *Excel* (Tabela 14), a qual permite a o cálculo de rebaixamento do aquífero através da fórmula “ $Reb=ND-NE$ ”, onde *Reb* significa rebaixamento, *ND* nível dinâmico e *NE* significa Nível Estático. Quanto às unidades utilizadas para cada parâmetro são: Tempo (minutos), Rebaixamento (metros), Transmissividade (m^2/min), vazão (m^3/min).

Tabela 14- Planilha para cálculo do rebaixamento do aquífero na porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís - MA.

Hora	Tempo	NE	ND	REB
00:01	01	12,2	12,81	0,608
00:02	02	12,2	14,72	2,539
00:03	03	12,2	15,64	3,438
00:04	04	12,2	16,49	4,288
00:05	05	12,2	17,44	5,244
00:06	06	12,2	18,41	6,206
00:07	07	12,2	19,08	6,878
00:08	08	12,2	19,61	7,406
00:09	09	12,2	19,96	7,76
00:10	10	12,2	20,27	8,07
00:11	11	12,2	20,50	8,296
00:12	12	12,2	20,91	8,728
00:50	50	12,2	21,09	8,889
00:55	55	12,2	21,284	9,084
01:00	60	12,2	21,441	9,241
01:10	70	12,2	21,608	9,408
01:20	80	12,2	21,82	9,62
01:30	90	12,2	21,054	8,854
01:40	100	12,2	22,299	10,099
01:50	110	12,2	23,121	10,921
2:00	120	12,2	23,918	11,718
02:15	135	12,2	24,592	12,392
02:30	150	12,2	25,228	13,028
02:45	165	12,2	25,812	13,612
03:00	180	12,2	26,345	14,145
03:15	195	12,2	26,86	14,66
03:30	210	12,2	27,372	15,172
03:45	225	12,2	27,883	15,683

04:00	240	12,2	28,345	16,145
04:15	255	12,2		-12,2
04:20	240	12,2	28,824	16,624
04:30	260	12,2		-12,2
04:40	270	12,2	29,3	17,1
04:45	285	12,2		-12,2
05:00	300	12,2	29,777	17,577
05:15	315	12,2		-12,2
05:20	320	12,2	30,246	18,046
05:30	330	12,2		-12,2
05:40	340	12,2	30,731	18,531
05:45	345	12,2		-12,2
06:00	360	12,2	31,168	18,968
06:15	375	12,2		-12,2
06:30	390	12,2	31,534	19,334
06:45	405	12,2		-12,2
07:00	420	12,2	31,904	19,704
07:15	435	12,2		-12,2
07:30	450	12,2	32,022	19,822
07:45	465	12,2		-12,2
08:00	480	12,2	32,515	20,315
08:15	495	12,2		-12,2
08:30	510	12,2	32,732	20,532
08:45	525	12,2		-12,2
09:00	540	12,2	32,944	20,744
09:15	555	12,2		-12,2
09:30	570	12,2		-12,2
09:40	560	12,2	33,107	20,907
09:45	585	12,2		-12,2
10:00	600	12,2		-12,2
10:15	615	12,2		-12,2
10:20	620	12,2	33,233	21,033
10:30	630	12,2		-12,2
10:45	645	12,2		-12,2
11:00	660	12,2	33,344	21,144
11:15	675	12,2		-12,2
11:30	690	12,2		-12,2
11:40	700	12,2	33,468	21,268
11:45	705	12,2		-12,2
12:00	720	12,2		-12,2
12:15	735	12,2		-12,2
12:20	740	12,2	33,555	21,355
12:30	750	12,2		-12,2
12:45	765	12,2		-12,2

13:00	780	12,2	33,627	21,427
13:15	795	12,2		-12,2
13:30	810	12,2		-12,2
13:45	825	12,2		-12,2
14:00	840	12,2	22,678	10,478
14:15	855	12,2		-12,2
14:30	870	12,2		-12,2
14:45	885	12,2		-12,2
15:00	900	12,2	33,729	21,529
15:15	915	12,2		-12,2
15:30	930	12,2		-12,2
15:45	945	12,2		-12,2
16:00	960	12,2	33,763	21,563
16:15	975	12,2		-12,2
16:30	990	12,2		-12,2
16:45	1005	12,2		-12,2
17:00	1020	12,2	33,796	21,596
17:15	1035	12,2		-12,2
17:30	1050	12,2		-12,2
17:45	1065	12,2		-12,2
18:00	1080	12,2	33,822	21,622
18:15	1095	12,2		-12,2
18:30	1110	12,2		-12,2
18:45	1125	12,2		-12,2
19:00	1140	12,2	33,843	21,643
19:15	1155	12,2		-12,2
19:30	1170	12,2		-12,2
19:45	1185	12,2		-12,2
20:00	1200	12,2	33,862	21,662
20:15	1215	12,2		-12,2
20:30	1230	12,2		-12,2
20:45	1245	12,2		-12,2
21:00	1260	12,2	33,881	21,681
21:15	1275	12,2		-12,2
21:30	1290	12,2		-12,2
21:45	1305	12,2		-12,2
22:00	1320	12,2	33,884	21,684
22:15	1335	12,2		-12,2
22:30	1350	12,2		-12,2
22:45	1365	12,2		-12,2
23:00	1380	12,2	33,889	21,689
23:15	1395	12,2		-12,2
23:30	1410	12,2		-12,2
23:45	1425	12,2		-12,2

00:00	1440	12,2	33,89	21,689
-------	------	------	-------	--------

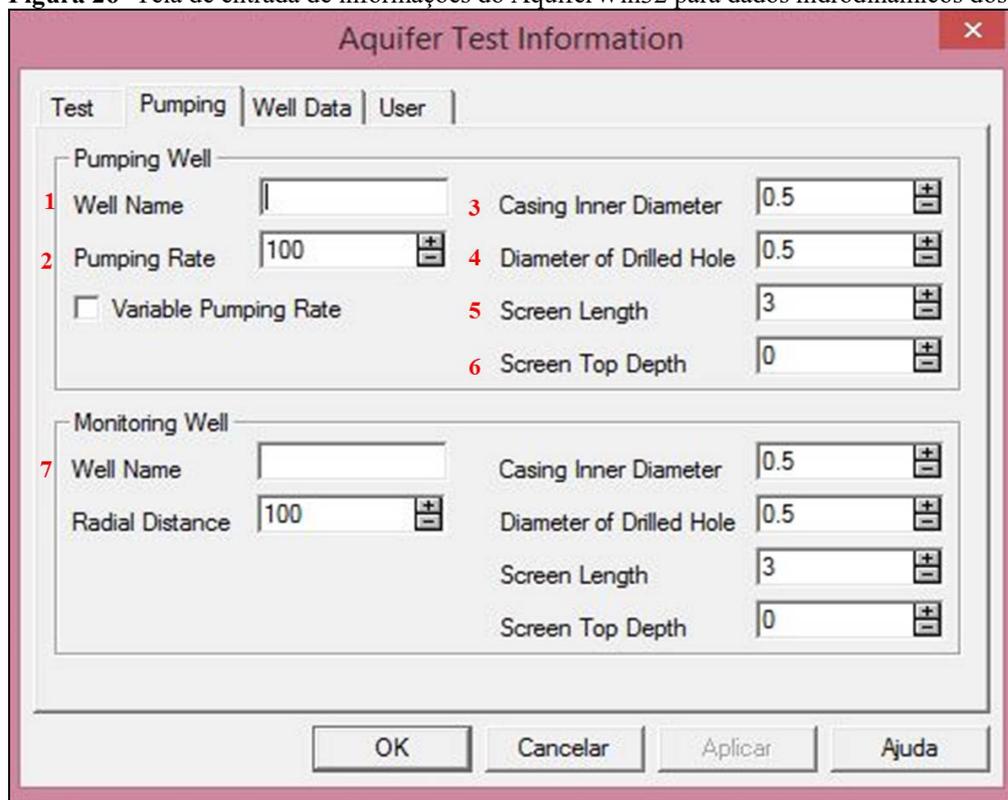
Fonte: Martins, 2018.

Para simular o comportamento do nível da água durante os testes de bombeamento, foi utilizado o software *Aquifer Win32*⁴ (*Environmental Simulations, Inc.*, 2003). Os valores das propriedades hidrogeológicas do modelo foram obtidos dos resultados dos testes de bombeamento contidos nos estudos hidrogeológicos dos poços e distribuídos pelas camadas do modelo.

Uma vez que o modelo é construído no *AquiferWin32*, ele pode ser usado tanto para os resultados de previsão como para análise do teste do aquífero atual.

A entrada de dados no programa *AquiferWin32*, exige a entrada de informações básicas conforme (Figura 26):

Figura 26- Tela de entrada de informações do *AquiferWin32* para dados hidrodinâmicos dos poços tubulares.



