



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

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA NA FRANJA COSTEIRA DE SÃO LUÍS UTILIZANDO O MÉTODO GALDIT

RENATA MARIA SOUSA CASTRO



São Luís
2019

RENATA MARIA SOUSA CASTRO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA NA
FRANJA COSTEIRA DE SÃO LUÍS UTILIZANDO O 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.

Orientadora: Prof. Dra. Ediléa Dutra Pereira

Coorientador: Drº. Manuel Mendes de Oliveira

São Luís
2019

Castro, Renata Maria Sousa.

Avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha na Franja Costeira de São Luís utilizando o Método Galdit / Renata Maria Sousa Castro. – São Luís, 2019.

107 f. Il.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientadora: Profa. Dra. Ediléa Dutra Pereira.

1. Água subterrânea. 2. Franja Costeira. 3. Vulnerabilidade – Intrusão marinha. I. Título.

CDD 628.114 816 1

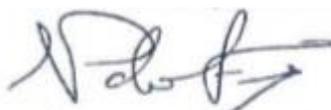
RENATA MARIA SOUSA CASTRO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA NA
FRANJA COSTEIRA DE SÃO LUÍS UTILIZANDO O 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.

Aprovada com distinção em: 28 / 08 / 2019

Comissão Avaliadora:



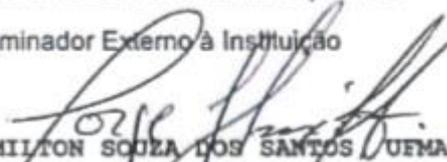
Dr. JOÃO PAULO CÁRCAMO LOBO FERREIRA, LNEC

Examinador Externo à Instituição



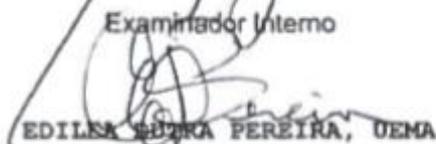
Dr. MANUEL MENDES OLIVEIRA, LNEC

Examinador Externo à Instituição



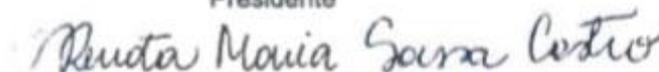
JORGE HAMILTON SOUZA DOS SANTOS, UEMA

Examinador Interno



EDILENE SOUZA PEREIRA, UEMA

Presidente



RENATA MARIA SOUSA CASTRO

Mestrando

São Luís
2019

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
DSG - Diretoria de Serviço Geográfico
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABOHIDRO – Laboratório de Hidrobiologia
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal
NA – Nível de Água
ND – Nível Dinâmico
NE – Nível Estático
SEMA – Secretaria de Estado de meio Ambiente
SAAE – Serviço Autônomo de Abastecimento de Água e Esgoto
SIG - Sistema de Informação Geográfica
TIN - Triangulated Irregular Network
UFMA – Universidade Federal do Maranhão
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão
UTM - Universal Transversa de Mercator
ZEE MA - Zoneamento Ecológico-Econômico do Maranhão

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Carta de localização da área de estudo - Franja Costeira de São Luís - MA..... | 24 |
| Figura 2: Distribuição mensal das temperaturas médias, média das máximas e média das mínimas A – período de 1931 a 1960; B – período de 1971-1990; C – período de 1990 a 1999; e D - 2002 a 2009. | 30 |
| Figura 3: Perfil das praias da área de estudo - Franja costeira de São Luís – MA..... | 35 |
| Figura 4: Carta Hipsométrica da Franja Costeira de São Luís – MA..... | 37 |
| Figura 5: Carta da Rede Hidrográfica – Franja Costeira de São Luís, MA. | 43 |
| Figura 6: Carta geológica da Ilha do Maranhão. | 45 |
| Figura 7: Carga hidráulica em um ponto do aquífero expressa pelo nível piezométrico | 52 |
| Figura 8: Carta dos perfis litológicos - Franja Costeira - São Luís - MA | 56 |
| Figura 9: Perfil litológico A - B dos poços na franja costeira de São Luís – MA..... | 57 |
| Figura 10: Perfil litológico C - D Figura 17: Perfil litológico C -D dos poços na franja costeira de São Luís – MA | 58 |
| Figura 11: Perfil litológico E - F dos poços na franja costeira de São Luís – MA..... | 59 |
| Figura 12: Distribuição de água no subsolo. | 62 |
| Figura 13: Ocorrência de aquífero – Parâmetro | 81 |
| Figura 14: Condutividade Hidráulica - Parâmetro A - Franja costeira de São Luís - MA | 83 |
| Figura 15: Nível piezométrico - Parâmetro L - Franja costeira de São Luís - MA..... | 86 |
| Figura 16: Distância da linha de costa - Parâmetro D - Franja costeira de São Luís – MA.... | 88 |
| Figura 17: Impacto da intrusão marinha - Parâmetro I - Franja costeira de São Luís – MA .. | 93 |
| Figura 18: Espessura do aquífero - Parâmetro T - Franja costeira de São Luís – MA..... | 95 |
| Figura 19: Índice de vulnerabilidade na Franja costeira de São Luís - MA..... | 97 |
| Figura 20: Carta dos parâmetros GALDIT - Franja Costeira - São Luís – MA..... | 98 |

LISTA DE FOTOS

| | |
|--|----|
| Foto 1: Ponte sobre o rio Anil, ligando o Centro Histórico ao futuro bairro do São Francisco em 1970. São Luís – MA..... | 27 |
| Foto 2: Ponte sobre o rio Anil, ligando o Centro Histórico ao futuro bairro do São Francisco, Ponta D’areia e ao fundo a Lagoa da Jansen. São Luís – MA. | 27 |
| Foto 3: Vista parcial da Laguna da Jansen – São Luís-MA..... | 34 |
| Foto 4: Vista parcial da foz do Rio Anil – Franja Costeira de São Luís, MA | 38 |
| Foto 5: Vista parcial da foz do Rio Calhau – São Luís, MA. | 39 |
| Foto 6: Vista parcial de um curso d’agua do rio Pimenta – Franja Costeira de São Luís, MA. | 40 |
| Foto 7: Foz do rio Pimenta – Franja Costeira de São Luís, MA. | 40 |
| Foto 8: Vista parcial do afloramento dos Grupos Barreiras e Itapecuru – Franja Costeira de São Luís, MA..... | 46 |
| Foto 9: Formação do Grupo Itapecuru – Franja – Farol de São Marcos na Franja Costeira de São Luís, MA..... | 47 |
| Foto 10: Vista parcial do afloramento da Formação Alcântara na praia Ponta D’Areia, São Luís, MA..... | 48 |
| Foto 11: Vista parcial do afloramento da Formação Cujupe na praia de São Marcos, São Luís - MA. | 49 |
| Foto 12: Vista parcial do afloramento do Grupo Barreiras na praia de São Marcos, São Luís – MA..... | 50 |
| Foto 13: Afloramento de laterita do Grupo Barreiras indicado pelas setas – São Luís, MA...50 | |
| Foto 14: Vista parcial dos sedimentos de mangue dos Depósitos Quaternários – Franja Costeira de São Luís, MA..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Parâmetros Hidrodinâmicos dos Poços Tubulares no aquífero Itapecuru..... | 54 |
| Tabela 2: Valores de Condutividade hidráulica (K) e porosidade total (n) em diferentes materiais. | 67 |
| Tabela 3: Classes de vulnerabilidade de contaminação de aquífero. | 69 |
| Tabela 4: Dados hidrodinâmicos da área de estudo - Franja costeira - São Luís - MA..... | 84 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1: Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís - MA..... | 44 |
| Quadro 2: Parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos. | 66 |
| Quadro 3: Parâmetros GALDIT..... | 76 |
| Quadro 4: Classes de vulnerabilidade..... | 76 |
| Quadro 5: Parâmetro G: ocorrência de aquíferos..... | 77 |
| Quadro 6: Parâmetro A: condutividade hidráulica | 78 |
| Quadro 7: Parâmetro L: nível piezométrico (acima do nível do mar) | 78 |
| Quadro 8: Parâmetro D: distância à linha de costa | 78 |
| Quadro 9: Parâmetro I: Impacto do estado atual da intrusão marinha na região. | 79 |
| Quadro 10: Parâmetro T: espessura do aquífero..... | 79 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1: Precipitação total - Série de 200 a 2018 - São Luís - MA | 28 |
| Gráfico 2: Altura pluviométrica de 2000 ao ano de 2018. São Luís - MA. | 29 |
| Gráfico 3: Poço Tubular P-01 VALE. São Luís – MA. | 54 |
| Gráfico 4: Poço Tubular P-7 VALE. São Luís – MA. | 55 |
| Gráfico 5: Poço Tubular P22-02 - São Luís – MA..... | 55 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| [| |
| 1. CAPÍTULO. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA | 19 |
| 1.1. Introdução | 19 |
| 1.2. Objetivos..... | 21 |
| <i>1.2.1. Objetivos Específicos Alcançados.....</i> | <i>21</i> |
| 2. CAPÍTULO. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 22 |
| 2.1. Localização | 22 |
| <i>2.1.1. Localização dos poços tubulares.....</i> | <i>22</i> |
| 2.2. Histórico | 25 |
| 2.3. Clima..... | 28 |
| 2.5. Solo..... | 31 |
| 2.4. Geomorfologia..... | 32 |
| 2.6. Hidrografia..... | 38 |
| 2.7. Zona Costeira E Franja Costeira | 41 |
| 2.8. Geologia | 44 |
| <i>2.8.1. Grupo Itapecuru</i> | <i>46</i> |
| <i>2.8.2. Grupo Barreiras</i> | <i>49</i> |
| <i>2.8.3. Depósitos Quaternários.....</i> | <i>51</i> |
| <i>2.8.4. Geologia Estrutural.....</i> | <i>51</i> |
| 2.9. Hidrogeologia | 52 |
| 2.10. Comportamento dos aquíferos sob influência do efeito-maré..... | 60 |
| 3. CAPÍTULO: CONCEITOS E FUNDAMENTOS | 61 |
| 3.1. O Estudo dos Recursos Hídricos em uma Perspectiva Geossistêmica..... | 61 |
| 3.2. Dinâmica das Águas | 62 |
| <i>3.2.1. Distribuição e movimento da água no subsolo</i> | <i>62</i> |
| <i>3.2.2. Fatores que facilitam ou retardam o movimento das águas.....</i> | <i>63</i> |
| <i>3.2.3. Zona Não-Saturada ou Vadosa</i> | <i>63</i> |
| <i>3.2.4. Zona Saturada</i> | <i>64</i> |
| <i>3.2.5. Lei de Darcy.....</i> | <i>65</i> |
| 3.3. Métodos de avaliação da Vulnerabilidade de Aquífero | 68 |
| <i>3.3.1. Método GOD</i> | <i>68</i> |
| <i>3.3.2. Método DRASTIC</i> | <i>70</i> |

| | |
|---|------------|
| 3.3.3. Método GALDIT | 71 |
| 4. CAPÍTULO: MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO | 72 |
| 4.1. Materiais utilizados e procedimentos | 72 |
| 4.2. Principais fontes de pesquisa bibliográficas..... | 72 |
| 4.3. Trabalhos de campo | 73 |
| 4.4. Material cartográfico e aerofotos utilizados | 73 |
| 4.5. Coleta de água nos poços para análise físico-química..... | 73 |
| 4.6. Análise do perfil litológico e determinação dos dados hidrodinâmicos..... | 74 |
| 4.7. Aferição do Nível Estático dos Poços (NE)..... | 74 |
| 4.8. Parâmetros de Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K) e Coeficiente de Armazenamento (S) dos poços através do software <i>Aquiferwin 32</i> | 75 |
| 4.9. Aplicação do método GALDIT..... | 75 |
| 5. CAPÍTULO: AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA UTILIZANDO O MÉTODO GALDIT | 80 |
| 5.1. Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Método GALDIT..... | 80 |
| 5.1.1. Parâmetro “G” - Ocorrência do Aquífero..... | 80 |
| 5.1.2. Parâmetro “A” - Condutividade Hidráulica | 82 |
| 5.1.3. Parâmetro “L” - Nível do Piezômetro..... | 84 |
| 5.1.4. Parâmetro “D” - Distância da Linha de Costa (metros) | 87 |
| 5.1.5. Parâmetro “I” - Impacto do Estado Atual da Intrusão Marinha - razão $Cl / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ | 89 |
| 5.1.6. Parâmetro - “T” - Espessura do Aquífero..... | 94 |
| 5.2. Vulnerabilidade à intrusão marinha na franja costeira de São Luís – MA..... | 96 |
| 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 99 |
| REFERÊNCIAS | 101 |

A Deus e à Nossa Senhora de Fátima que me deram vida e ânimo para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Universidade Estadual do Maranhão *campus* Paulo VI e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço – Ppgeo UEMA pela disponibilidade de sua estrutura física e pelos seus servidores.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA por todo apoio científico, tecnológico e financeiro através da bolsa de mestrado e pelo fomento através do edital 037/2017 que possibilitou a realização do Estágio Internacional no Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC em Lisboa, Portugal.

Agradeço ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, sob a direção do presidente Carlos Alberto de Brito Pina, e ao João Paulo Lobo Ferreira, Coordenador da Assessoria para as Relações Internacionais, pelo apoio e acolhimento como estagiária no Departamento de Hidráulica e Ambiente.

Agradeço ao Manuel Mendes de Oliveira por ter me aceitado como sua orientanda no Departamento de Hidráulica e Ambiente. Por todo o aprendizado, profissionalismo, paciência e amizade que guardarei sempre com muito respeito.

Agradeço por todas as amizades feitas durante minha estadia em Lisboa no estágio no LNEC, em especial ao Tiago Martins por ter sido um bom companheiro de gabinete, ajudando sempre que possível; E aos meus companheiros de alojamento Erisvaldo de Lima, Aida, Maria Silva e Fatiméh فاطمة, pela companhia e apoio.

Agradeço à minha querida professora e orientadora Ediléa Dutra Pereira, pelos conselhos nos momentos de dúvidas e ajuda durante toda a minha caminhada acadêmica.