Fonte: Martins, 2018

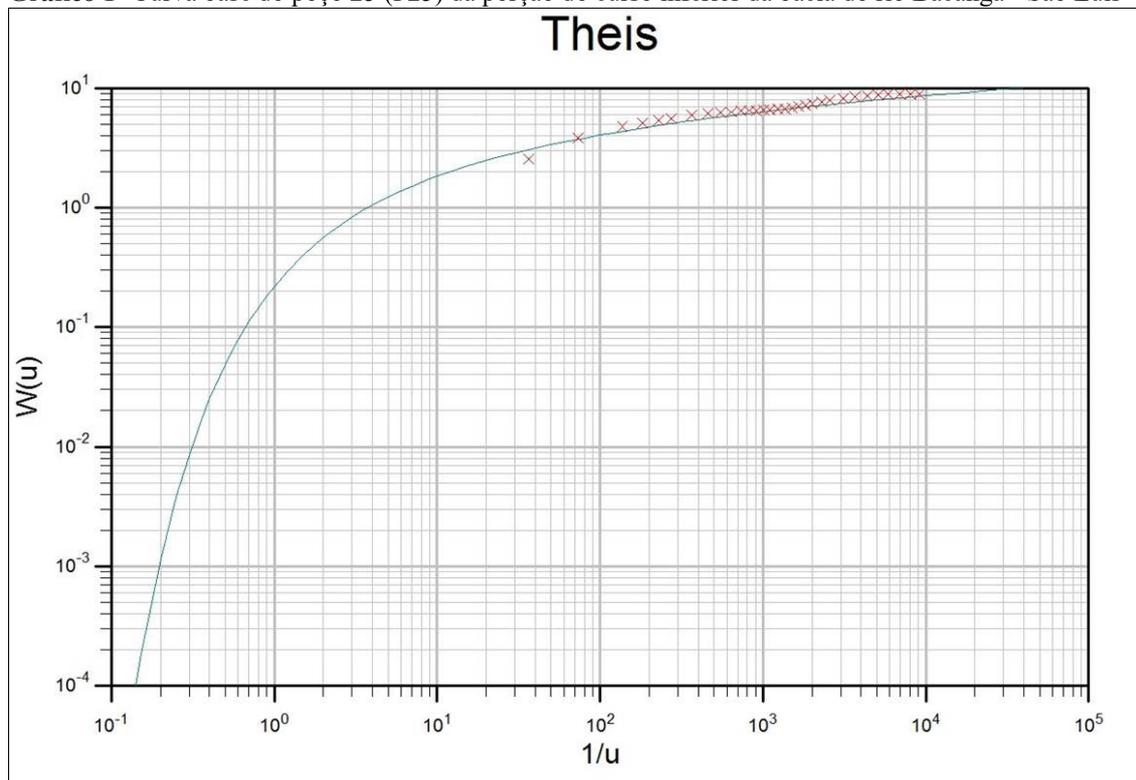
Onde,

⁴O *Aquifer Win32* é um software de avaliação de teste de aquífero. A interface do usuário permite que os ajustes sejam feitos para os parâmetros do aquífero e do poço à medida que a informação é atualizada e verificada.

- 1 – Nome do Poço;
- 2 - Vazões do poço (m³/min);
- 3- Diâmetro de perfuração;
- 4- Diâmetro de revestimento;
- 5- Comprimento dos filtros;
- 6- Profundidade do Topo do primeiro filtro;
- 7- Distância do poço piezométrico;

Modelo utilizado para a curva base do aquífero foi proposto por *Theis* (1963). Até o momento, foram analisados 06 (seis) poços tubulares, os quais possuem teste de bombeamento e disponibilizados pela SEMA, conforme (Gráficos 1 a 6; Quadros 8 a 13).

Gráfico 1- Curva base do poço 25 (P25) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA.



Fonte: Martins, 2018

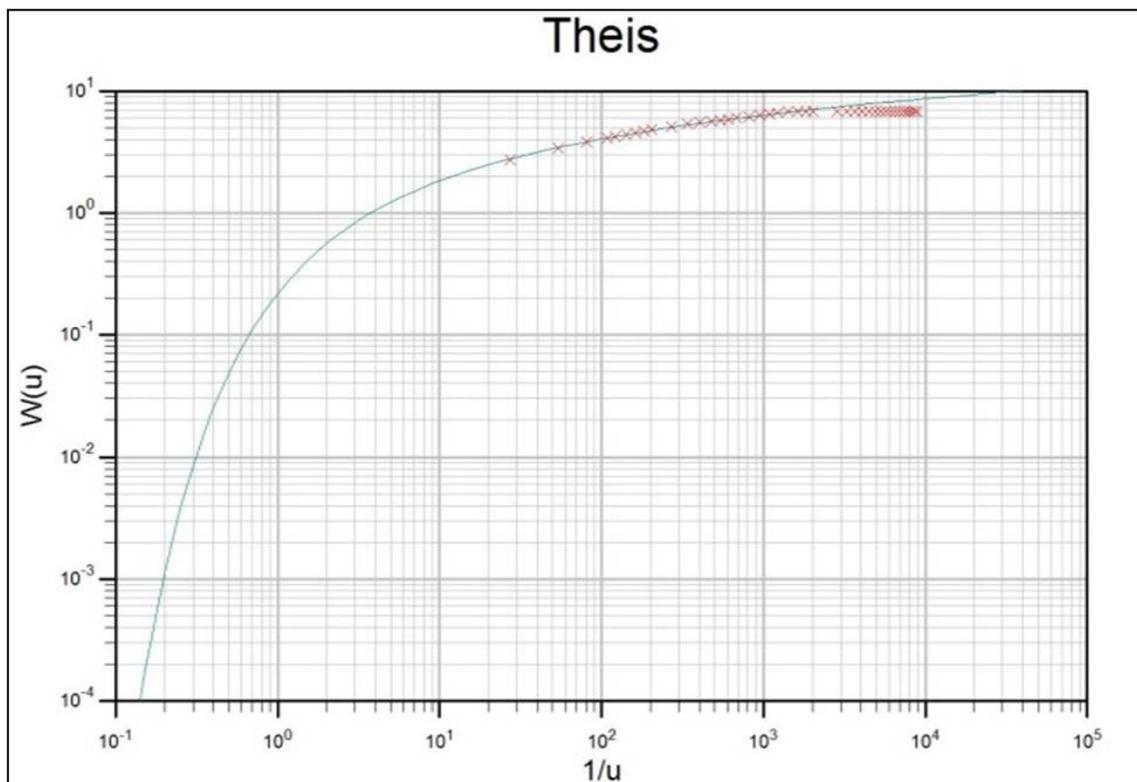
Quadro 8- Variáveis do poço 25 (P25) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

T(m ² /min.)*60*24	K (k=T/B)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m ³ /h)
28,8	1,20	0,283	23,96	12,93
Descrição	K= 1,38x10 ⁻⁵ (m/s) Material: (Silte Arenoso, Areia Fina); N= 10-20%; Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado).			

	$S = 2,8 \times 10^{-2}$
--	--------------------------

Gráfico 2- Curva base do poço 10 (P10) da porção do inferior da bacia do rio Bacanga

Coordenadas Geográficas:	2°33'51.59"S / 44°19'50.68"O
---------------------------------	------------------------------



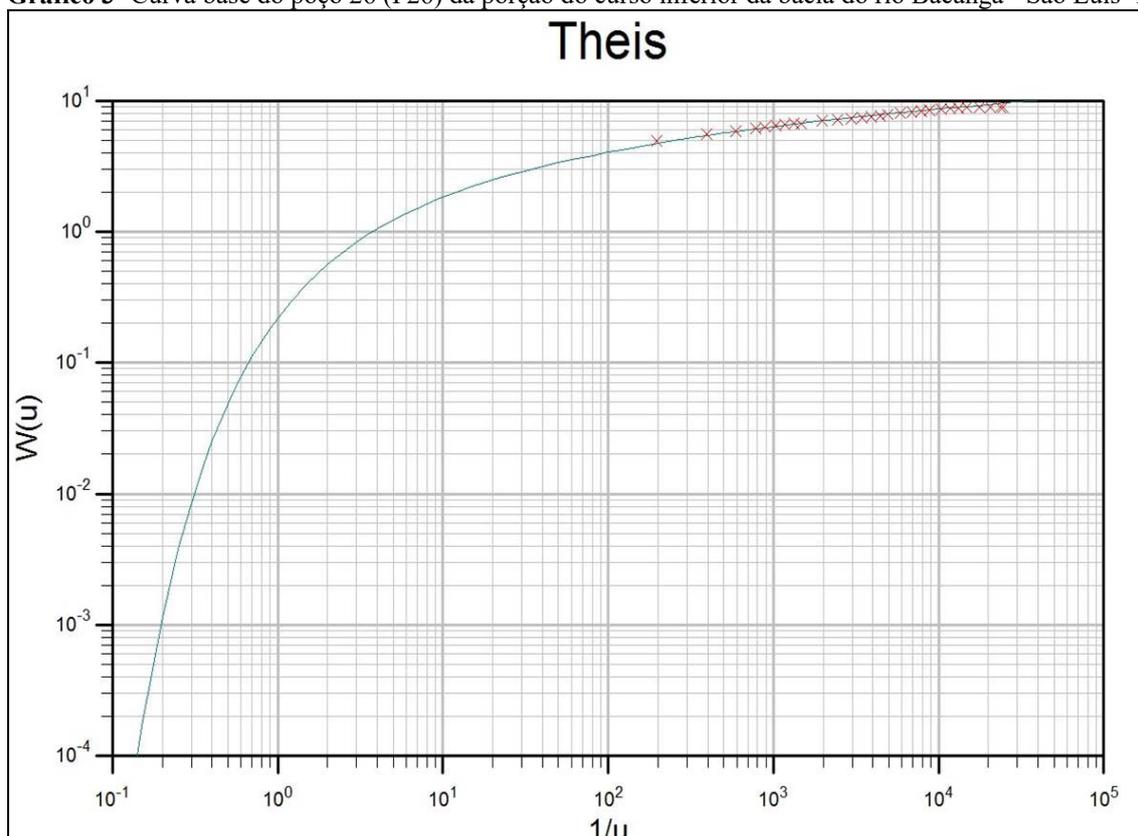
Fonte: Martins, 2018

Quadro 9- Variáveis do poço 10 (P10) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

$T(m^2/min.) * 60 * 24$	K ($k=T/B$)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m³/h)	
30,24			0,657	0,316	46,00 7,20
Descrição			K= 7×10^{-6} m/s Material: (Silte Arenoso, Areia Fina); N= 10-20% Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado). S= $3,1 \times 10^{-1}$		
Coordenadas Geográficas:			2°32'14.81"S / 44°17'59.85"O		

Fonte: Martins, 2018

Gráfico 3- Curva base do poço 26 (P26) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA



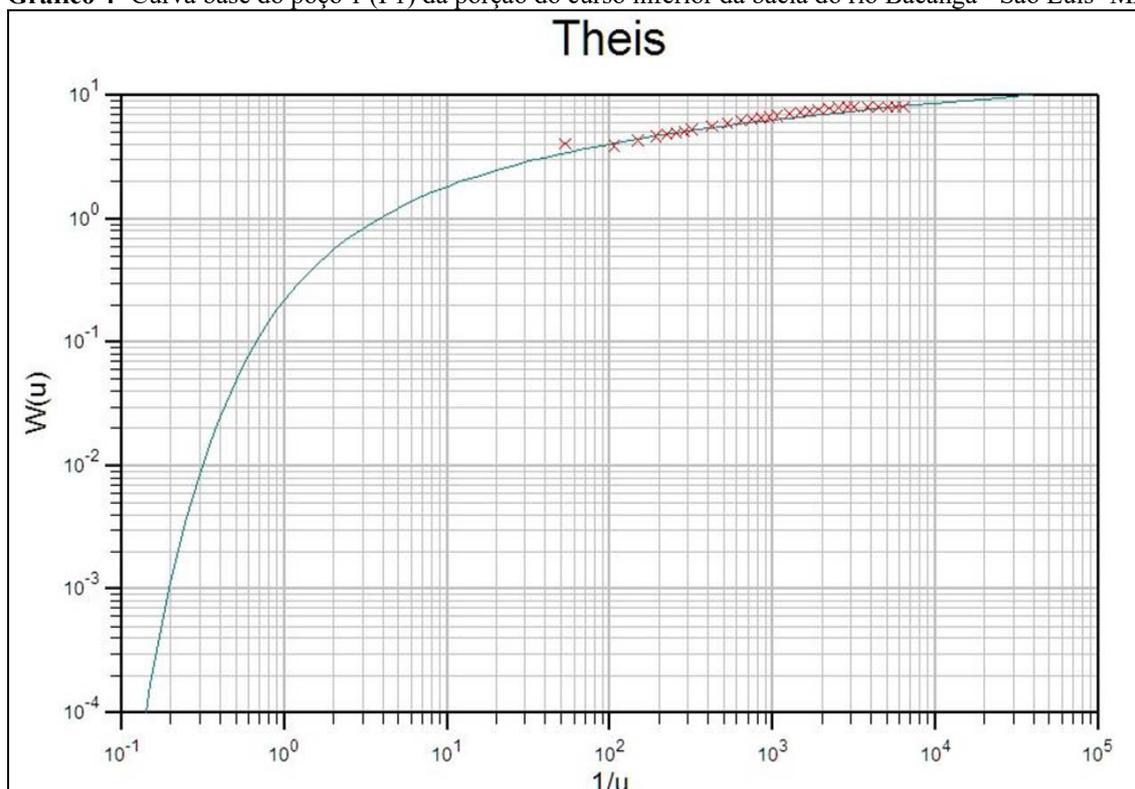
Fonte: Martins, 2018

Quadro 10- Variáveis do poço 26 (P26) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

T(m²/min.)*60*24	K (k=T/B)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m³/h)
4,20	0,09	0,0064	45,15	48,63
Descrição	K= 7x10 ⁻⁶ m/s Material: (Silte, Areia siltica, argila arenosa); N= 35-50% Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado). S= 6,4x10 ⁻³			
Coordenadas Geográficas:	2°35'20.43"S / 44°19'32.99"O			

Fonte: Martins, 2018

Gráfico 4- Curva base do poço 1 (P1) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA



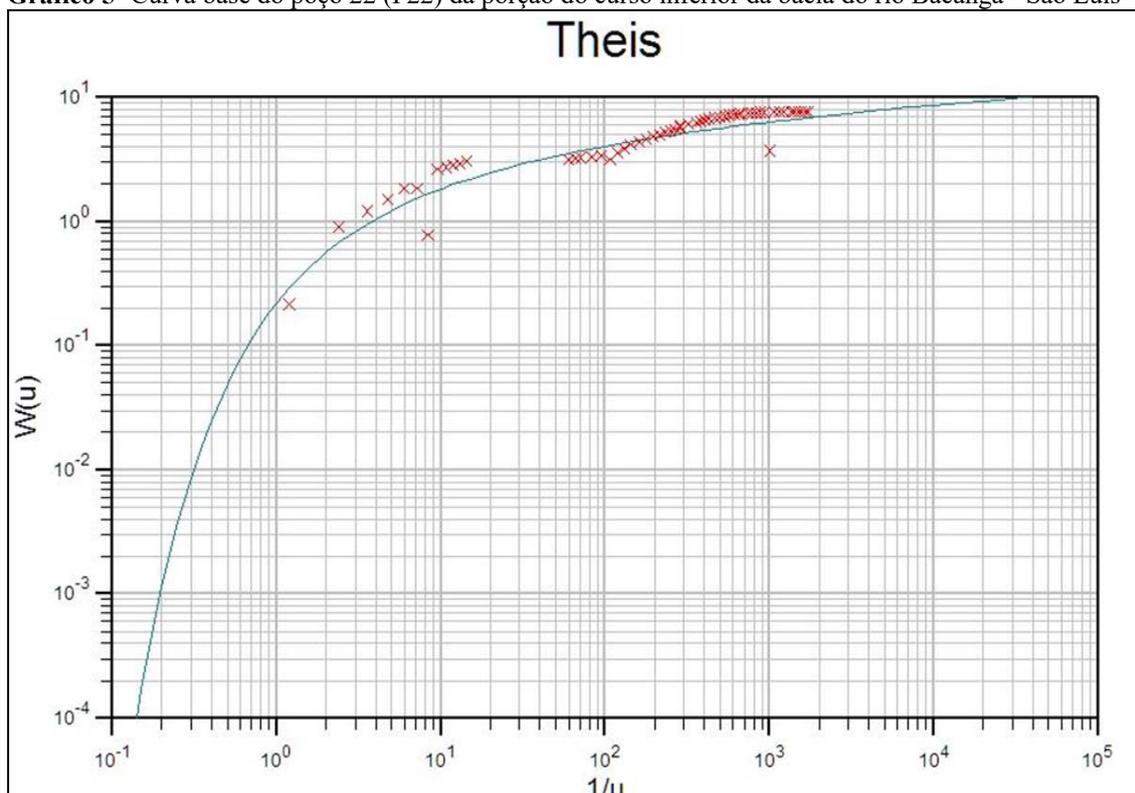
Fonte: Martins, 2018

Quadro 11- Variáveis do poço 1 (P1) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

T(m²/min.)*60*24	K (k=T/B)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m³/h)
1,44	0,044	0,019	32,70	5
Descrição	K= 5x10 ⁻⁷ m/s Material: (Silte Arenoso, Areia fina); N= 10-20% Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado). S= 1,9x10 ⁻²			
Coordenadas Geográficas:	2°34'43.98"S/ 44°14'33.85"O			

Fonte: Martins, 2018

Gráfico 5- Curva base do poço 22 (P22) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA



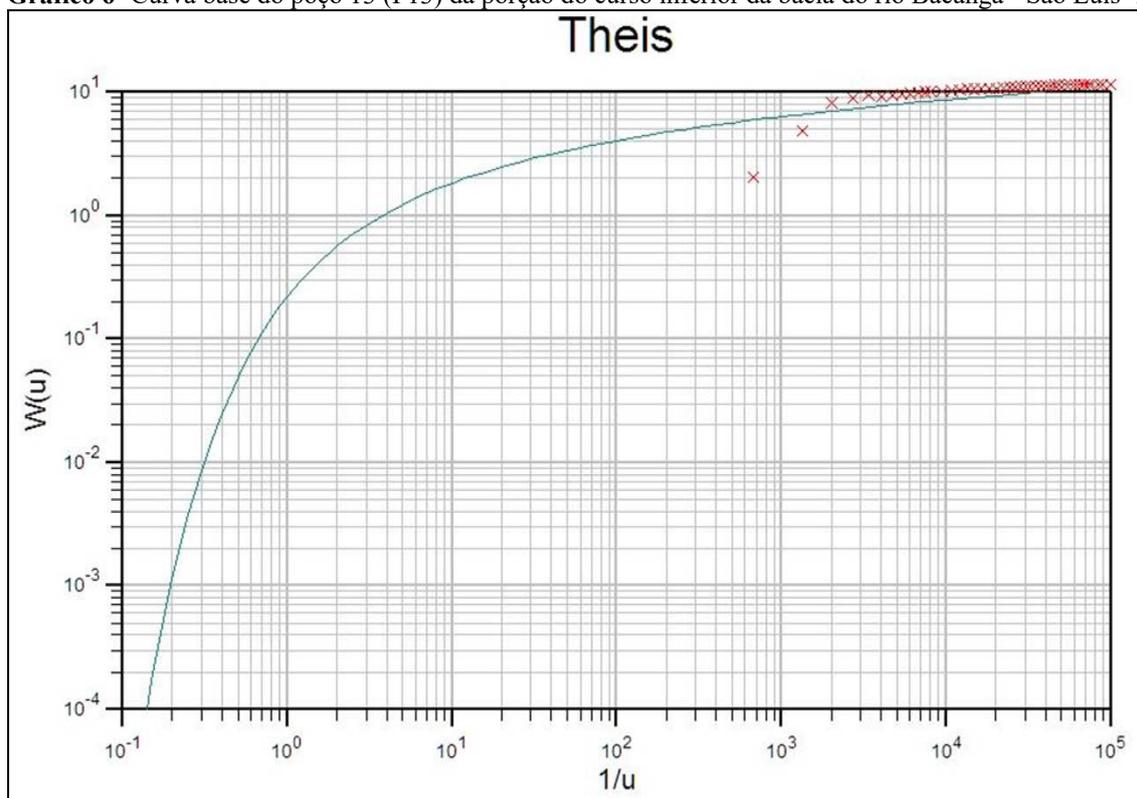
Fonte: Martins, 2018

Quadro 12- Variáveis do poço 22 (P22) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