Aos meus pais Maria dos Remédios Sousa Castro e Marcos Paulo Castro Bröer, pelo incentivo, investimento, carinho e conselhos dados ao longo da vida. Pelo apoio e força nos momentos de queda e pelas alegrias. Ao meu irmão Antônio Marcos S. Castro (Guto) e minha prima Raimunda Sousa pela amizade durante toda a vida, durante as dificuldades e pela ajuda. Família, muito obrigada pelo amor de vocês

À minha amada avó Maria da Conceição Reis Castro (*in memoriam*) que sempre me motivou a descobrir outros mundos. Que ensinou que “Todos nós devemos nos transformar e ajudar na transformação de outros para que eles sejam felizes um dia”. A ti dedico Violetas na janela.

Ao Leonardo Gouveia por todo amor e palavra de incentivo, pela paciência e compreensão nos momentos em que tive de me ausentar por conta da Geografia.

À minha melhor amiga Larissa Marques pelo apoio em forma de incentivo na realização deste trabalho e por mostrar que amigos podem ser para toda a vida.

Às pessoas que tornaram o mestrado muito mais significativo, em especial à Nana Alves por toda a ajuda, apoio e paciência. Sem sua ajuda, a caminhada de muitos seria mais difícil.

Agradeço a companhia de todos os queridos amigos do Ppgeo UEMA, em especial à Gilberlene Serra, Rejane Moraes, Caroline Cunha, Juliany Silva, Augusto Campos e ao Alex Nunes que de forma especial me apoiou em todas as etapas do estágio internacional da FAPEMA.

Agradeço de coração a todos, pois sem vocês seria inviável a realização deste trabalho, e porque sem vocês, eu não seria tão feliz quanto sou.

Por fim agradeço, sobretudo, a Deus, causa primeira de todas as coisas, pelo dom da vida e da perseverança.

“Realmente, o mundo está cheio de perigos, mas ainda há muita coisa bonita e, embora atualmente o amor e a tristeza estejam misturados em todas as terras, talvez o primeiro ainda cresça com mais força.”

J.R.R. TOLKIEN

RESUMO

A cidade de São Luís é altamente influenciada pelas marés, condicionando a formação de uma cunha de água marinha no interior dos rios presentes na área, caracterizados pela presença dos mangues na planície flúvio-marinha, devido a grandes trechos de mangue e de estuários de rios. Tanto os mangues como os estuários apresentam salinidade elevada, principalmente nos períodos de estiagem, durante a preamar. A grande exploração de água subterrânea aliada às essas características físicas da área de estudo aumentam o risco de a salinização chegar aos aquíferos. Esse trabalho tem como objetivo principal a avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro de São Luís utilizando o método GALDIT. Através desse método foram zoneadas as áreas de elevada, moderada e baixa vulnerabilidade à intrusão marinha da franja costeira do município de São Luís. As caracterizações espaciais de cada um destes fatores, e a sua combinação conjunta, permitem obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade à intrusão marinha do sistema aquífero costeiro em estudo. Para tanto, foi necessário obter dados sobre as características do tipo de aquífero, como condutividade hidráulica do aquífero, distância à linha de costa, espessura do aquífero, estado atual da intrusão marinha na região e nível piezométrico, além da profundidade e da qualidade da água subterrânea. Esses dados foram obtidos a partir dos dados físico-químicos dos poços tubulares disponíveis nos Termos de Outorga disponibilizados pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado do Maranhão. Foram elaborados três perfis do substrato geológico através da análise dos dados estratigráficos de 32 (trinta e dois) poços tubulares para caracterização litológicas e hidrodinâmicas dos aquíferos. Na área de estudo são encontrados dois aquíferos: o primeiro é o Itapecuru, com sedimentos cretáceos do Grupo Itapecuru, que apresenta comportamento de semi-confinado, enquanto o segundo é um aquífero livre constituído por níveis arenosos do Grupo Barreiras do Neógeno. Através do mapeamento de vulnerabilidade foi observado que as áreas com maior número de poços tubulares ou maior densidade populacional apresentaram média e elevada vulnerabilidade, principalmente quando mais próximo à faixa costeira. Os parâmetros que mais influenciaram o índice GALDIT foram o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa), o que demonstra que o peso atribuído a estes dois parâmetros tem muita influência sob o resultado final do mapeamento. Tais resultados indicam a necessidade de um monitoramento dos poços tubulares e a aplicação urgente de uma gestão eficaz na exploração das águas subterrâneas, que considere sua capacidade de vazão e seu tempo de bombeamento diário. O cuidado na exploração da água subterrânea é necessário e emergencial para a manutenção e conservação da água doce de qualidade, e deve ser conduzida por uma gestão sustentável na franja costeira para proteção dos recursos hídricos subterrâneos na Ilha do Maranhão.

Palavras-chave: Água subterrânea; Franja Costeira; Vulnerabilidade; Aquífero; GALDIT.

ABSTRACT

The city of São Luís is highly influenced by the ocean tides, which induces the formation of a marine wedge in the interior of local rivers, which are characterized by the presence of mangroves in the fluvial-marine plain. Furthermore, the city has large stretches of mangroves and river estuaries, both of which show high salinity, especially during periods of drought, during high tide. The large exploitation of groundwater alongside with the presented physical characteristics of the study area increases the risk of high salinity water reaching aquifers. This work's main objective is to provide an assessment of São Luís coastal aquifer vulnerability to marine intrusion, using the GALDIT method. Through this method it was possible to highlight the areas of high, moderate and low vulnerability to marine intrusion of the coastal strip of the municipality of São Luís. The spatial characterization of each of these factors and their combination provided a weighted index that represents the vulnerability marine intrusion of the coastal aquifer system under study. Therefore, it was necessary to obtain data on the aquifer, such as its hydraulic conductivity, distance to the coast line, thickness, current state of marine intrusion in the region and piezometric level, in addition to the depth and quality of the underground water. The data was obtained from the physical-chemical data of the tubular wells available in Grant Terms, which were made available by the State Department of Environment of the State of Maranhão. Three profiles were elaborated based on geological substrate through the analysis of the stratigraphic data of 32 (thirty-two) tubular wells, in order to characterize the aquifers lithological and hydrodynamically. In the study area, two aquifers are found, the first one being the Itapecuru aquifer, which has cretaceous sediments from the Itapecuru Group and presents semi-confined behaviour, while the second is a free aquifer consisting of sandy levels from the Neogene Barreiras Group. Through the vulnerability mapping, it was observed that the areas with the highest number of tubular wells or the highest population density showed medium and high vulnerability, especially when closer to the coastal strip. The parameters that most influenced the GALDIT index were parameter L (piezometric level) and parameter D (distance from the coastline), which demonstrates that the weight attributed to these two parameters has a lot of influence on the mapping's final results. Such results indicate the need for monitoring of tubular wells and the urgent application of effective management in the exploration of groundwater, which considers its flow capacity and its daily pumping time. Groundwater exploitation should be handled with extreme care, in order to maintain and conserve fresh water, and it must be conducted on the coastal strip by a sustainable manager in order to protect groundwater resources on Maranhão's Island.

Keyword: Groundwater; Aquifer; Vulnerability; GALDIT.

1. CAPÍTULO. APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

1.1. Introdução

O processo da urbanização brasileira deu-se de forma acelerada mesmo em regiões onde a industrialização não ocorreu de modo intenso, como é o caso da região Nordeste. O crescimento da economia industrial e estilo de vida urbano cobijado pela maioria da população criou uma densa rede urbana, tornando as metrópoles lugares insalubres à sobrevivência.

O desenvolvimento das cidades veio, portanto, acompanhado de problemas sociais e ambientais, tais como a falta de moradias e favelização, a carência de infraestrutura urbana, o crescimento da economia informal, a poluição dos mananciais, a intensificação do trânsito, a periferação da população pobre, a ocupação de áreas de riscos como planícies de inundação e vertentes de declive acentuado.

Nos últimos anos, a Ilha do Maranhão desenvolveu um forte processo de urbanização, caracterizado, principalmente, pela inserção de grandes projetos industriais, tais como Companhia Vale do Rio Doce, MPX-Termoelétrica e ALUMAR, o que propiciou um acentuado crescimento no número de habitantes na cidade.

Essa dinâmica fez com que, a população da ilha, que contava com “apenas” 50 mil habitantes no ano de 1940 aumentasse em 70 anos para mais de 1.091.868 habitantes, em 2017 (IBGE, 2017) indicando um aumento expressivo da urbanização passando a Ilha para um *status* de metrópole.

A ocupação irregular do solo e o descumprimento de normas legais põem em risco a qualidade natural dos recursos hídricos, pois eventuais poluentes lançados na superfície têm meio favorável de percolação e podem atingir os aquíferos. Se houver a participação do aquífero na vazão de base da drenagem superficial, pode afetar também a qualidade do manancial (RIBEIRO *et al.*, 2011).

O crescimento urbano na cidade de São Luís a partir dos grandes empreendimentos instalados, expansão imobiliária com as novas construções de condomínios, e outros empreendimentos na franja costeira provocaram no solo impermeabilizações diminuindo as áreas de recarga do aquífero livre Barreiras e semi-confinado Itapecuru.

A CAEMA - Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão vem perdendo seus sistemas produtores como São Raimundo, Maracanã e Olho d'Água que foram desativados através dos anos pelas impermeabilizações das áreas de recargas e nas áreas de

descarga pela contaminação por esgoto *in natura* nas águas superficiais dos rios Bacanga, Anil, Paciência e outros. Associado têm-se as perdas de poços tubulares isolados causados pela intrusão da cunha marinha como os poços tubulares da CAEMA da área do Sá Viana em decorrência da Construção da Barragem do Bacanga e poços tubulares de particulares na área Itaquí-Bacanga.

O modelação matemática realizado para o aquífero costeiro na área da Ponta da Madeira para avaliar a possibilidade de atender a demanda de água de 94,5 l/s necessária para ser utilizada na Planta de Pelotização da CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), indicou que o aquífero apresentou intrusões marinhas, afetando a zona de mistura em algumas das captações dos poços presentes na área (F. JUNIOR *et al.*, 2003).

Esta pesquisa expressa as preocupações na utilização de águas superficiais e subterrâneas nas áreas costeiras, sem prévio conhecimento de suas potencialidades e vulnerabilidades, que podem provocar diversos impactos ambientais principalmente na área de mistura - interface água subterrânea (doce) e água marinha - que somente são percebidos paulatinamente pelos moradores, através das modificações da qualidade da água tornando-a salobra, variabilidade da profundidade do nível de água subterrânea, modificação da fauna e flora local nas adjacências.

Esta pesquisa pretende através da análise da vulnerabilidade à intrusão marinha do aquífero costeiro de São Luís, utilizando o método GALDIT, zonear as áreas de elevada, moderada e baixa vulnerabilidade a intrusão marinha, além de orientar e subsidiar através de instrumento técnico-científico a gestão territorial da franja costeira do município de São Luís.

1.2. Objetivos

Avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha através do método GALDIT na cidade de São Luís, Maranhão, Brasil.

1.2.1. *Objetivos Específicos Alcançados*

- Organizar um banco de dados dos poços tubulares na área compreendida entre a Foz do rio Anil e o limite municipal costeiro de São Luís;
- Determinar o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos Barreiras e Itapecuru.
- Elaborar a carta de vulnerabilidade à intrusão da cunha marinha na franja costeira a partir da Foz do Rio Anil até limite do município de São Luís com espacialização de 2 km a partir da linha de praia;

2. CAPÍTULO. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização

O recorte espacial da área de estudo é a franja costeira ao norte a partir da Foz do rio Anil até limite do município de São Luís com espacialização de 2 km a partir da linha de praia, compreendendo aproximadamente 25km² de área a ser estudada (Figura 1).

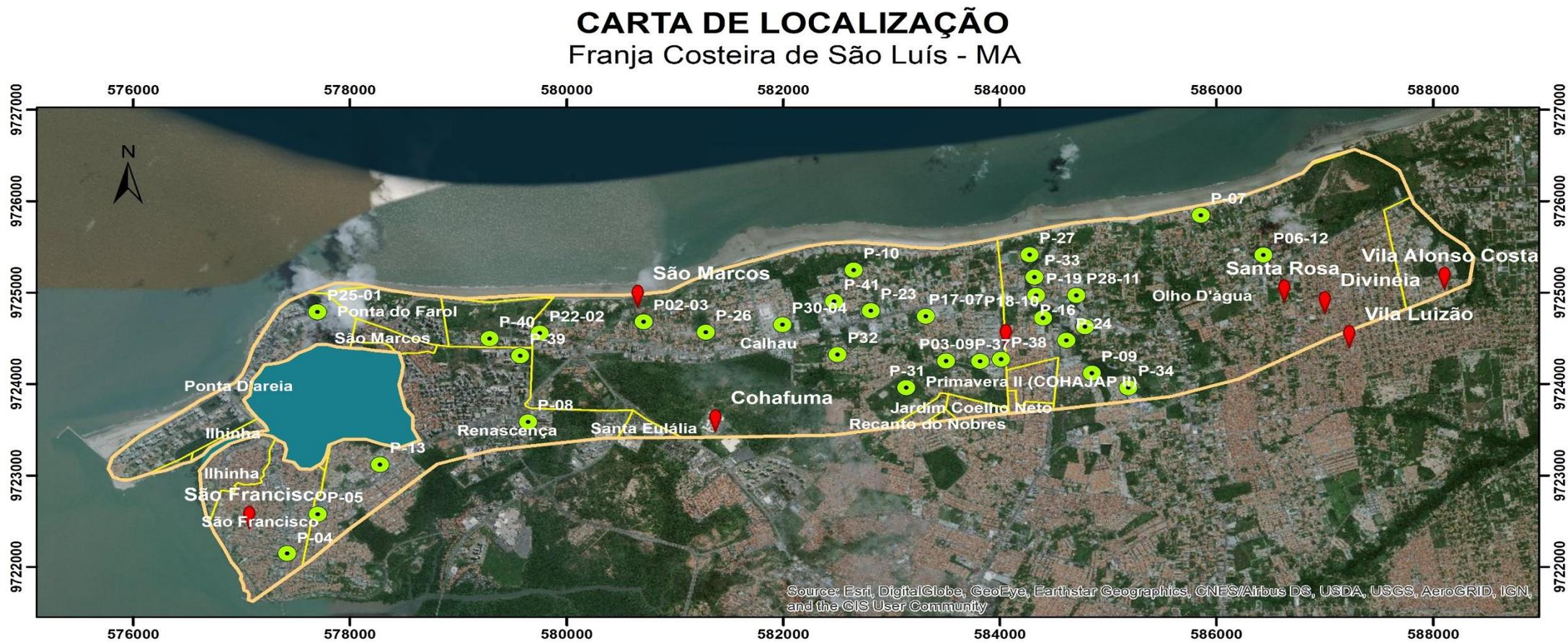
A área de estudo está localizada ao norte da Ilha do Maranhão na cidade de São Luís, no litoral ocidental banhado pela Baía de São Marcos, situa-se entre as coordenadas Universais Transversa de Mercator – Projeção UTM, fuso 23S; N 9727000/9721000 m e E 575000/589000m a 2° ao Sul do Equador, nas coordenadas geográficas latitude S 2°31' longitude W 44°16', e é parte da zona costeira do Estado do Maranhão, localizada na região do Golfão Maranhense (Figura 1). O acesso pode ser realizado pelas vias terrestres BR-135, MA-201, pela Avenida dos Holandeses e via marítima através de pequenos portos ao longo da foz do rio Anil.