$T(m^2/min.) * 60 * 24$	K ($k=T/B$)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m^3/h)
0,388	0,011	0,010	33,88	5,1
Descrição	K= $1,27 \times 10^{-7}$ m/s Material: (Silte Arenoso, Areia fina); N= 10-20% Produtividade: Geralmente baixa, porém localmente moderada (Fornecimentos de água para suprir abastecimentos locais ou consumo privado). S= 1×10^{-2}			
Coordenadas Geográficas:	02°33'57.4" S/44°19'51.1" O			

Fonte: Martins, 2018

Gráfico 6- Curva base do poço 13 (P13) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA



Fonte: Martins, 2018

Quadro 13- Variáveis do poço 13 (P13) da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA

T(m²/min.)*60*24	K (k=T/B)(m/dia)	S	B (m)	Vazão (m³/h)
21,6	0,331	0,005	65,20	11,82
Descrição	K= 3,86x10 ⁻⁶ m/s Material: (Silte, Areia siltica, argila arenosa); N= 35-50% Produtividade: Moderada (Fornecimento de água para abastecimentos locais em pequenas comunidades, irrigação em áreas restritas). S= 5x10 ⁻³			
Coordenadas Geográficas:	02°33'57.4" S/44°19'51.1" O			

Fonte: Martins, 2018

Observa-se, com base nos resultados obtidos pela Curva de *Theis* e comparados com as tabela de produtividade proposta por *Struckmeir e Margat* (1995) e *Diniz et al.* (2012), demonstrou que o aquífero Itapecuru na região do curso inferior do rio Bacanga possui uma produtividade baixa a moderada, além de uma composição de materiais que variam de silte a areia fina, além da presença de argilas na composição. Alega-se também que segundo os resultados obtidos pelo *AquiferWin32* e pelos perfis litológicos dos poços tubulares da região

classifica-se os aquíferos estudados como confinados drenantes ou simplesmente como um aquífero semiconfinado.

5.4. AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO MÉTODO GALDIT

Neste capítulo, foram caracterizados os parâmetros do Método GALDIT, conforme Chachadi e Lobo Ferreira (2001), considerando os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares, obtidos para área propõe, portanto, a argumentação sistêmica e adoção dos devidos valores com suas respectivas classes.

5.4.1. Parâmetro “G” - Ocorrência do Aquífero

Desta forma, após os resultados dos testes de bombeamento aplicados ao modelo proposto por *Theis* (1963), o software *AquiferWin32* constatou-se que o aquífero Itapecuru é semiconfinado ou confinado não-drenante, conforme também proposto por Rodrigues *et al.* (1994).

Desta forma, tomando por base os critérios utilizados pelo método GALDIT, segundo Lobo Ferreira e Chachadi (2001), o valor para parâmetro G (Ocorrência do aquífero) será 5, assim como o coeficiente de ponderação adotado é de valor 1, possuindo assim representação espacial, conforme (Figura 27).

5.4.2. Parâmetro “A” - Condutividade Hidráulica

Para caracterização deste parâmetro, utilizou-se o teste de bombeamento de 06 poços tubulares. Conforme a curva de *Theis* (1963) obtida através do *Aquifer test* foi obtido uma condutividade hidráulica que variou de $1,27 \times 10^{-7}$ m/s a $3,86 \times 10^{-6}$ m/s nas rochas do Grupo Itapecuru indicando baixa a moderada permeabilidade. Desta forma, por apresentar Condutividade Hidráulica < 5 , será atribuída o valor 2,5 e fator de ponderação 3. Possuindo assim, seguinte representação espacial, conforme Figura 30.

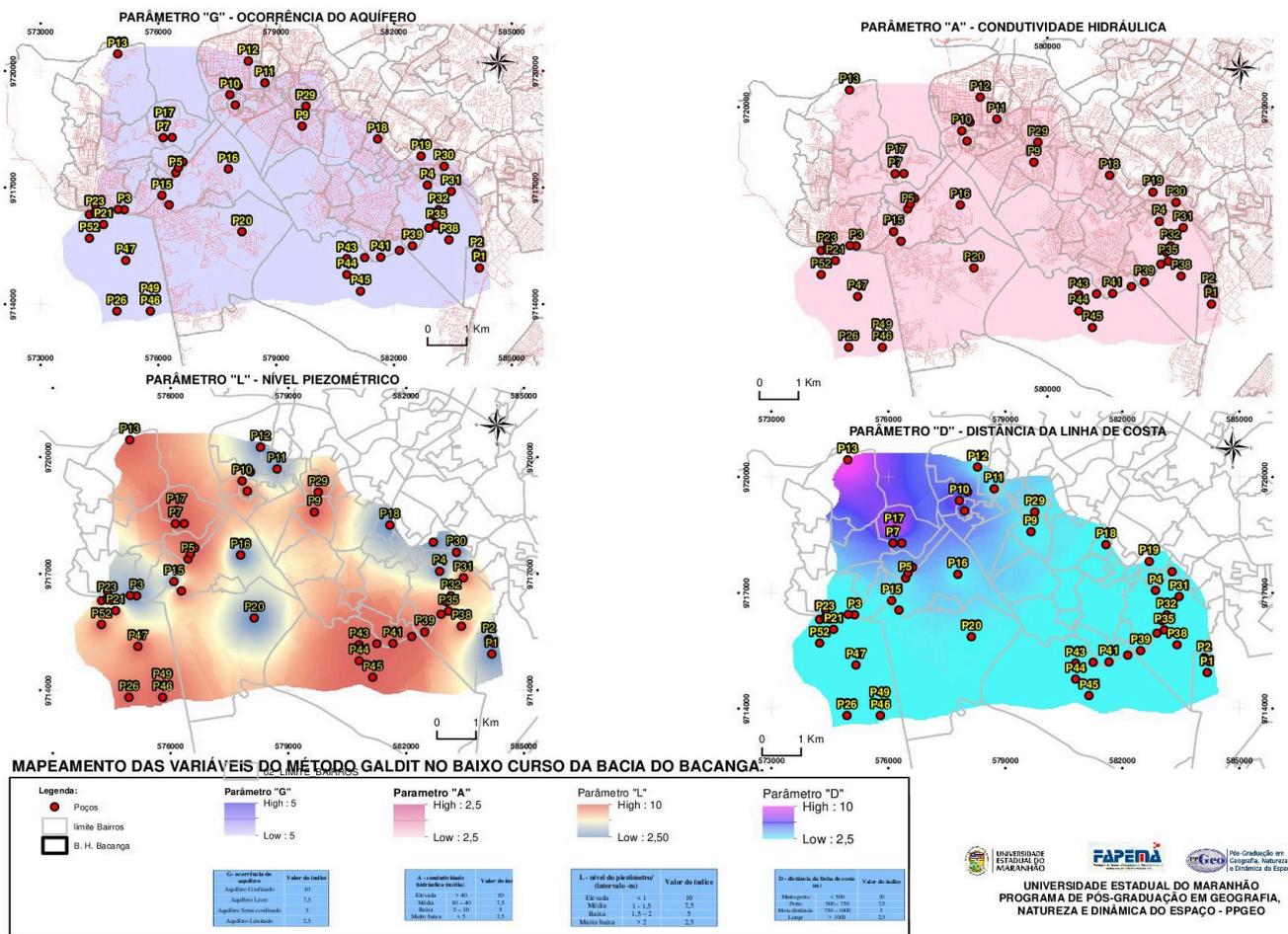
5.4.3. Parâmetro “L” - Nível do Piezômetro

O nível piezométrico se refere ao nível de água subterrânea medida em relação ao nível do mar. É um parâmetro importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha salina. Na área a variação do Nível Estático ocorre de +44,2 m a -38,5 m indicando o valor do parâmetro L o índice de 2,5 a 7,5, conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).

5.4.4. Parâmetro “D” - Distância da Linha de Costa (metros)

A distância da linha de costa se refere à distância em metros, em linha reta, do poço tubular em relação ao nível do mar. É um parâmetro que permite determinar e avaliar a maior ou menor influência da maré em relação aos poços tubulares estudados. Na área a variação da linha de costa ocorre de 119 m (P-13) a 7.708,9 m indicando o valor do parâmetro D o índice de 2,5 a 7,5 e 10 conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).

Figura 27 - Espacialização dos Parametros GALDIT



Fonte: Martins, 2018

5.4.5. Parâmetro “I”- Impacto do Estado Atual da Intrusão Marinha

Para a avaliação deste parâmetro, foi realizada a coleta de água de 06 (seis) poços tubulares, além de dados de poços preexistentes em no banco de dados da pesquisa, os quais foram previamente escolhidos de acordo com sua posição geográfica, visando desta forma, avaliar os quantitativos de cloretos e bicarbonatos presentes em cada amostra, e obter uma espacialização de melhor confiabilidade e menor tendência espacial das informações geradas.

Conforme as figuras 28 a 33, dos 06 (seis) poços tubulares analisados, apenas dois apresentaram-se dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011.

Figura 28–Laudo de análise de poço tubular (João do Poço)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	12,20 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	0,00 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE FORA DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

Fonte: Martins, 2018

Figura 29–Laudo de análise de poço tubular (Supermercado Mateus - Cohama)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	2,44 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	1,64 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE DENTRO DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

Fonte: Martins, 2018

Figura 30–Laudo de análise de poço tubular (P-02)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	29,28 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	0,49 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE DENTRO DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

Fonte: Martins, 2018

Figura 31–Laudo de análise de poço tubular (P-15)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	0,00 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	0,00 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE FORA DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

Fonte: Martins, 2018

Figura 32–Laudo de análise de poço tubular (P-16)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	87,84 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	0,00 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE FORA DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

Fonte: Martins, 2018

Figura 33–Laudo de análise de poço tubular (P-18)

RESULTADOS			
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS			
Análises	Valores	Padrões	Método
Alcalinidade em (HCO ₃ ⁻)	226,92 mg/L	Nc	Titulométrico
PARÂMETROS DE DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO			
Análises	Valores	Padrões	Método
Cloro Residual	0,00 mg/L	0,2 - 2,0 mg/L	Titulométrico
Observação: Amostra coletada pelo solicitante. Nc = Parâmetro não mencionado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde .			
Conclusão: DE ACORDO COM A PORTARIA MS Nº 2914 DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011, DO MINISTÉRIO DA SAÚDE, A ÁGUA ENCONTRA-SE FORA DOS PADRÕES ESTABELECIDOS PARA AS ANÁLISES REALIZADAS.			

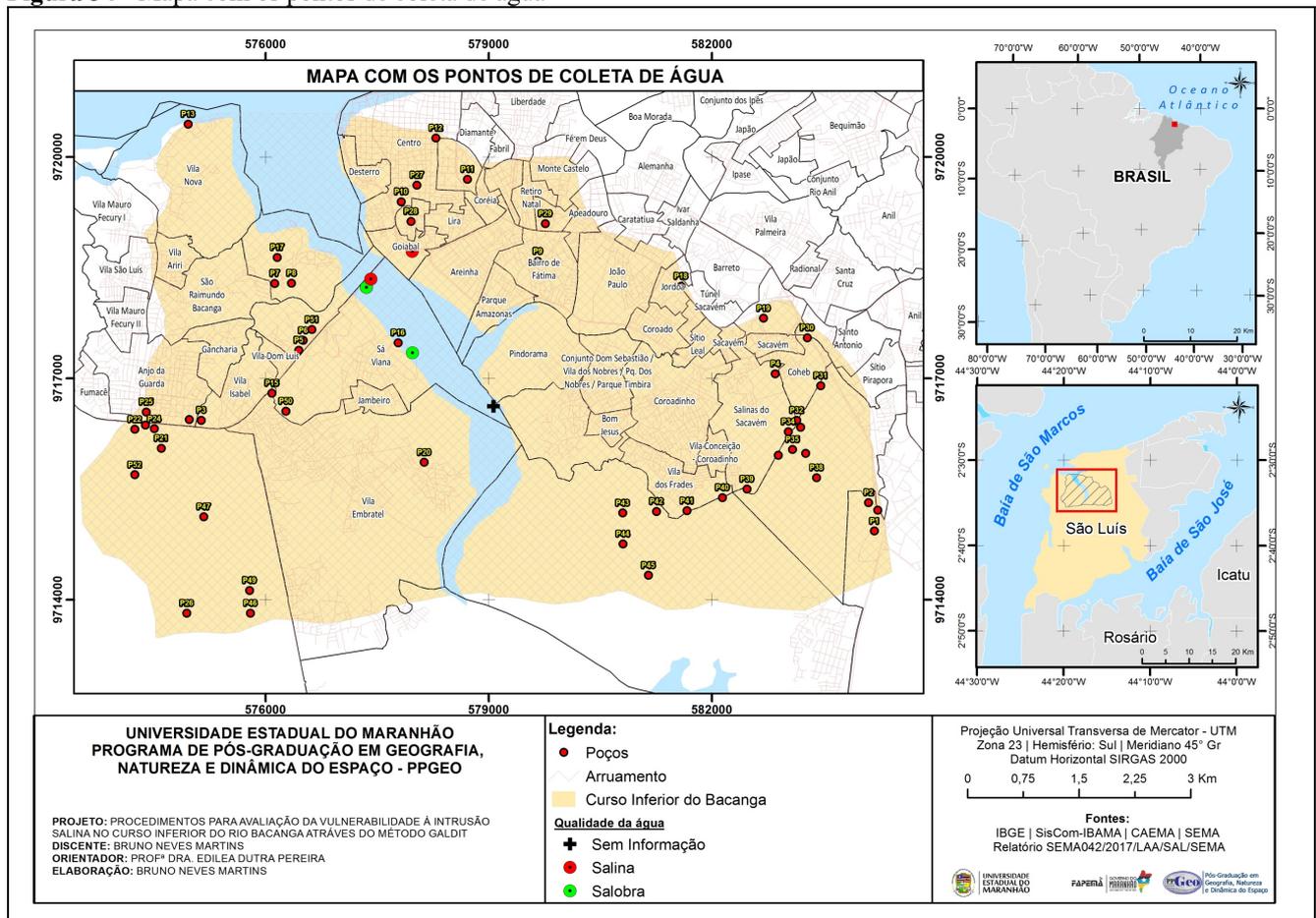
Fonte: Martins, 2018.

Destaca-se que o Poço P-13, localizado pelas imediações do bairro Vila Nova, apresentou o maior valor para o parâmetro Cloretos, que segundo o resultando da amostra apresentou 230 mg/L para esta modalidade.

Visando uma maior compreensão sobre a dinâmica da intrusão salina na área de estudo, e observar a influência da Barragem do Bacanga na dinâmica subterrânea, foi disponibilizado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente, um Laudo Analítico nº

042/2017/LLA/SAL/SEMA, o qual a Procuradoria Geral do Estado - Procuradoria do Patrimônio Imobiliário e Meio Ambiente - SEMA, solicitou informações sobre a mortandade de peixes no local, contudo, para nossa pesquisa utilizamos o parâmetro Salinidade, em 21 pontos coletados pela SEMA. Assim sendo, os dados demonstram que 9 pontos localizados a jusante da Barragem (Figura 34) as quais apontam uma água com características salgada e 12 pontos apresentando características salobras. Os resultados das amostras informa ainda, um valor variante de 22 ppt a montante da barragem e de 32,39 ppt a jusante da barragem.

Figura 34 - Mapa com os pontos de coleta de água



Fonte: Martins, 2018

5.4.6. Parâmetro - “T” - Espessura do Aquífero

As características litológicas e espessura dos aquíferos Barreiras e Itapecuru foram analisadas a partir dos dados de perfis litológicos A-B, de 12 (doze) poços tubulares (Figura 35).

O aquífero Barreiras do período Neógeno na bacia do rio Bacanga é representado por clásticos creme, amarelado e arroxeados reunindo arenitos finos a conglomeráticos, regularmente selecionado, friável, angulosos, com nível de lateritas ocasionalmente. Constitui um sistema de aquífero livre, descontínuo, heterogêneo e com boa poro-permeabilidade. Ocorrem nos topos dos tabuleiros e colinas com altitudes aproximadas de 60 a 40 metros na área enfocada.

A maior espessura do aquífero Barreiras na bacia atinge aproximadamente 55 metros na área do tabuleiro do Tirirical, diminuindo em direção ao Cajueiro (Figura 36). O contato com o Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa.

O aquífero Itapecuru apresenta-se na área argila siltosa de coloração cinza e silito arenoso marrom com argilas esverdeadas.

Na área de estudo, o P-23, localizado no bairro Cajueiro, apresentou o aquífero Itapecuru como formação aflorante, diferentemente nos outros casos, que apresentaram variações de espessura para o aquífero Barreiras de 15 m para o poço P-04, localizado no bairro Salina do Sacavém e uma espessura de 55 m para os poços P-13, localizado no bairro Vila Nova além dos poços 42 e 46, localizados no Parque Estadual do Bacanga. A espessura média do aquífero Barreiras foi de 38 m. Desta forma, adota-se o valor 10 conforme (CHACHADI E LOBO FERREIRA, 2001).

Nas Figuras 36 a 37 é possível visualizar a variação da espessura dos aquíferos da Formação Barreiras e Itapecuru na área de estudo.