2.1.1. Localização dos poços tubulares

Os poços tubulares localizados na franja costeira de São Luís foram cadastrados a partir da base de dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA que disponibilizou 52 termos de outorgas de poços tubulares, sendo utilizados apenas 34 (trinta e quatro).

Os poços estão distribuídos ao longo da área de estudo nos bairros Ponta D'areia, São Marcos, Calhau, Cohafuma e Olho D'água (Figura 1).

Figura 1: Carta de localização da área de estudo - Franja Costeira de São Luís - MA



- Poços
- Ocupações espontâneas
- Bairros
- Delimitação da área de estudo
- Laguna da Jansen

1:50.000

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum de Origem SIRGAS 2000
Zona 23 M
Fonte: TOPODATA, 2009; DSG, 1983.
Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

Situação geográfica

1:30.000.000

1:1.250.000

2.2. Histórico

A expansão urbana é uma das expressões mais concretas do processo de produção do espaço na sociedade contemporânea. No espaço urbano, a concentração de pessoas na forma de força de trabalho e de mercado consumidor, aliada à concentração dos meios de produção, permite que as forças produtivas alcancem um grau de desenvolvimento, acelerando a realização da mais-valia e a reprodução do capital, e ao mesmo tempo levando a uma concentração populacional ainda maior (NASCIMENTO; MATIAS, 2011).

O município de São Luís apresenta-se no ranking brasileiro entre as 100 maiores cidades do país, ocupando a 42ª colocação. Este crescimento se refere a um acelerado desenvolvimento, oriundo de um processo de aquecimento do mercado imobiliário (LIMA; SILVA, 2013).

Advindo desse crescimento de carros que trafegam no município, podemos observar que São Luís apresenta trechos de grande lentidão, especialmente em horas de pico, visto isso, a Prefeitura Municipal de São Luís - MA, realizou o projeto de prolongamento da Avenida Litorânea ampliando a estrutura viária, objetivando o deslocamento urbano (LIMA; SILVA, 2013).

Durante a década de 1940, São Luís começou sua expansão para além dos limites do núcleo urbano antigo, que foi proporcionada a partir da implantação dos bondes elétricos até o bairro do Anil, da Ferrovia São Luís – Teresina, e da abertura de novas avenidas, como a Getúlio Vargas e a João Pessoa, facilitando o deslocamento dos indivíduos, por meio de um transporte público, e que organizaram a ocupação de locais mais distantes do Centro, onde estavam situadas chácaras, quintas e sítios (LOPES, 2008).

No plano de expansão de São Luís, Mesquita (1958), comenta sobre a obra de Roberto Galvão, que foi intitulada de “Introdução ao conhecimento da área maranhense abrangida pelo Plano de Valorização Econômica da Amazônia”, demonstrando que a expansão da cidade ocorreu pela parte mais alta do relevo, e, após a formação dos bairros de Remédios e São Pantaleão, o crescimento urbano ocorreu em direção da estrada, que, no período, era a única saída para o continente e para o interior da ilha, denominada “Caminho Grande” (PEREIRA; ALCÂNTARA JR, 2017, p.992).

Assim, de acordo com Mesquita (1958, p. 1) são definidas três fases de ocupação na cidade, que foram sistematizadas da seguinte maneira: no século XVII, houve a formação do núcleo urbano; no século XVIII e início do século XIX, a constituição do bairro central (atual centro histórico); e, por fim, no século XIX, a formação dos bairros excêntricos.

Conforme Pereira e Alcântara Jr, (2017, p.992), o plano de expansão para o desenvolvimento de São Luís de 1958 criou um desenho urbano na área compreendida entre o rio Anil e o mar, definindo cinco zonas que eram destinadas aos usos social, administrativo, comercial e residencial. Esse zoneamento proposto para ocupação do novo território já determinava a divisão em setores de acordo com a renda do indivíduo, pois criou zonas residenciais com as seguintes designações: “de luxo” e de “primeira classe”, que seriam destinadas àquelas camadas sociais com um alto poder aquisitivo. Essas zonas nobres ocupavam parte do território com vista para a orla marítima, onde atualmente se encontram os bairros da Ponta D’Areia e de São Marcos, enquanto as zonas residenciais de “segunda e terceira classes” ocupariam a parte mais central da área (MESQUITA, 1958), que hoje é ocupada pelos bairros Renascença I e II.

Segundo (PEREIRA; ALCÂNTARA JR, 2017, p.992), algumas áreas foram destinadas para a implantação de edificações voltadas ao lazer e à cultura, como teatros, hotéis e cinemas, onde atualmente se encontram localizados o bairro do São Francisco e da Ponta D’Areia. Definiram-se espaços públicos como praças, jardins, mercados e praça da administração (dos três poderes), com edifícios de até 10 pavimentos para o executivo, legislativo, judiciário, secretarias e repartições do Estado. O plano destacava as edificações institucionais, pois apresentava uma nova configuração espacial e o aumento do gabarito para esses respectivos usos.

As praias da Ponta da Areia, São Marcos (Marcela), Calhau e Caolho (Jaguarema), passaram a ser frequentadas pela população, como uma nova opção de visitação e lazer já que se configuram como espaços públicos e livres com disponibilidade de acesso e diversão ao alcance de todos (BARBOSA, 2012).

A orla marítima passa a ser ocupada por uma classe com poder econômico mais elevado, enquanto as partes sul e sudoeste se configuram por assentamentos de origem informal, iniciados por trabalhadores com baixo poder aquisitivo e que não possuem acesso a uma moradia de qualidade, e que também não é ofertada pelo Estado. Assim, nos anos 1970, a capital maranhense vive uma nova expansão urbana, agora em direção ao norte da ilha. Com a construção da ponte do São Francisco, o centro liga-se à orla marítima. Essa intervenção foi complementada pela construção da Avenida Maestro João Nunes, que ligou os bairros do São Francisco e Ponta d’Areia (Foto 1), criando uma laguna (Foto 2), com um espelho d’água de 3,5km², resultado do represamento das águas da maré pelo aterro sobre o Igarapé da Jansen. Lopes (2008) comenta que:

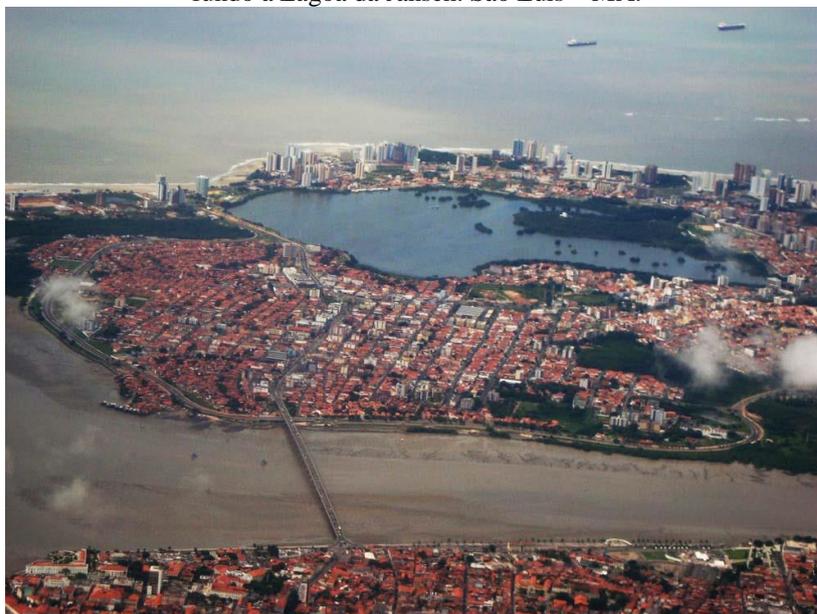
[...] este vetor de expansão proporcionou um novo processo de abandono do centro. Além disso, a construção da barragem do Bacanga e a construção do Porto do Itaqui contribuíram para retirar da Praia Grande todo o trabalho de estiva, ficando somente o movimento ribeirinho com as embarcações que fazem o trajeto interiorano. (Ibid., p. 36)

Foto 1: Ponte sobre o rio Anil, ligando o Centro Histórico ao futuro bairro do São Francisco em 1970. São Luís – MA



Fonte: Pereira e Alcântara Jr (2017)

Foto 2: Ponte sobre o rio Anil, ligando o Centro Histórico ao futuro bairro do São Francisco, Ponta D'areia e ao fundo a Lagoa da Jansen. São Luís – MA.



Fonte: Aurélio Schmitt (2008)

A criação de um novo padrão comportamental fez com que a classe com alto poder aquisitivo ocupasse áreas que possuíam características exclusivas locais e até mesmo de paisagens naturais, como a orla marítima com vista para o mar, a margem do rio Anil e a

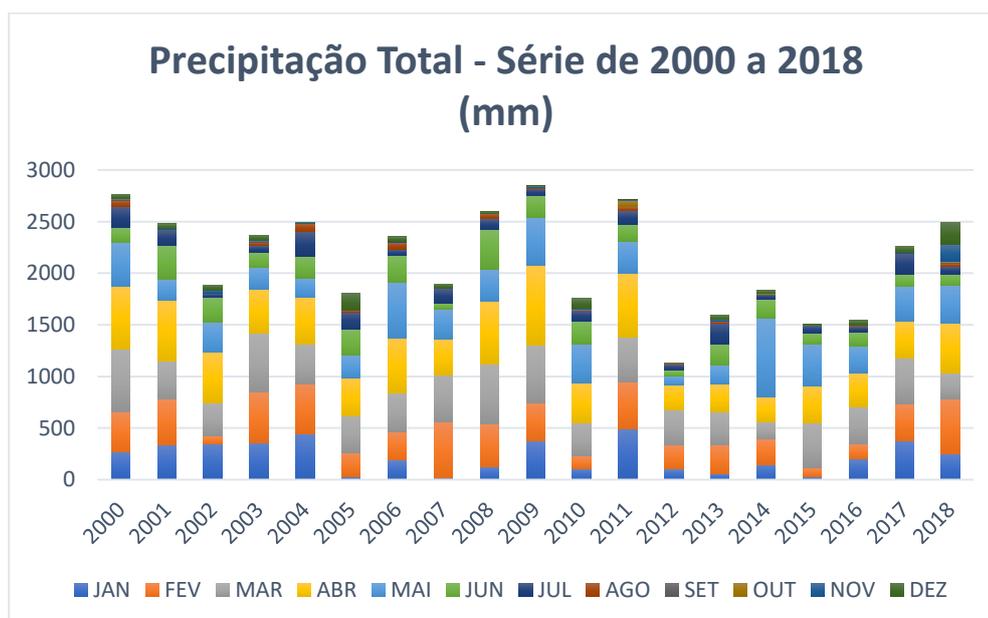
Laguna que seria criada, hoje conhecida como Lagoa da Jansen. Isso resultou na valorização do solo urbano de determinados setores em relação a outros, fomentando o processo de diferenciação do valor do solo urbano (PEREIRA; ALCÂNTARA JR, 2017, p.992).

2.3. Clima

A Ilha do Maranhão está inserida na área de transição climática do semiárido nordestino e tropical úmido amazônico, sendo considerado como um clima tropical chuvoso, com estação seca de inverno (STRAHLER, 1960).

A sazonalidade da chuva na área é marcante indicando o período chuvoso de janeiro a junho e o período seco de julho a dezembro, conforme a classificação de Köppen (Gráfico 1).

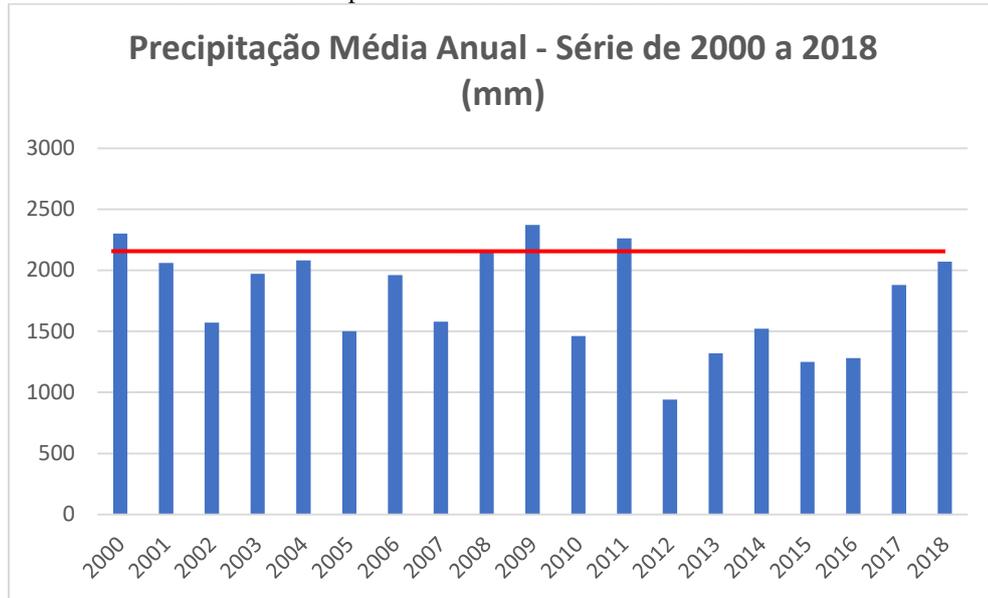
Gráfico 1: Precipitação total - Série de 200 a 2018 - São Luís - MA



Fonte: INMET, 2018.