Figura 35– Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares da porção do curso inferior da bacia do Rio Bacanga- São Luis-MA

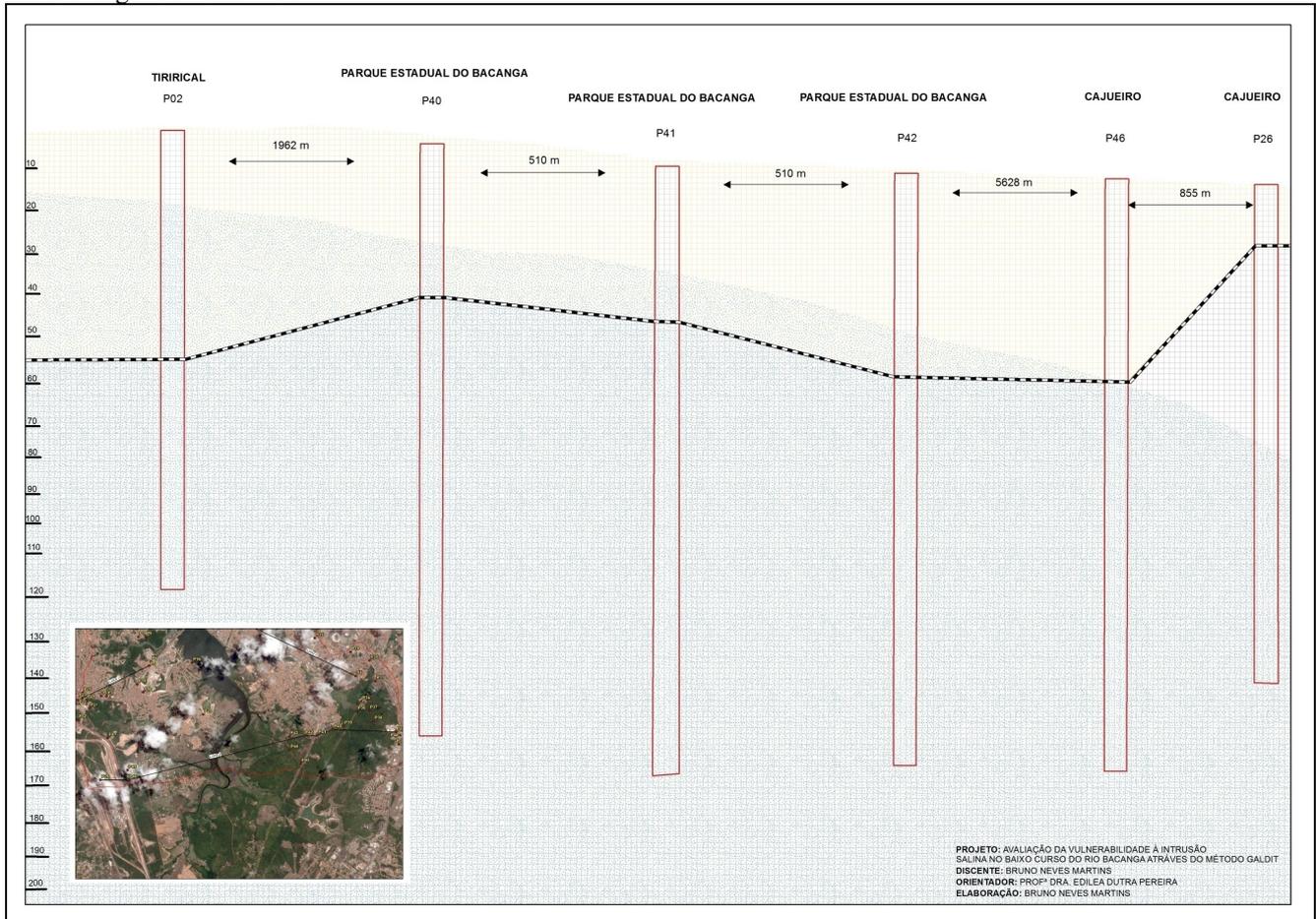


Figura 36 -Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA.

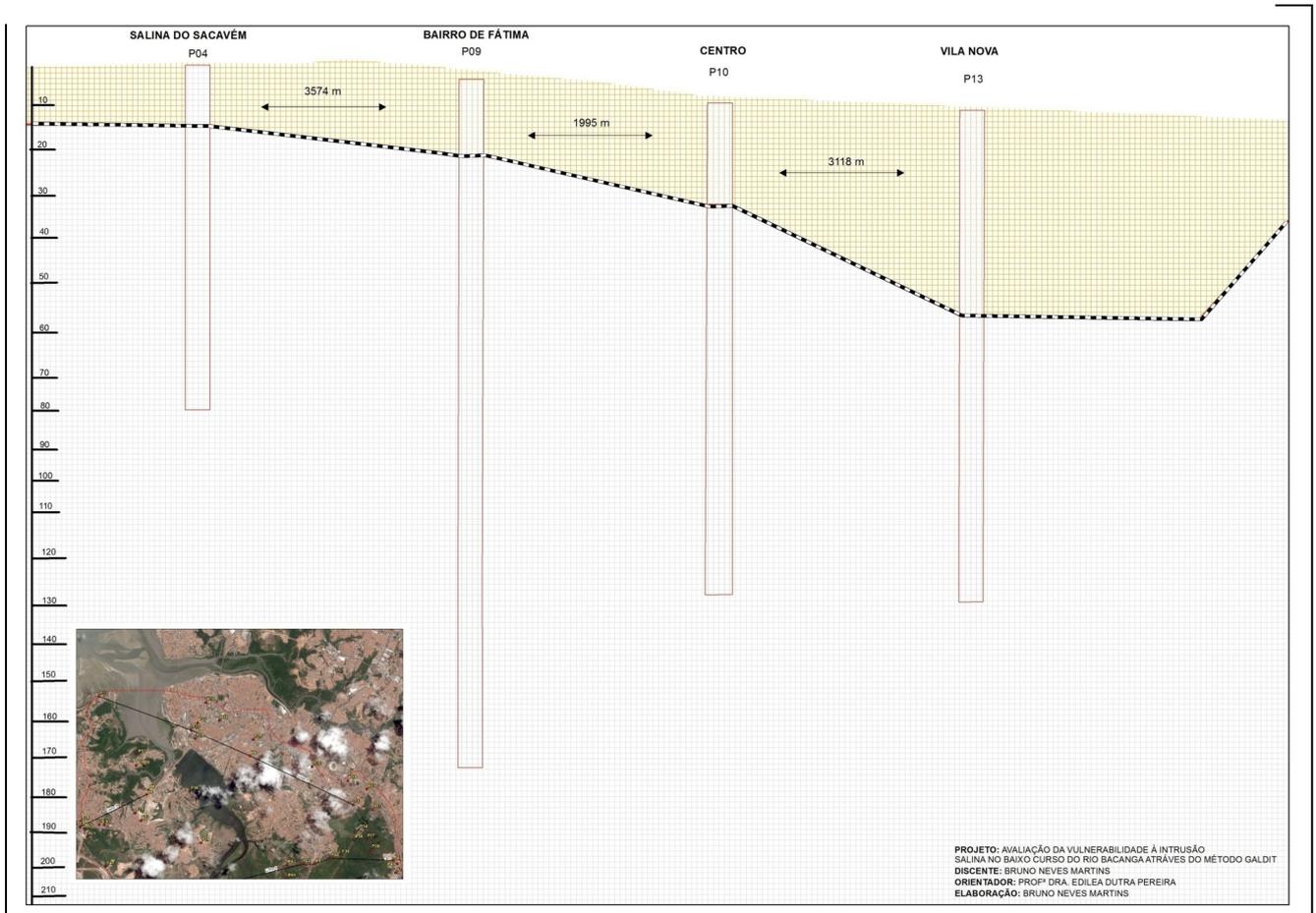
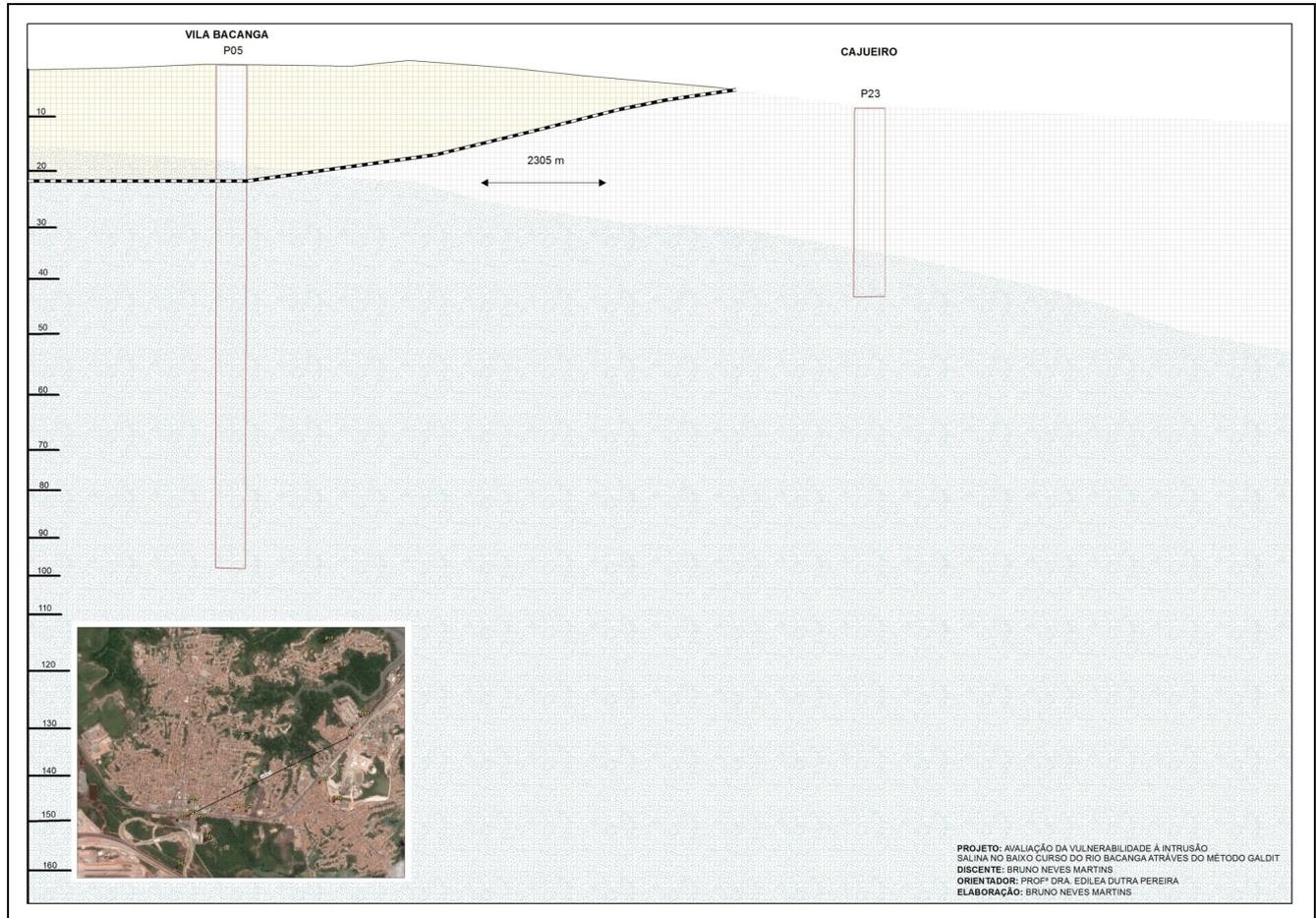