A análise da série temporal dos dados climatológicos do período 2000-2018 da rede do Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, indicaram os anos de 2000, 2009 e 2011 como os anos excepcionalmente chuvosos com o acumulado pluviométrico anual de 2.703mm em 2000, 2.847,8mm em 2009 e 2.713,3mm em 2011 (Gráfico 2). Com uma normal climatológica dos anos de 1981 a 2010 para a cidade de São Luís de 2.199 mm representado pela linha vermelha do gráfico 2.

Gráfico 2: Altura pluviométrica de 2000 a 2018. São Luís - MA.

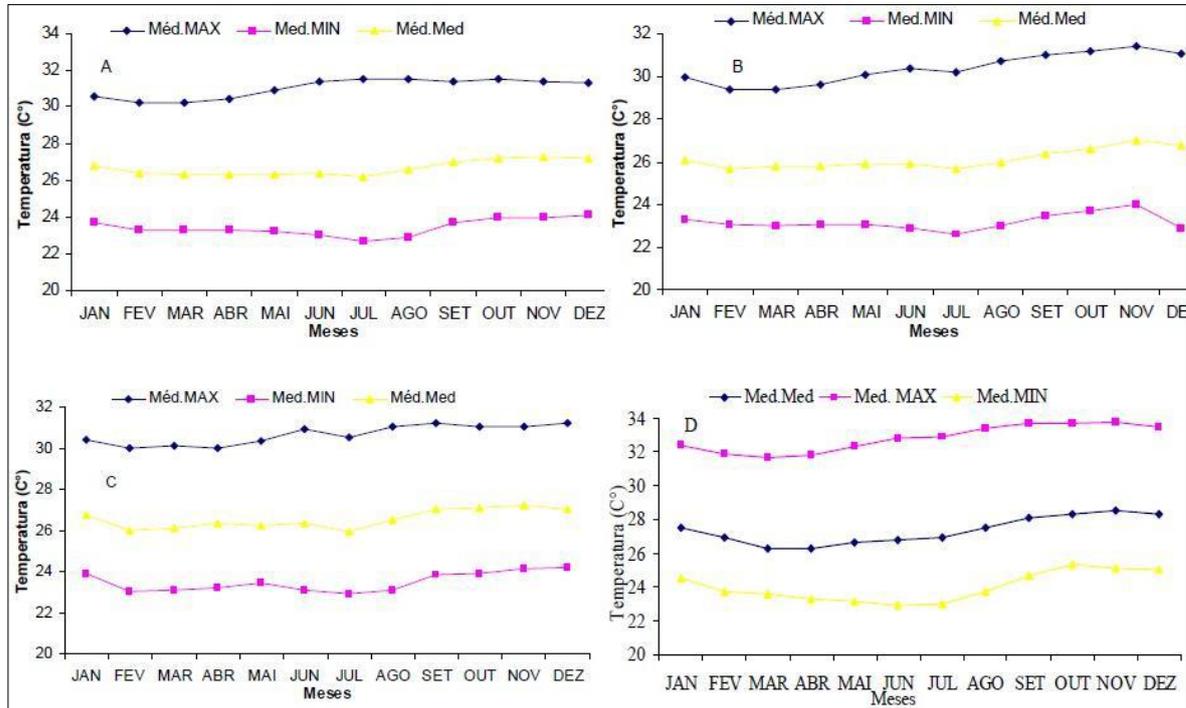


Fonte: INMET, 2018.

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%.

Segundo Silva (2012, p.93) pode-se afirmar que a temperatura média anual da área de estudo é de 26,9°C, sendo os meses de novembro e dezembro os mais quentes e os de fevereiro, março e julho, os mais frios (Figura 2), com destaque para este último mês, o qual é o último do período chuvoso e também coincidente com o inverno no hemisfério Sul.

Figura 2: Distribuição mensal das temperaturas médias, média das máximas e média das mínimas A – período de 1931 a 1960; B – período de 1971-1990; C – período de 1990 a 1999; e D - 2002 a 2009.



Fonte: Silva, 2012 *apud* UFMA, 2009.

Com quase nenhuma variação ao longo do ano, as temperaturas são uniformemente distribuídas ao longo dele. Apenas tendo uma ligeira redução nas médias e máximas, fato explicado em função da maior nebulosidade e diminuição da radiação direta. Na realidade, as variações de temperatura mais significativas acontecem no decurso do dia e da noite, seguindo o movimento aparente do sol e a ocorrência de maior ou menor nebulosidade, acompanhadas ou não de precipitação.

A temperatura máxima absoluta registrada em São Luís foi de 34,8°C, no dia 17/11/1947, e a mínima foi de 17,9°C, no dia 26/03/1987. As temperaturas máximas nunca ultrapassaram os 35°C, e as mínimas raramente apresentam valores abaixo de 20°C (DNMET, 1992) (UFMA, 2009, p. 150).

Estas constantes e altas temperaturas no decorrer de todo o ano aceleram diretamente o intemperismo mecânico e atuam indiretamente no intemperismo químico através da ação da água.

2.5. Solo

O solo é um dos componentes da biosfera, que se entrega a outros sistemas, promovendo um desenvolvimento biótico e abiótico do planeta. De acordo com Maranhão (2002) os solos são constituídos por misturas de argila, calcário, areia, matéria orgânica, água, ar e microorganismos.

Os solos que predominam na Ilha são: o Latossolo Vermelho-Amarelo, com boa drenagem e profundidade, pouca diferenciação dos horizontes, granulometria variada entre argilosa e arenosa, com destaque para os solos hidromórfico; o “Podzólico” vermelho-amarelo concrecionário, areias quartzosas; e o solo indiscriminado de mangue (PEREIRA, 2006).

Considerando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos proposto pela Embrapa (2006), numa escala de 1:1.000.000, têm-se, na franja costeira de São Luís, as seguintes classes de solos: Argissolo, Plintossolo e Latossolo Amarelo.

Os primeiros se caracterizam por serem solos bastante intemperizados, marcante diferenciação de horizontes, com um B de acúmulo de argila, possui coloração cinza escura, granulometria bimodal de areia média a fina, consistência baixa, muito drenados e transição entre os horizontes A e B gradual. Estes solos geralmente são pobres em nutrientes (LEPSCH, 2010, p.101-102).

Lepsch (2010, p.105-106) descreve os Plintossolos como sendo a classe de solos com horizontes com pronunciado acúmulo de óxido de ferro e/ou alumínio na forma de nódulos. Tais feições podem ser tanto macias constituindo a plintita, como muito endurecidas, caso das petroplintitas. Esses solos geralmente são encontrados entre os Latossolos e Argissolos, principalmente nas regiões mais quentes do Brasil. Podem ser formados em locais mal drenados, ácidos, apresentando horizontes arenosos, com cores acinzentadas, típicas da redução e redistribuição de ferro ou podem estar em locais bem drenados e constituintes de novos materiais originários de novos solos. O perfil típico desse solo apresenta cores avermelhadas ou alaranjadas e pequenas diferenciações de horizontes e de forma geral facilitam a drenagem de água.

De acordo com Lepsch (2010, p.96-98), os Latossolos Amarelo são encontrados geralmente nos tabuleiros costeiros do Nordeste, enquadrando-se à franja costeira de São Luís. São solos muito intemperizados, com pequena diferenciação de horizontes e, na sua maior parte, sem macroagregados nítidos no horizonte B. Os processos responsáveis pela sua formação são comumente designados como dessilicificação ou latossolização (ou laterização).

Possuem um horizonte B latossólico muito espesso e atingem mais de 2 metros de profundidade, com consistência muito friável, alta porosidade e coloração que varia de avermelhadas e amareladas. A textura, relativamente uniforme em todo o perfil, varia de média a muito argilosa. A estrutura é composta de agregados granulares, por vezes comparadas a “pó de café”, onde os grãos pequenos variam de 1 a 3 mm de diâmetro, soltos e bem definidos, similares às areias; dessa forma, deixam entre si grandes espaços porosos, o que proporciona uma alta permeabilidade, mesmo quando são argilosos.

Os Argissolos e os Neossolos, com exceção dos Neossolos Quartzarênicos Órticos Alumínicos (RQoa), estão associados à ocorrência dos sedimentos do Grupo Barreiras e aos tabuleiros com topos planos e colinas esparsas e dissecadas da Ilha do Maranhão.

Segundo a EMBRAPA (2006), os Argissolos é um grupamento de solos com B textural, com argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. A base teve evolução avançada com atuação incompleta de processo de ferralitização, em conexão com paragênese caulínica-oxidíca ou virtualmente caulínica, ou com hidróxi-Al entre camadas, na vigência de mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial.

Os Neossolos Quartzarênicos Órticos Alumínicos (RQoa) não apresentam horizontes genéticos definidos, com exceção do orgânico-mineral A. São solos predominantemente arenosos, de baixa fertilidade natural, elevada acidez (MARANHÃO, 1998). Na área de estudo correm na faixa costeira, nas áreas de praias, dunas, paleodunas, ocupando as mais diversas porções de São Luís.

Para Silva (2012, p.127), na área de estudo tem-se Gleissolos alumínico e distrófico, caracterizados por serem mal drenados, hidromórficos, muito ácidos, pouco profundos, de textura arenosa e média arenosa, ocorrendo nas planícies fluviais. O horizonte A apresenta espessura de 20 cm, com textura arenosa, ligeiramente plástica, não pegajosa e com cor bruno forte. O horizonte C apresenta textura franco arenosa, ligeiramente plástica a não plástica, com cor variando de bruno acinzentado muito escuro à cinzentado. Este solo não possui o horizonte B diagnóstico e sua textura é caracterizada por apresentar areia franca; tem estrutura sub-angular, e as raízes das plantas tornam este solo mais poroso. Quanto à consistência, o solo, quando seco, é ligeiramente duro; quando molhado, é firme. Na área de estudo, os solos em questão estão relacionados à Formação Quaternária fluvial da Ilha do Maranhão (SILVA, 2012).

2.4. Geomorfologia

Para Guerra e Muehe (2017, p. 191) a formação do relevo é resultado de uma longa interação entre tectonismo, litologia e clima. A compreensão desta evolução pode fornecer, muitas vezes, importantes indicações para a inferência da evolução futura, ou para melhor avaliar a representatividade de uma tendência evolutiva.

Dentre os diferentes agentes climáticos, a precipitação e o padrão dos ventos são considerados altamente importantes, devido à sua significativa interferência na modificação das paisagens existentes na franja costeira, principalmente nos ambientes sedimentares eólicos (SANTOS, 2008).

Feitosa (1996) afirma que as águas da baía de São Marcos e São José que formam o Golfão Maranhense têm muita influência no modelado da Ilha do Maranhão, em virtude da penetração da lâmina d'água nos igarapés e da amplitude média das marés na área, que varia em torno de 6 (seis) metros.

A Ilha de São Luís está situada no centro da Planície Flúvio-Marinha do Golfão Maranhense, sendo formada por rochas e sedimentos do Grupo Itapecuru e Barreiras respectivamente. Nas faixas de baixas altitudes 0 a 5 metros tem-se as planícies flúvio-marinhas com a presença de mangues; nos níveis de 5 a 15 metros temos a presença das planícies costeiras; Entre 15 a 30 metros, as suaves colinas dissecadas; e nas altitudes maiores de 40 a 60 metros, tem-se a presença dos tabuleiros (PEREIRA, 2006). A maior altitude encontrada na área de estudo atinge 53 metros (Figura 3).

Segundo Silva (2012) são identificadas unidades de relevo na Ilha do Maranhão, que estão ligadas a fatores agradacionais e denudacionais. As formas de relevo agradacionais são planícies de maré, apicum, praias arenosas e dunas, paleodunas, terraços marinhos e planícies fluviais. Enquanto as formas de relevo denudacionais correspondem ao conjunto de tabuleiros com topos planos, colinas esparsas e vertentes. Estas últimas unidades de formas predominam na Ilha do Maranhão.

A área de estudo está inserida na área do Golfão Maranhense e Baía de São Marcos, e possui características de planícies de maré, praias arenosas, dunas e paleodunas, onde fazem parte dos fatores agradacionais. Quanto aos fatores denudacionais, as formas de relevo em que a área de estudo está inserida são tabuleiros com relevo relativamente plano, pequenas colinas e falésias.

Segundo (SILVA, 2012), numa área de planície de maré, situada a 4km do Centro Histórico de São Luís e localizada na porção noroeste da Ilha do Maranhão, encontra-se a Laguna da Jansen (Fotos 2 e 3), de origem antrópica, formada em meados da década de 1970

em virtude “(...) de aterros efetuados durante o plano de urbanização das praias da Ponta d’Areia (...)” (COSTA *et al*, 2008, p. 2).

Foto 3: Vista parcial da Laguna da Jansen – São Luís-MA.



Fonte: Augusto Campos (2015)

Segundo Coelho (2002), a Laguna da Jansen, comumente denominada pela população local de “Lagoa da Jansen”, foi gerada pelo represamento dos igarapés Ana Jansen e Jaracaty provocado pelas construções das avenidas Colares Moreira e Maestro João Nunes, para facilitar o acesso da população desta área ao bairro São Francisco (SILVA, 2012).

O entorno da laguna está todo ocupado por residências e instalações comerciais; é uma área urbana muito valorizada no mercado imobiliário e encontra-se margeada pelos bairros da Ponta do Farol, São Francisco, Ponta d’Areia e Renascença I e II.

A costa sub-retilínea inclui as morfologias deposicionais como *strand-plains* ou praias (ROSSETI, 2008), dunas, paleodunas, terraços marinhos e as costas erosivas marcadas pelas falésias.

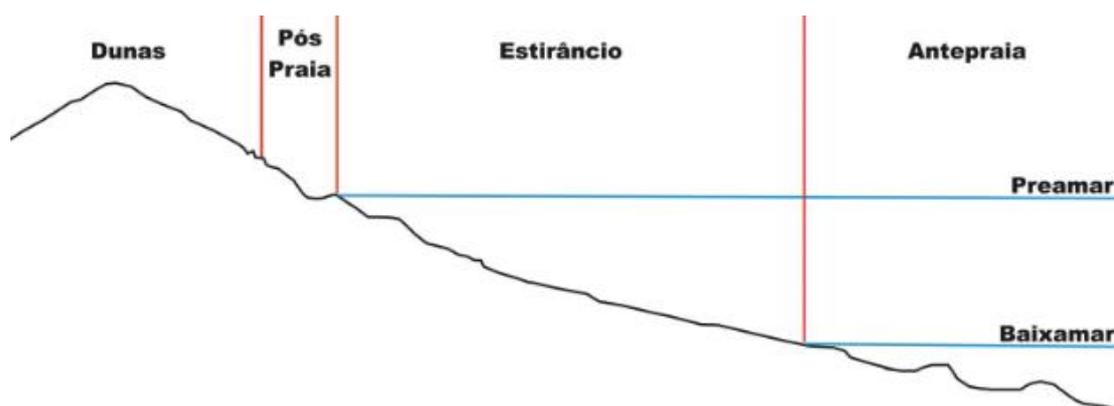
Estas formas de relevo são observadas predominantemente na área de estudo. Isto ocorre em função da maior exposição destas áreas à atuação das ondas e das correntes litorâneas. Suguio (1992) afirma que praia é uma

Zona perimetral de um corpo aquoso (lago, mar, oceano), composta de material inconsolidado, em geral arenoso (0,062 a 2 mm) ou mais raramente composta de cascalhos (2 a 60 mm), conchas de moluscos, etc., que se estende desde o nível de baixamar média (profundidade de interação das ondas com o substrato...) para cima,

até a linha de vegetação permanente (limite de ondas de tempestade), ou onde há mudanças na fisiografia, como zona de dunas ou de falésias marinhas (...) (p. 99).

As praias do litoral norte da Ilha de São Luís apresentam largura média de aproximadamente 250m, podendo variar em face da grande amplitude de maré. A faixa praial possui em geral extensão com cerca de até 8km. A declividade apresenta idêntico comportamento, constituindo uma superfície plana cuja monotonia é quebrada apenas pela existência de cristas e canaletas, que ocorrem esporadicamente, atravessando as praias em processo migratório na direção da costa, onde desaparecem em seguida, preenchidas por areia. Em regra geral, as praias da Ilha de São Luís apresentam o seguinte perfil (VIANA, 2000) (Figura 3):

Figura 3: Perfil das praias da área de estudo - Franja costeira de São Luís – MA.



Fonte: Viana (2000).

Segundo El-Robrini (2006, p. 113), as praias do litoral norte da Ilha do Maranhão apresentam um estágio morfodinâmico dissipativo, com “(...) intensa atividade das ondas, marés, correntes litorâneas e ventos (...)”.

Na praia da Ponta d’Areia tem-se uma morfologia alongada denominada de pontal, apresentando-se como uma “língua” de areia, de baixa altura e paralela à costa, sendo que estas feições se encontram em estágio de acresção, em virtude do considerável aporte de sedimentos, através do transporte litorâneo no sentido predominante E-W (EL-ROBRINI *et al*, 2006, p. 103).

Na área de estudo tem-se também as dunas que são “montes de areia móveis, depositados pela ação do vento dominante. A movimentação dos grãos de quartzo é constante, devido à ação do vento” (GUERRA; GUERRA, 2006, p. 215.).

Neste sentido e juntamente com as dunas, os lençóis de areia são considerados como os tipos de depósitos de areias eólicas mais importantes das zonas costeiras (SANTOS, 2007).

Os depósitos arenosos inativos correspondem às dunas fixas ou inativas ou ainda às paleodunas, que são descritas normalmente como associadas aos campos de dunas transgressivos no Brasil (GIANNINI *et al*, 2005). Na área de estudo, as paleodunas estão localizadas na interface entre as praias e os tabuleiros, apresentando aproximadamente 6 a 15 m de altura e, em sua maioria, são vegetadas.

Na área de estudo também há a presença das falésias, que são classificadas como geoformas relacionadas às costas erosivas (ROSSETI, 2008), abruptas (BLOOM, 1972), ou altas (VILLWOCK *et al*, 2005) e que também ocorrem nas porções sub-retilíneas da área de estudo com altimetria variando de 20 a 26 metros. Conforme Suguio (1992), as falésias são escarpas abruptas, não necessariamente costeiras, com formas variadas. Sendo costeiras, são geradas pela ação das ondas sobre as rochas. Para Meireles (1999) as falésias são morfologias costeiras relacionadas às oscilações do nível relativo do mar e às mudanças nas condições climáticas (SILVA, 2012, p.169).

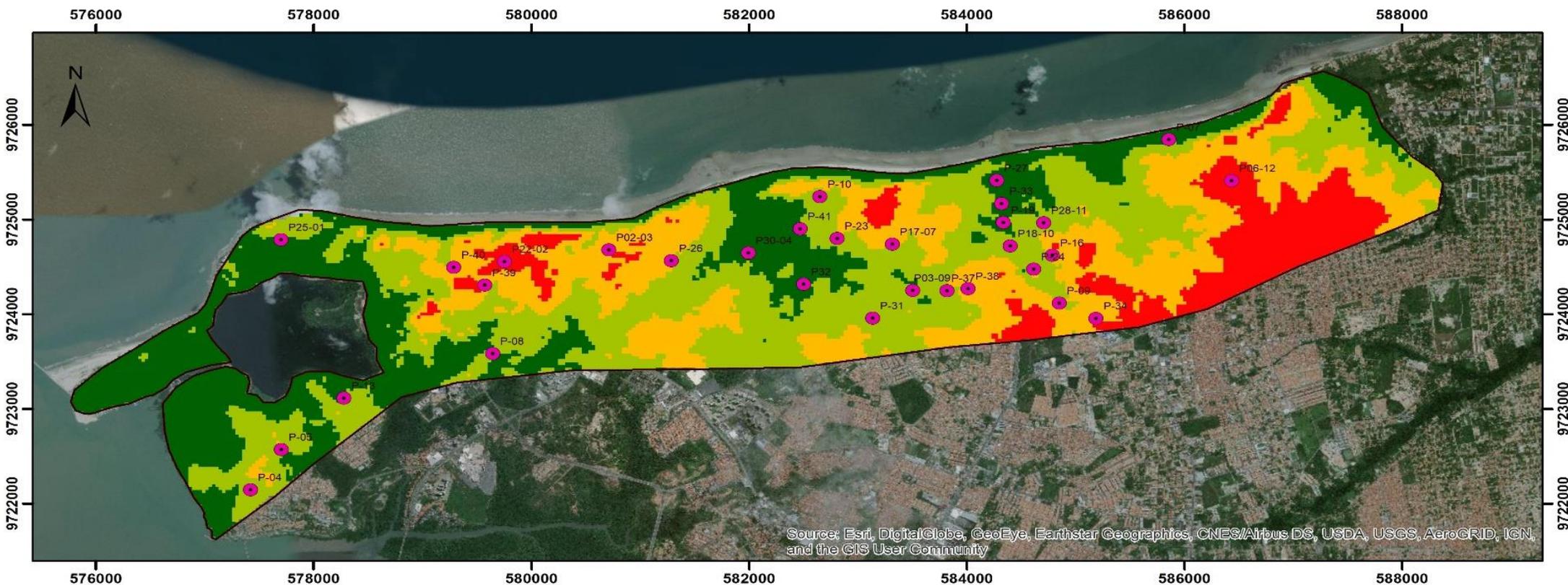
As planícies de maré se interiorizam na ilha por meio dos canais de drenagem, em virtude da grande amplitude de maré, denominada assim de macromarés. Em grande parte dos canais da área de estudo, essa planície ocupa os médios e baixos cursos dos rios, indicando a grande e fundamental importância das marés na modelagem do relevo na região, com altimetria variando de 0 a 6 metros (Figura 4).

A área de estudo está sob uma planície costeira demarcada pela entrada de maré formando as planícies flúvio-marinha na margem direita do rio Anil e rio Calhau, com destaque para a Laguna da Jansen e os tabuleiros intensamente dissecados a sudeste da área (Figuras 3 e 4).

Figura 4: Carta Hipsométrica da Franja Costeira de São Luís – MA.

CARTA HIPSOMÉTRICA

Franja Costeira de São Luís - MA



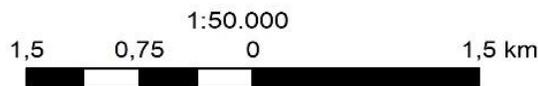
Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Legenda

- Poços
- Delimitação da área de estudo

Hipsometria (m)

- 0 - 5 planícies flúvio-marinhas
- 5 - 15 planícies costeiras
- 15 - 30 colinas dissecadas
- 30 - 53 tabuleiros



Projeção Universal Transversa de Mercator
 Datum de Origem SIRGAS 2000
 Zona 23 M
 Fonte: TOPODATA, 2009.
 Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

Situação geográfica



1:30.000.000

1:1.250.000

2.6. Hidrografia

Na franja costeira da área de estudo na porção norte do município de São Luís encontram-se os rios Anil, Calhau, Pimenta, Claro, Jaguarema e pequenas bacias Litorâneas, que são influenciados por fatores oceanográficos e continentais (Figura 5).

O conhecimento do comportamento hidrológico é um importante passo que deve preceder o planejamento do uso e ocupação. Embora seja controlada principalmente pelas forças climáticas, pedológicas e geomorfológicas, a dinâmica hidrológica pode sofrer significativas alterações resultantes da ação antrópica, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

A bacia do rio Anil está localizada no quadrante NW da Ilha do Maranhão, tendo como rio principal o Anil com aproximadamente 13,8 km de extensão e estando totalmente inserida nos limites da cidade de São Luís.

As suas nascentes estão localizadas no Bairro Aurora, descendo ao nível do mar aproximadamente 9,5 km em linha reta (Figura 5, Foto 4), com eixo direcional orientado de SE para NW a partir da nascente, a sua calha caracteriza-se por apresentar um perfil meândrico, cortando a porção NE do centro urbano da cidade de São Luís, no trajeto em direção à desembocadura (ALCÂNTARA, 2005).

Foto 4: Vista parcial da foz do Rio Anil – Franja Costeira de São Luís, MA



Fonte: Silva (2012).

Outro rio que está presente na área de estudo é o rio Calhau, que tem 2,2km de extensão, desagua na praia do Calhau na baía de São Marcos (Foto 5), é alimentado por

córregos e igarapés cujas nascentes estão localizadas no Sítio Rangedor, sendo esta habitada por muitas famílias.

Foto 5: Vista parcial da foz do Rio Calhau – São Luís, MA.



Fonte: Jornal O Imparcial, 2012.

O rio Calhau é pouco conhecido, pois é um rio canalizado que se encontra por baixo da Avenida dos Holandeses e desemboca na litorânea. É um rio poluído e isso ocorre devido ao acúmulo de lançamentos de esgoto *in natura* (Foto 6). O Rio Calhau corta o bairro Planalto Vinhais, Park La Ravardière, Olho D'Água e Alto do Calhau. A área da bacia do Rio Calhau localiza-se na porção Norte da Ilha do Maranhão, ocupando parte do topo da bacia sedimentar de São Luís, onde afloram rochas do Grupo Itapecuru e do Grupo Barreiras.

O rio Pimenta também é um rio presente na área de estudo e está localizado entre as bacias dos rios Calhau e Claro, é alimentado por córregos e igarapés cujas nascentes estão localizadas próximo ao bairro Vila Vicente Fialho, que se encontra intensamente urbanizado (Foto 7). O rio Pimenta tem sua foz localizada próximo ao final da Avenida Litorânea (Foto 8; figura 5).

Foto 6: Vista parcial de um curso d'água do rio Pimenta – Franja Costeira de São Luís, MA.



Fonte: Grupo Beatrice, 2017.

Foto 7: Foz do rio Pimenta – Franja Costeira de São Luís, MA.



Fonte: Flora Dolores, 2016.

O rio Claro situado na franja costeira do município de São Luís, possui sua nascente no bairro Turu, tem aproximadamente 12,6km de extensão e deságua na praia do Olho d'Água.

O rio Jaguarema (Figura 4) tem suas principais nascentes no município de São José de Ribamar, Maranhão, onde tem suas cabeceiras nos limites urbanos da cidade, e desagua no oceano entre as praias do Meio e Olho d'água no município de São Luís, dentro da área de pesquisa. Encontra-se intensamente degradado em suas nascentes e tem ao longo do seu curso impactos ambientais como o desmatamento e a ocupação desordenada.

A bacia hidrográfica do rio Jaguarema apresenta um conjunto de danos ambientais decorrentes principalmente do uso irregular do solo observados na remoção da cobertura vegetal, descaracterização das nascentes, descarte de resíduos sólidos nas encostas, lançamento de efluentes domésticos *in natura*, assoreamento das margens e canalizações Gonçalves *et al.*, (2010).

2.7. Zona Costeira E Franja Costeira

A Constituição Federal de 1988, no § 4º do seu artigo 225, define a Zona Costeira como “patrimônio nacional”, destacando-a como uma porção de território brasileiro que deve merecer uma atenção especial do poder público quanto à sua ocupação e ao uso de seus recursos naturais, assegurando-se a preservação do meio ambiente.

Este compromisso é expresso na Lei Federal Nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC) como parte integrante da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) e da Política Nacional para os Recursos do Mar (PNRM). A lei definiu ainda que o detalhamento deste Plano fosse estabelecido em documento específico, no âmbito da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), visando orientar a utilização racional dos recursos na zona costeira.

Para Bloom (1972), a costa consiste em uma zona onde há interferência de terra, mar e ar, sendo quase uma linha, estreita em largura e altura, mas grande em extensão. Para este autor, a zona costeira inclui a faixa estreita de terra sob a influência do mar e, a de mar, sujeita à influência de terra.

Segundo Muehe (1998, p. 287), as planícies costeiras são formas “(...) relativamente planas, baixas, localizadas junto ao mar, e cuja formação resultou da deposição de sedimentos marinhos e fluviais”. Este mesmo autor defende que zona costeira é a área ocupada por águas costeiras e terras emersas adjacentes e em constante interação. Assim, toda a área-objeto de estudo está situada na zona costeira do Golfão Maranhense, caracterizada por ser uma costa mista, isto é, com planícies costeiras e costas de erosão marinha.