Figura 37 - Parâmetro “T” Espessura do Aquífero dos poços tubulares da porção do curso inferior da bacia do rio Bacanga - São Luís- MA.



Fonte: Martins, 2018

5.4.7. Espacialização do método GALDIT

O índice GALDIT classifica-se em três faixas, sendo Alta Vulnerabilidade os valores $\geq 7,5$; Moderada Vulnerabilidade valores entre 5,0 a 7,5 e Baixa Vulnerabilidade Valores <5 .

Assim, após realizar o cálculo exigido pelo método para espacialização do índice GALDIT através do modelo de interpolação IDW (Ponderação do Inverso da Distância), observou-se que o curso inferior da bacia do rio Bacanga se enquadra em sua maior extensão entre as vulnerabilidades moderadas a baixas.

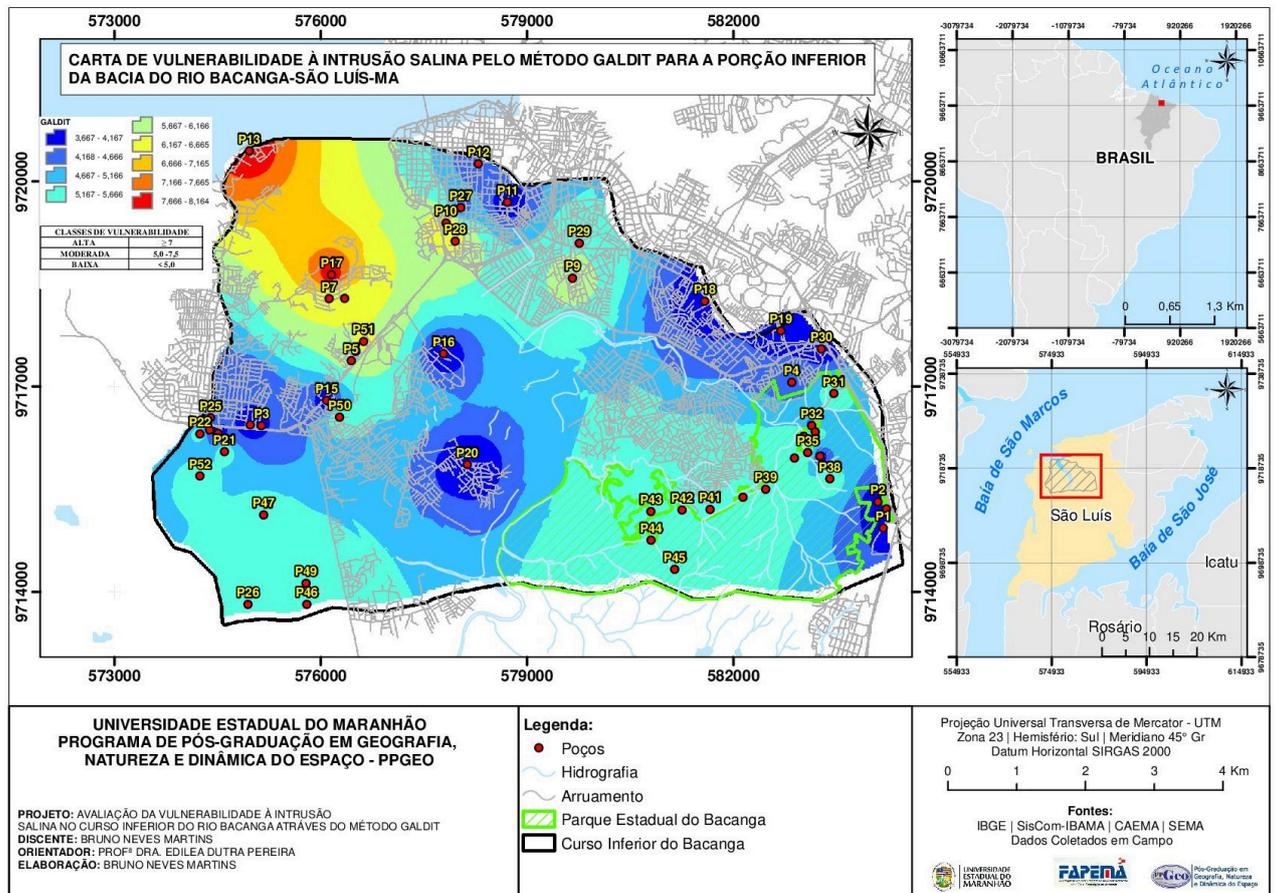
No extremo norte da bacia na área próxima da foz do rio, mais precisamente nos poços tubulares pós-barragem do rio Bacanga (P-13 e P-17),(Figura -38) indicaram uma vulnerabilidade alta (7,66 - 8,66). Destaque para um melhor monitoramento dos poços tubulares P-10, P-28 e P-51 que apresentaram uma vulnerabilidade moderada (6,16 - 6,66), uma vez que os mesmos são utilizados para fins de consumo humano e Industrial. Esta vulnerabilidade a intrusão salina possivelmente esta relacionada à dinâmica da maré na área estuarina e a distância relativamente próxima à linha de costa.

Destacam-se também, os poços tubulares da margem esquerda da bacia P-26, P-46, P-47, P-49, P-50, P-52 e P-5 e os poços tubulares da margem direita da bacia P-29, P-9, P-39, P-41, P-42, P-43, P-44 e P-45, que apresentaram uma vulnerabilidade moderada à intrusão salina (5,5 a 5,9). Ressalta-se que os poços tubulares da margem direita, exceto os P-29 e P-9, compõem a bateria dos poços tubulares do Sistema Produtor de Água do Sacavém para abastecimento público, pertencente à concessionária de água Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA. A vulnerabilidade moderada indicou um perigo eminente à intrusão salina, principalmente considerando o regime de bombeamento intensivo na área.

Elencam-se também os poços P-01, P-02, P-03, P-04, P-30, P-15, P-16, P-11, P-12, P-18, P-20 e P-25 que apresentaram uma vulnerabilidade a intrusão salina baixa (3,6 - 4,66), logo estando em uma situação confortável frente à eminência da salinização. Destaca-se a presença de uma “faixa de proteção” de vulnerabilidade baixa próximo ao Parque Estadual do Bacanga onde se encontram a principal reserva hídrica genuinamente ludovicense.

Sobrinho *et al.*, (2014) em seu trabalho intitulado de “Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do Aquífero Boa Viagem - região metropolitana de Recife, afirma que “o GALDIT leva em conta não só o risco de um poluente vindo da parte superior (como outros métodos tradicionais), mas considera a contribuição lateral vindo do mar ou de corpos d’água superficiais salinizados”.

Figura 38 -Carta de Vulnerabilidade à Intrusão Salina pelo do método GALDIT do curso inferior da bacia do Rio Bacanga - São Luís- MA



Fonte: Martins, 2018

Assim sendo, torna-se uma ferramenta primordial para o planejamento urbano, assim como ferramenta para o planejamento de políticas ambientais estratégicas, visando assim uma tomada de decisão mais técnica e sensata, observando sempre as vulnerabilidades e as potencialidades do ambiente frente às solicitações por licenças ambientais e outorgas de poços ubulares na bacia.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método GALDIT, apresentou-se como uma ferramenta completa e fundamental para a avaliação da vulnerabilidade à intrusão salina em aquíferos costeiros, isso foi possível, graças as suas variantes que permitem uma análise minuciosa do aquífero estudado, como por exemplo, os coeficientes K; S; T que demonstram um diagnóstico da área de estudo, assim como dados de análises físicos- químicas dos poços.

O atrelamento da hidrogeologia e o geoprocessamento forma o casamento perfeito entre a geologia e a geografia, possibilitando assim uma análise espacial, o que permite uma visão holística do fenômeno.

Assim como em outros métodos que visam avaliar a vulnerabilidade do aquífero, o modelo de interpolação espacial a ser utilizado ainda é uma questão a ser debatida, uma vez que o modelo geomatemático a ser utilizado influencia significativamente no resultado do método.