Apesar de ser considerada como uma costa mista, El-Robrini *et al.* (2006) acrescenta que a Ilha do Maranhão (incluindo a ilha de Curupu) apresenta dois tipos de costa, isto é, costa sub-retilínea e costa recortada.

Nesse sentido foi utilizado o termo Franja Costeira para caracterizar a área de estudo por se tratar de uma área com escala menor do que a escala da zona costeira, já que a zona costeira de acordo com Suguio (1992, p. 36), se refere à faixa de terra de largura variável, que

se estende da linha de praia (*shoreline*) para o interior do continente até as primeiras mudanças significativas nas feições fisiográficas. Esta faixa varia normalmente de alguns quilômetros a algumas dezenas de quilômetros.

As zonas costeiras representam um dos maiores desafios para a gestão ambiental do país, especialmente quando abordadas em conjunto e na perspectiva da escala da União. Além da grande extensão do litoral e das formações físico-bióticas extremamente diversificadas, convergem também para esse espaço os principais vetores de pressão e fluxos de toda ordem, compondo um amplo e complexo mosaico de tipologias e padrões de ocupação humana, de uso do solo e dos recursos naturais e de exploração econômica.

Figura 5: Carta da Rede Hidrográfica – Franja Costeira de São Luís, MA.

CARTA DA REDE HIDROGRAFICA

Franja Costeira de São Luís - MA



Legenda

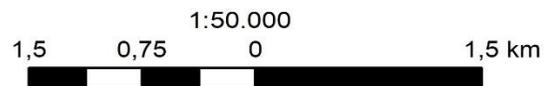
-  Rede hidrográfica
-  Foz do rio Anil
-  Laguna da Jansen
-  Delimitação da área de estudo



FAPENMA



LEBAC
Laboratório de Estudo de Bacias



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum de Origem SIRGAS 2000
Zona 23 M
Fonte: TOPODATA, 2009; DSG, 1983.
Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

Situação geográfica



1:30.000.000



1:1.250.000

2.8. Geologia

A Ilha do Maranhão ocupa a parte setentrional do Golfão Maranhense, parte integrante da Bacia Costeira de São Luís, formada por rifteamento durante o Cretáceo (Eocretáceo-Albiano). Limita-se ao Norte pela plataforma continental, ao Sul pelos Altos Estruturais Arco Férrer-Urbano Santos, disposto aproximadamente E-W, a leste pelo Horst de Rosário e a Oeste pelo Arco de Tocantins. Os sistemas de lineamentos indicam direção preferencial NE-SW e NW-SE nos terrenos cretácicos e neógenos da Bacia de São Luís (Rodrigues *et al.*, 1994).

A sedimentação na Bacia de São Luís iniciou-se com a deposição das rochas no Cretáceo representado na área de estudo pelo Grupo Itapecuru (Formação Alcântara, Formação Cujupe, e Unidade Indiferenciada), tendo continuado no Neógeno com os arenitos, siltitos e argilitos do Grupo Barreiras e, finalmente, recobertos pelos Depósitos Quaternários como os aluvionares, de mangues e eólicos litorâneos (Figuras 6 e Foto 9). A estratigrafia é descrita conforme proposta (Klein e Sousa, 2012; Rossetti, 2001) (Quadro 1; Figuras 6 e 8; Foto 9).

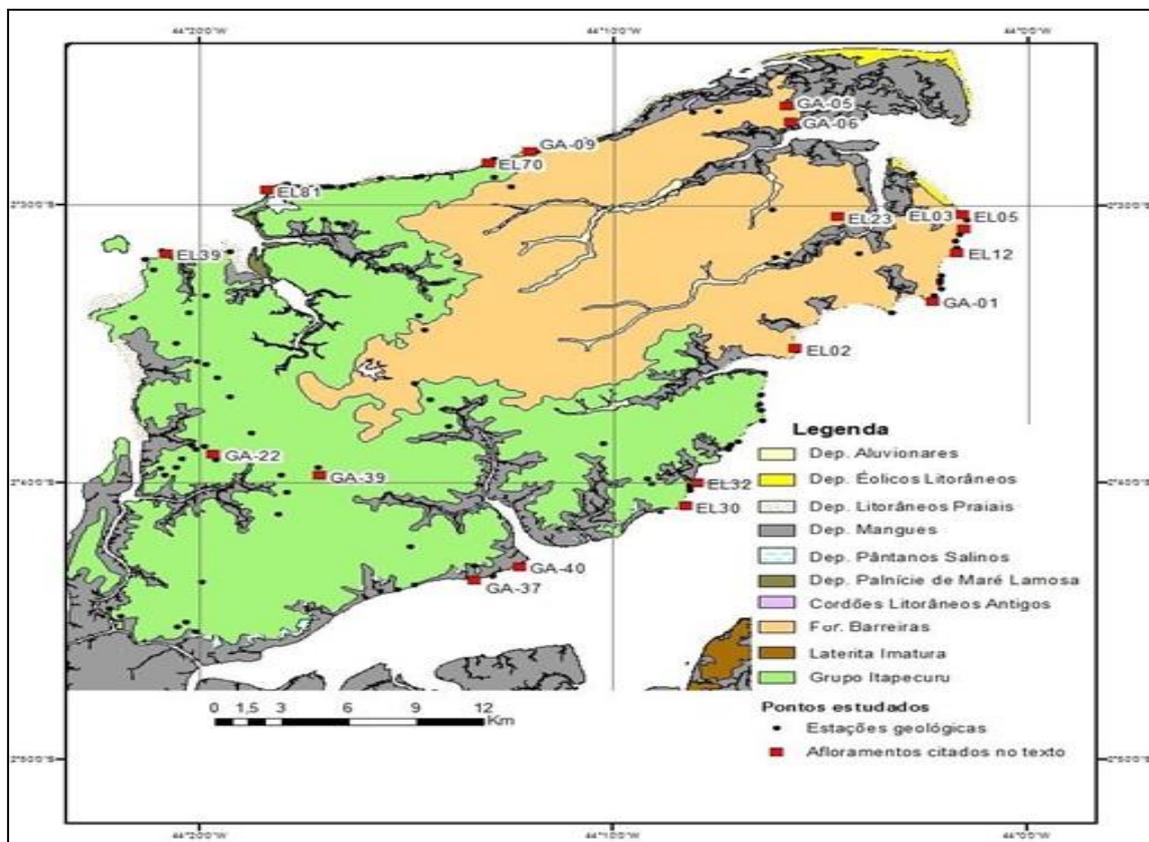
Quadro 1: Coluna estratigráfica da Bacia de São Luís - MA

| Idade | | Estratigrafia | |
|--------------|-------------------------------|--|------------------------|
| QUATERNÁRIO | Pleistoceno /Holoceno | Depósitos Aluvionares Depósitos Mangues Depósitos Eólicos Litorâneos Depósitos Litorâneos Depósitos Quaternários | |
| NEÓGENO | Mioceno Plioceno | GRUPO BARREIRAS | Formação Barreiras |
| | | | Formação Pirabas |
| CRETÁC EO | Cenomaniano Maastrichtiano | GRUPO ITAPECURU | Formação Cujupe |
| | | | Albiano |
| | Neo | | Unidade Indiferenciada |
| | Meso Éon | | |

| | | |
|----------------------------|---------|-------------------------|
| | Aptiano | Formações Codó e Grajaú |
| Pré-Cambriano e Paleozóico | | Embasamento |

Fonte: Adaptado de Klein e Sousa (2012); Rossetti (2001).

Figura 6: Carta geológica da Ilha do Maranhão.



Fonte: CPRM (2017), com adaptações de Martins (2018).

Foto 8: Vista parcial do afloramento dos Grupos Barreiras e Itapecuru – Franja Costeira de São Luís, MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

2.8.1. Grupo Itapecuru

O Grupo Itapecuru é composto litologicamente por arenitos finos a médio, bem selecionados intercalados a argilitos e, subordinadamente, conglomerados. São reconhecidas estruturas sedimentares oriundas da ação de correntes de maré, como estratificação cruzada, acamamento maciço ou deformado, laminação planoparalelas e microlaminação cruzada (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997) (Foto 12).

A exposição desse Grupo é muito restrita. Geralmente, encontra-se nas falésias de Alcântara, com espessura de 20 m, 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.

Com base em descrição detalhada de depósitos de idade Cretácea-Paleogena localizados na região de Alcântara (MA), Bacia de São Luís (ROSSETTI, 1996, 1997), Rossetti e Truckenbrodt (1997) elevaram a Formação Itapecuru à categoria de Grupo, sendo este composto da base para o topo pela Formação Alcântara e Formação Cujupe.

Foto 9: Formação do Grupo Itapecuru – Franja – Farol de São Marcos na Franja Costeira de São Luís, MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

2.8.2.1. Formação Alcântara

A Formação Alcântara é composta por um pacote de aproximadamente 30m de espessura, é constituída por arenito, pelitos e subordinadamente por calcário e conglomerados. Aflora principalmente nas falésias costeiras, como na área de estudo em São Luís (ROSSETTI, 1997) (Foto 13).

As rochas da Formação Alcântara foram originadas por processos de tempestade e, subordinadamente, correntes de maré, em ambientes de shoreface/foreshore, canal de maré e laguna/washover (ROSSETTI, 1997), que caracterizam sistemas de ilhas barreira, associados a vales incisos (ROSSETTI, 2001, 2003).

Foto 10: Vista parcial do afloramento da Formação Alcântara na praia Ponta D'Areia, São Luís, MA.



Fonte: Dados da pesquisa.

2.8.2.2. Formação Cujupe

A unidade é composta litologicamente por arenitos intercalados a argilitos e, subordinadamente, por conglomerados. Corresponde à unidade S3f de Rossetti (2001). Os arenitos são caulíticos, com granulometria fina a muito fina, bem selecionados de coloração branca ou rósea a amarelada. Os argilitos possuem coloração branca, cinza a violácea e os conglomerados são tipo intraformacional, com clastos de argila e matriz arenosa (Foto 14).

A Formação Cujupe, proposta por Rossetti e Truckenbrodt (1997), possui aproximadamente 25m de espessura e tem como área tipo a estrada que liga a rodovia Pinheiro-Alcântara (MA-106) ao Porto do Cujupe (ROSSETTI; TRUCKENBRODT, 1997).

Foto 11: Vista parcial do afloramento da Formação Cujupe na praia de São Marcos, São Luís - MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

2.8.2. 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). Esses sedimentos foram individualizados em três unidades de fácies: conglomerática, arenosa e pelítica, típicas de ambiente continental e que estão intensamente afetadas pelo processo de laterização (Foto 10). A fácies conglomerática forma o pacote que protege a superfície dos tabuleiros.

Conforme Klein e Sousa (2012), os sedimentos da Formação Barreiras passa para a categoria de Grupo Barreiras. Os sedimentos desse grupo afloram, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros. A espessura não excede 30 metros. Esta Formação sobrepõe-se discordantemente a unidades mais antigas do Pré-Cambriano ao Cretáceo.

Foto 12: Vista parcial do afloramento do Grupo Barreiras na praia de São Marcos, São Luís – MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Leite (1997) considera os sedimentos areno-argilosos no Grupo Barreiras indicando idade mesomiocena com base no zoneamento palinoestratigráfico insere-se na zona *crassoretitriletes*.

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 (Foto 11).

Foto 13: Afloramento de laterita do Grupo Barreiras indicado pelas setas – São Luís, MA.



Fonte: Lebac, 2016.

2.8.3. Depósitos Quaternários

As coberturas quaternárias holocênicas na área trabalhada, englobam os depósitos diferenciados em: depósitos de mangues (QHm), depósitos flúvio-marinhos (QHfm), depósitos aluvionares e coluvionares (CPRM, 2012).

Esses depósitos estão localizados próximos ao litoral, geralmente submetidos a 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 (Foto 15).

Foto 14: Vista parcial dos sedimentos de mangue dos Depósitos Quaternários – Franja Costeira de São Luís, MA.



Fonte: Castro, 2016.

2.8.4. Geologia Estrutural

Os sistemas de lineamentos, a partir de Fotointerpretação, indicam direção preferencial NE-SW e NW-SE e menos frequentes nas direções NNE-SSW e WNW-

ENE, nos terrenos cretáceos e neógenos da Bacia de São Luís (RODRIGUES *et al.*, 1994). Esta estruturação está marcada por alinhamentos de drenagem na dos rios da região como Rio Calhau, Pimenta e Claro.

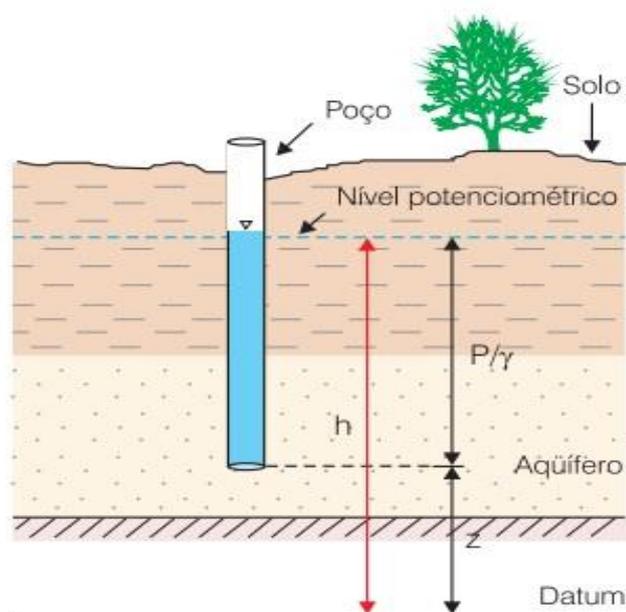
2.9. Hidrogeologia

A hidrogeologia da área de estudo caracteriza-se principalmente por dois aquíferos, o primeiro é dos sedimentos cretáceos do Grupo Itapecuru, que apresenta comportamento de semi-confinado, enquanto o segundo apresenta-se como aquífero livre, constituído por níveis arenosos do Grupo Barreiras do Neógeno.

Na área de estudo, os sedimentos do Grupo Barreiras são caracterizados como aquífero livre. Conforme Azevedo e Albuquerque Filho (1998) o aquífero livre é constituído por materiais ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação, o nível de água subterrânea está submetido a pressão atmosférica sendo denominado aquífero freático ou livre.

Quando um aquífero é livre, a carga na superfície freática corresponde ao próprio nível da água, e no caso de aquíferos confinados a carga no topo da camada é dada pela carga de pressão que corresponde à altura até onde o nível da água se elevará, acima do topo do aquífero, quando perfurado um poço no local (Figura 7).

Figura 7: Carga hidráulica em um ponto do aquífero expressa pelo nível piezométrico



Fonte: Feitosa *et al* (2008).

Foram elaborados três perfis litológicos (perfil A-B, C-D e E-F), para descrever a geometria dos aquíferos da área de estudo, utilizando-se um total de 26 (vinte e seis) poços tubulares (Figuras 8, 9, 10 e 11).

Na área de estudo, o aquífero livre Barreiras é encontrado nos poços P25-01, P30-04, P07, P08, P13, P27 e P33, onde possuem um NA entre 4 a 6 metros, com cotas altimétricas de 10 a 13 m. O aquífero Barreiras do período Neógeno na área de estudo é representado por arenitos clásticos cremes, amarelados e arroxeados reunindo arenitos finos a conglomeráticos, mal selecionados, friáveis, angulosos, com nível de lateritas ocasionalmente. Ocorrem nos tabuleiros e colinas com altitudes aproximadas de 15 a 45 metros na área enfocada. E o contato com a Formação Cujupe do Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa.

O aquífero Itapecuru é formado por sequências cíclicas variáveis de argila e areia. A recarga desse aquífero é realizada principalmente, através da infiltração das precipitações pluviométricas e pelos rios presentes na área. O nível de variação média de profundidade das águas (nível dinâmico e nível estático) é da ordem de 9m e a vazão específica média é de 2,94m³/h/m, verificando-se um valor máximo de 21,5 m³/h/m e mínimo de 1,4m³/h/m (RODRIGUES *et al.* 1994).

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.

Foram realizados testes de comportamento do aquífero em dois poços próximo a área de estudo, na área do Terminal da Ponta da Madeira, e a partir do teste de bombeamento de poços tubulares da VALE, com profundidade em média de 149m, variando de 128m a profundidade mínima e 170metros a profundidade máxima indicando uma permeabilidade (K) de $1,4 \times 10^{-3}$ m/s (0,91 a 3,89 m/d), caudal específico 1,28-4,51 m²/h e coeficiente de armazenamento (S) de 1,5-3,0 X 10⁻³ (PEREIRA, 2017) (Tabela 1; Gráficos 2, 3 e 4).

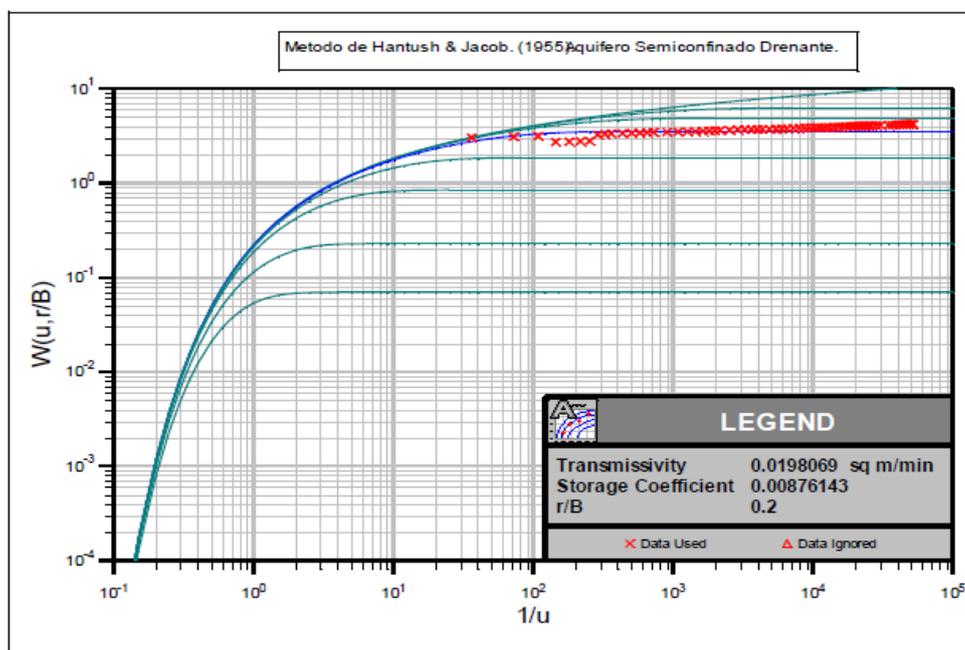
As características hidrodinâmicas do poço P22-02 que está inserido na área de estudo indicaram a partir dos dados de bombeamento como aquífero semi-confinado drenante, com uma condutividade hidráulica (K) de 0,078 m/dia, transmissividade (T)

de $0,000972 \text{ m}^2/\text{min} = 6,7 \text{ m}^2/\text{dia}$ e coeficiente de armazenamento (S) de $S = 5,9 \cdot 10^{-3}$. A condutividade hidráulica indicou valor de $0,078 \text{ m}/\text{dia}$. (Tabela 1; gráficos 2, 3 e 4). Observa-se que o comportamento hidrodinâmico do aquífero Itapecuru se encontra relativamente similar ao P-02 e ao poço da CAEMA.

Tabela 1: Parâmetros Hidrodinâmicos dos Poços Tubulares no aquífero Itapecuru

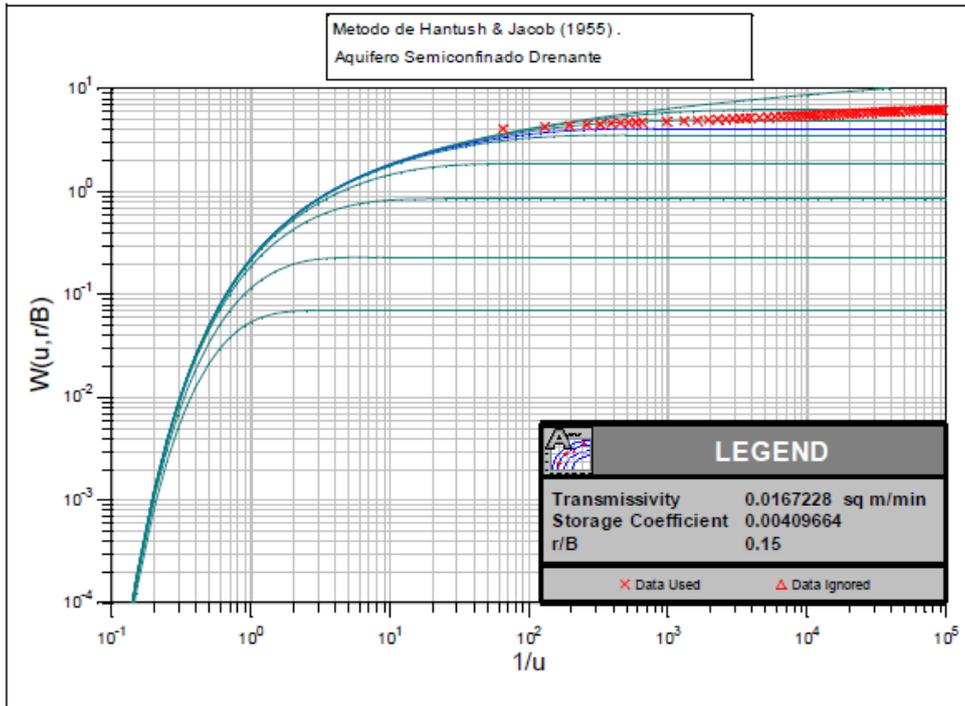
| PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS | P-01 | P-07 | P-02 | CAEMA |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Transmissividade (T) m ² /dia | 28,5 | 24,1 | 1,25 | 7 |
| Coeficiente de Armazenamento (S) | $8,8 \times 10^{-3}$ | $4,1 \times 10^{-3}$ | $5,9 \times 10^{-3}$ | $1,5-3 \times 10^{-3}$ |
| Condutividade hidráulica (K) m/dia | 0,94 | 0,94 | 0,078 | 1,4 |
| Propriedade | VALE | VALE | Costa Atlântico | CAEMA |
| Fontes | SFADU, 2013 | SFADU,2013 | PEREIRA, 2017. | CAEMA, 2017. |

Gráfico 3: Poço Tubular P-01 VALE. São Luís – MA.



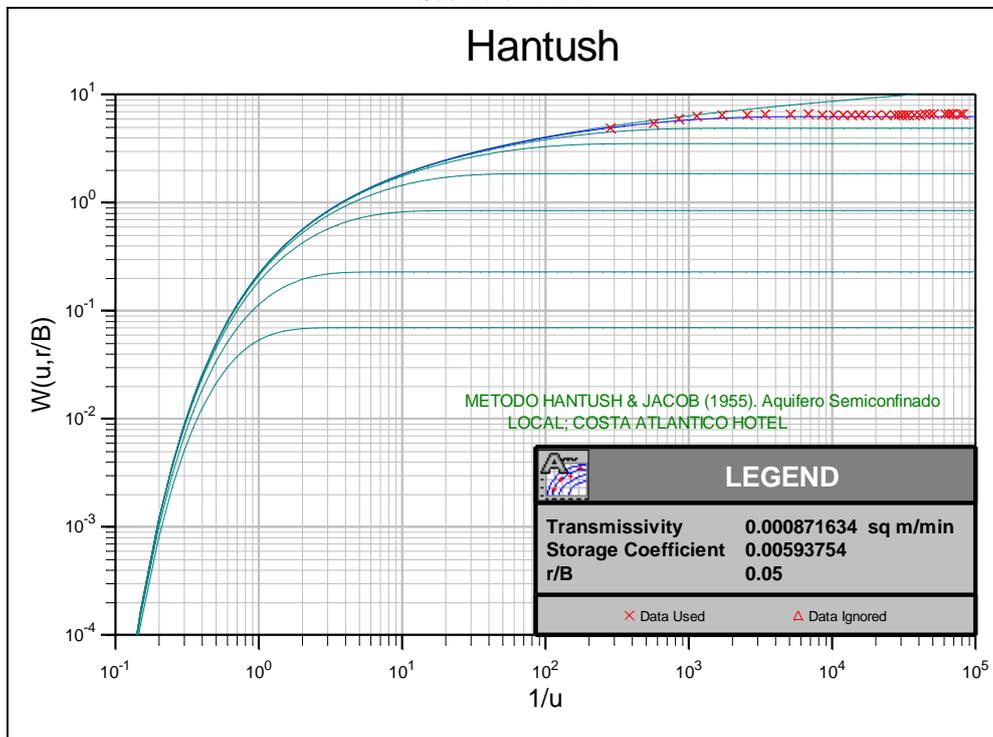
Fonte: PEREIRA, 2017.

Gráfico 4: Poço Tubular P-7 VALE. São Luís – MA.



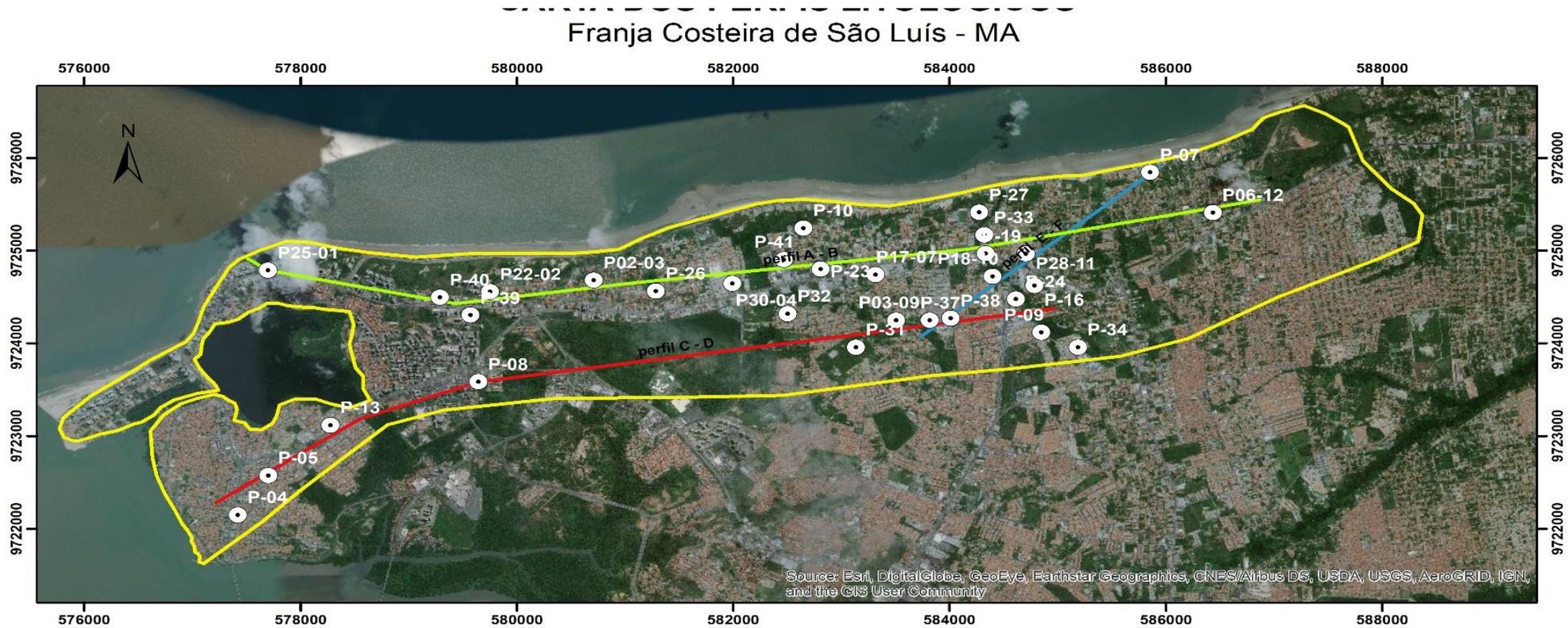
Fonte: PEREIRA, 2017.

Gráfico 5: Poço Tubular P-02
São Luís – MA.



Fonte: Dados da pesquisa, 2018.