A vulnerabilidade a intrusão salina alta registrada na área próxima a foz da bacia do rio Bacanga indica infiltração lateral da cunha salina. Destaca-se uma barreira de vulnerabilidade baixa que “protege” a bateria de poços tubulares do Sistema Produtor de Água do Sacavém utilizada no abastecimento público, pertencente à concessionária de água Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão-CAEMA, que utiliza água subterrânea a partir de 15 poços tubulares utilizando bombeamento intensivo na área. Destaca-se que a indicação de vulnerabilidade à intrusão moderada na área do Parque Estadual do Bacanga inspira cuidados eminentes ao risco de salinização dos poços tubulares, considerando o excesso bombeamento de água subterrânea para abastecimento público e as impermeabilizações nas áreas de recarga de aquíferos o que nos remete a uma maior atenção e monitoramento nessas regiões.

O estudo possibilitou a análise de um fenômeno silencioso, mas presente diuturnamente, por se tratar de um ambiente sensível e com uma exploração de água constante. Recomenda-se a implantação de políticas públicas voltadas para preservação das áreas de recarga de aquífero e a contenção do avanço da cunha salina na área da bacia do rio Bacanga, tais como:

- Preservação de áreas de recarga presentes no Parque Estadual do Bacanga;
- Controle maior nas autorizações e exploração de água subterrânea;
- Monitoramento quanto à intrusão salina constante da barragem do Bacanga e ao longo do rio Bacanga em períodos sazonais;

- Monitoramento da qualidade da água subterrânea em períodos sazonais na bacia.
- Políticas de planejamento urbano para preservação e conservação dos rios.

REFERÊNCIAS

- ALBINET, M.; MARGAT, J. **Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eausouterraine**. Bulletin BRGM, 1970.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H. & PETTY, R. J. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. United States Environmental Protection Agency. EPA/600/2-85/018. p. 29, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. **Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia: hidrologia**. 1ª edição, São Paulo: ABGE, 1981, 34 p.
- BEZERRA, J. F. R. **Geomorfologia e Reabilitação de Áreas Degradadas por Erosão com Técnicas de Bioengenharia de Solos na Bacia do rio Bacanga, São Luís – MA**. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia – Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- BRASIL. **Resolução CONAMA nº 396 de 03 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 07 abr. 2008.
- _____. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 jul. 2000.
- _____. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 jan. 1997.
- _____. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. CLBR de 1934 e retificado em 27 jul. 1934, Rio de Janeiro.
- BROWN, Geoff. **The Open University: Os Recursos Físicos da Terra**. Bloco 4, Parte 1 Recursos Hídricos; Editora Unicamp, Campinas, 2000.
- CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P.; MARTINS, S. V. **Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan**. Nova Friburgo: Revista Árvore, v. 30, 2006.
- CHACHADI, A.G. **Seawater Intrusion Mapping Using Modified GALDIT Indicator Model-Case Study in Goa**. Jalvigyan Sameeksha, 20, 2005.
- _____; LOBO-FERREIRA, J.P. **Sea Water Intrusion Vulnerability Mapping of Aquifers Using GALDIT Method**. Proceedings of the Workshop on Modelling in Hydrogeology, Anna University, Chennai, 143-156, 2001.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia** – 2ª ed. – São Paulo: Editora Blucher, 1980.
- CORRÊA, R. L.. **Região e Organização Espacial**. São Paulo: Ática, 2000.
- COSTA, H. de O. S. **Análise Hidrológica Aplicada à Gestão Águas – região oeste da ilha de São Luis-Ma**. Especialização em meio ambiente e recursos hídricos. Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2003.

COSTA, K. S. P.; SERRA, I. M. dos S. **Vulnerabilidade Natural de Aquíferos: Um estudo de caso no Parque Estadual do Bacanga, São Luís- MA.** Iniciação Científica BIC/UEMA, 2011.

CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. **Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de São Luís.** Relatório Parcial 05 (RP05), 2017.

_____. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS.** Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php>. Acesso em: 10 dez 2017.

_____. **Mapa de Declividade em Percentual do Relevo Brasileiro.** Nota Técnica. Centro de Desenvolvimento Tecnológico – CEDES, 2010.

DEMO, P. **Pesquisa e construção do conhecimento: metodologia científica no caminho de Habermas.** Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1994.

DINIZ, J. A. O.; PAULA, T. L. F. de; MONTEIRO, A. B.; FEITOSA, A. C.; CARDOSO, A. de C.. Taxonomia Hidrogeológica – Unidades Básicas de Referência. **Anais.** XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas – ABAS, 2012.

DINIZ, J. S. **Expansão e organização do espaço urbano em São Luís (1980/90): uma abordagem sistêmica.** Monografia de Especialização/UFMA. São Luís, 1993. 63 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 2006.

FEITOSA, F. A. C.; MANUEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações.** Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997.

_____; COSTA FILHO, W. D. Programa Ações Emergenciais de Combate aos Efeitos das Secas: **Execução de Testes de Bombeamento em Poços Tubulares - Manual Prático de Orientação:** CPRM, 1998.

FERREIRA, P. **Comentários à constituição brasileira.** São Paulo: Saraiva, 1990.

FERREIRA, R. M. S. A. **Aproveitamento da Energia das Marés: Estuário do Bacanga, MA.** Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

FETTER, Charles Willard. **Applied Hidrogeology.** 2. ed. Toronto: Merrill, 1988.

FOSTER, S. S. D. e HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81pp, 1988.

_____; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Groundwater Management Advisory GW.MATE WB, 2006.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Águas subterrâneas do Estado de São Paulo.** São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA, 2008.

KASENOW, M. **Determination of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analysis.** Colorado: Water Resources Publication, 2002.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. **Caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro.** Departamento de Hidráulica e Ambiente / Núcleo de Águas Subterrâneas. Relatório

288/2011 – NAS. Lisboa, 2011.

Decreto Estadual N° 34847 DE 14 de maio de 2019 (MARANHÃO, 2019),

_____. Lei n° 8.149 de 15 de junho de 2004. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado**, São Luís, 23 jun. 2004.

MESTRINHO, S. S. P. **Classificação, enquadramento e monitoramento das águas subterrâneas**. Programa de Capacitação. ANA/Unesco, Projeto704BRA2041, Edital n° 01/2011. Apostila de Curso. Brasília, 2011.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 02 dez 2017.

MUNDO EDUCAÇÃO. **AQUÍFEROS**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/aquifero.html>>. Acesso em: 05 dez 2017.

PennsylvaniaStateUniversity.**Triangulated Irregular Network**.Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/geog486/node/1875>>. Acesso em 09 de setembro de 2017.

PEREIRA, S. Y. **O caminho das águas**. In: Carneiro C.D.R. (ed. cient.). Geologia. São Paulo: Global/ SBPC, Vol. 10, pp. 6, pp. 50-55, 2000.

PEREIRA, E. D. **Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do reservatório Batatã - São Luís (MA)**. 141 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

PRITCHARD, D.W. **What Is an Estuary: Physical Viewpoint**. In: Estuaries. AAAS, Washington DC, 1967.

PROJETO RADAM. **Levantamento de Recursos Naturais: Programa de Integração Nacional**. v.3. Folha SA. 23 (São Luís) e Parte da Folha SA.24 (Fortaleza). Rio de Janeiro: MME, 1973.

REBOUÇAS, A. C., SILVA, A. B. **Estudo hidrogeológico do Distrito Industrial de Itaqui-MA**. Recife: SUDENE, Divisão de Documentação, 1972. 83 p. (Brasil. SUDENE. Hidrogeologia, 39).

RODRIGUES, T. L. N. *et al.* (Org.). São Luís Folha SA.23- Z-A, Cururupu Folha SA.23-X-C: Estado do Maranhão: escala 1:250.000. Brasília, DF: CPRM, 1994a. 185 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos – PLGB.

ROSSETTI, D. F.;TRUCKENBRODT, W. **Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís (MA), Norte do Brasil**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, v. 9, p. 29-41, 1997.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M.; THALLÊS, M. Paleodrainage in Marajó Island (northern Brazil) and its relation to Holocene relative sea-level dynamics. **Holocene**, v. 18, p. 923-934. 2008a.

SANTOS, M. **Espaço e sociedade**. Petrópolis: Vozes, 1978.

SILVA, J. A. **Curso de Direito Constitucional Positivo**. 15 ed. São Paulo: Malheiros, 1998.

SOBRINHO, A. F. C.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do aquífero Boa**

Viagem – Região metropolitana do Recife. Revista Águas Subterrâneas N° 29 (1). ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, p. 116-128, 2015.

KLEIN, E.L.; SOUSA, C.S. (Org.) **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão:** Sistema de Informações Geográficas – SIG, Escala 1:750.000. Belém: CPRM, 2012.

STRAHLER, A. N. **Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography.** Geological Society of America Bulletin, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. **Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend.** Hannover: International Association of Hydrogeologists, (International contributions to hydrogeology, v. 17, 1995.

THEIS, C. V. **Estimating the Transmissivity of a Water- Table Aquifer from the Specific Capacity of a well.** U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1536-I, 1963.

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo. **Apostila de ArcGIS – Geodatabases.** Disponível em: <http://www.geolab.faed.udesc.br/sites_disciplinas/SIG/Apostilas/Apostila-ArcGIS-%28Geodatabase%29.pdf> . Acesso em: 12 jan. 2017.

VEIGA JÚNIOR, J. P. **Carta geológica/Folha SA.23-X/Z SÃO LUÍS NE/SE,** color – colorido), Escala 1:500.000. Recife: CPRM, 2000.

VILLAR, P. C. **Gestão das áreas de recarga do Aquífero Guarani: o caso do município de Ribeirão Preto.** Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental/PROCAM - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: McGraw – Hill do Brasil, 1975.