Figura 8: Carta dos perfis litológicos - Franja Costeira - São Luís - MA



| | | |
|--|---|--|
| <p>⊙ Poços</p> <p>Perfil topográfico</p> <p>— perfil A - B</p> <p>— perfil C - D</p> <p>— perfil E - F</p> <p>▭ Delimitação da área de estudo</p> | <p>1:50.000</p> <p>1,5 0,75 0 1,5 km</p> <p>Projeção Universal Transversa de Mercator Datum de Origem SIRGAS 2000 Zona 23 M</p> <p>Fonte: TOPODATA, 2009; DSG, 1983. Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.</p> | <p style="text-align: center;">Situação geográfica</p> <p style="text-align: center;">1:30.000.000 1:1.250.000</p> |
|--|---|--|

Figura 9: Perfil litológico A - B dos poços na franja costeira de São Luís – MA

PERFIL LITOLÓGICO A - B

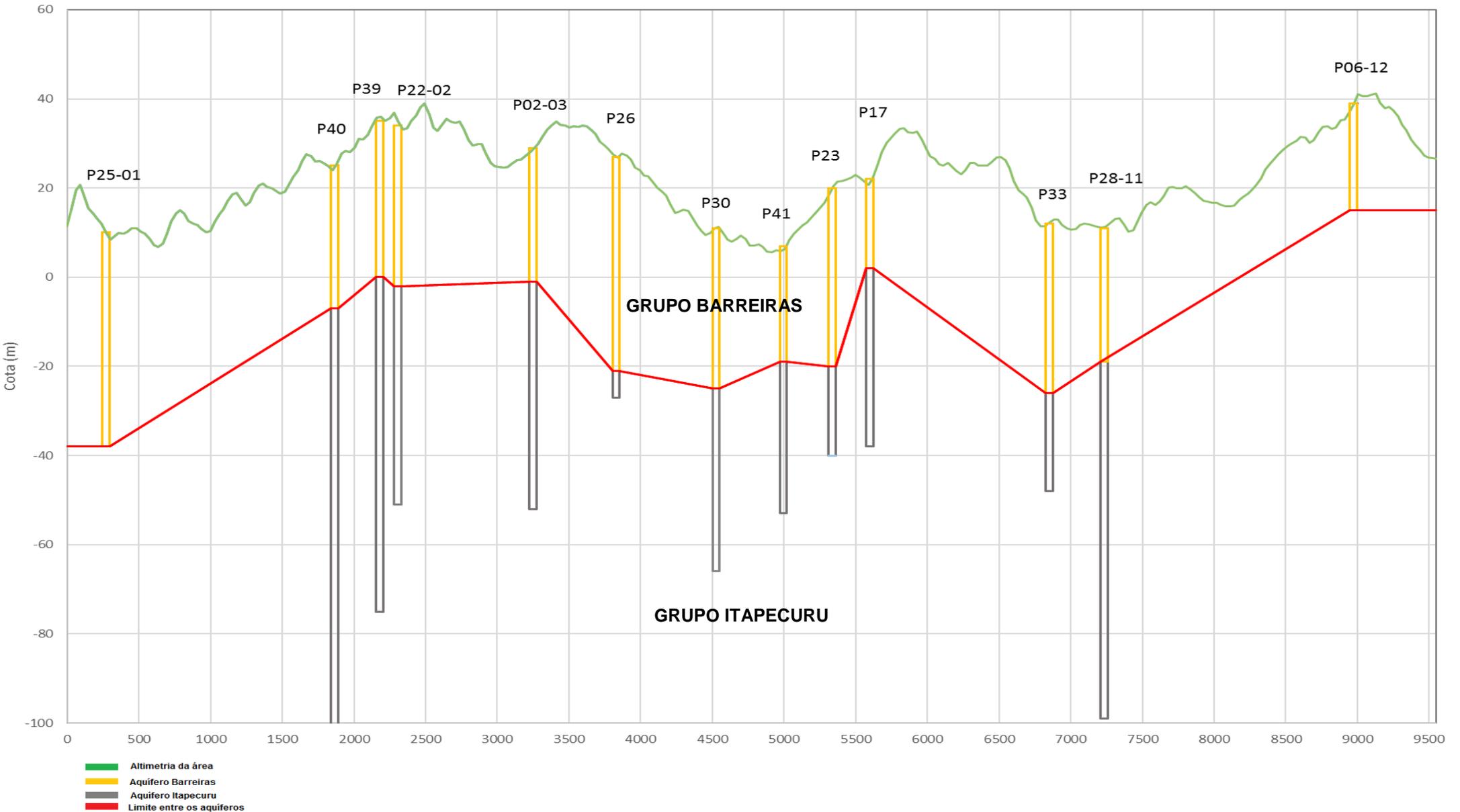


Figura 10: Perfil litológico C - D Figura 17: Perfil litológico C -D dos poços na franja costeira de São Luís – MA

PERFIL LITOLÓGICO C - D

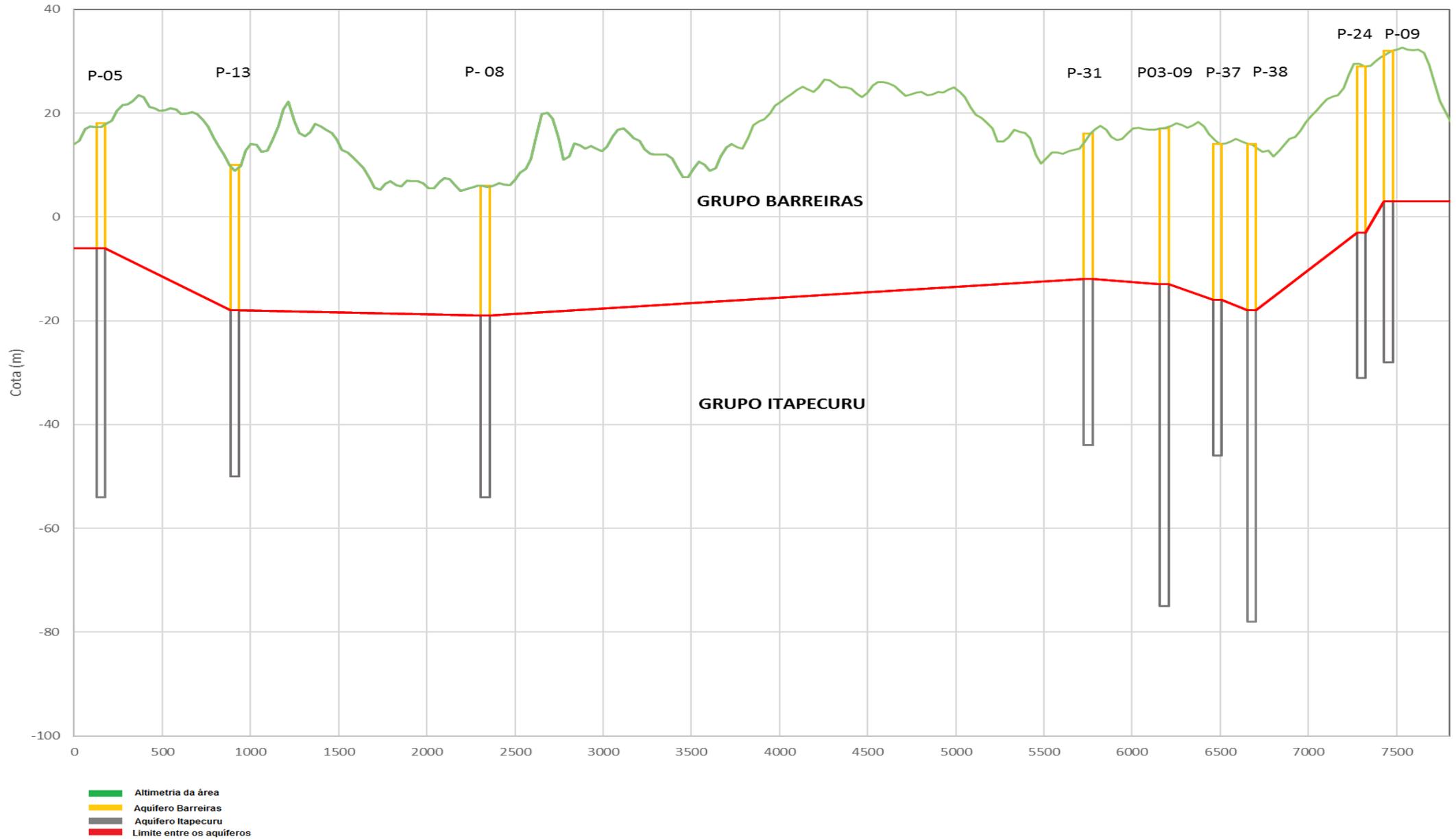
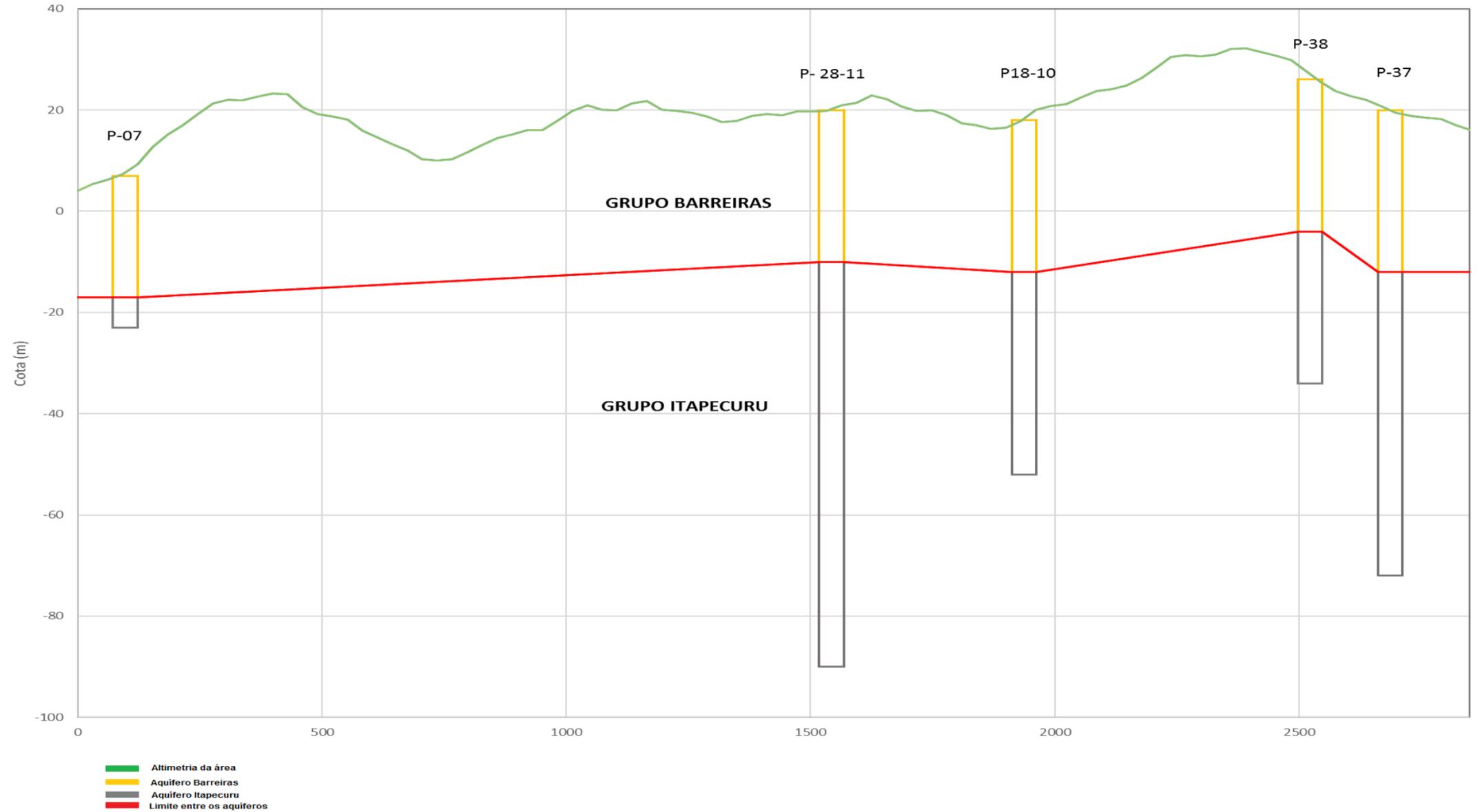


Figura 11: Perfil litológico E - F dos poços na franja costeira de São Luís – MA

PERFIL LITOLÓGICO E - F



2.10. Comportamento dos aquíferos sob influência do efeito-maré

As variações do nível do mar, que repercutem nos aquíferos costeiros, ocorrem devido às marés oceânicas ou marés astronômicas, causadas pelo efeito das forças gravitacionais que o Sol e a Lua exercem sobre a Terra. Existem alguns outros tipos de causas de oscilações dos níveis de água subterrânea e da interface entre águas doces e salgadas, dentre estes as marés meteorológicas, originadas por variações na pressão atmosférica, devido à aproximação de sistemas frontais. Estas têm caráter totalmente aleatório, dificultando o estudo de sua influência na interação hidrodinâmica entre águas subterrâneas e água do mar. Vibrações, variações de temperatura, recarga ao aquífero e outros fatores também podem provocar oscilações do nível d'água e prejudicar a interpretação do fenômeno (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

As flutuações de maré constituem fenômenos de grande importância hidrogeológica em ambientes costeiros, haja vista que a interação dos aquíferos com corpos hídricos superficiais sujeitos a oscilação de marés gera variações nos níveis da água subterrâneas, originando diversos problemas de hidrologia costeira, engenharia ou meio ambiente (DINIZ; ARRAES; FEITOSA, 2012, p. 2).

O alcance da zona de influência marinha nos aquíferos está condicionado a alguns fatores como a condutividade hidráulica destes e a amplitude local de oscilação das marés. O meio poroso funciona como atenuante das oscilações de maré fazendo com que sua influência seja minimizada com o aumento da distância ao corpo hídrico. Aquíferos livres sofrem grande atenuação e oscilações significativas são improváveis a partir de 30 metros de distância do corpo hídrico superficial. Enquanto os aquíferos confinados tendem a apresentar baixa atenuação, e flutuações no nível potenciométrico podem ser observadas a centenas de metros a partir do corpo hídrico superficial (JIAO; TANG, 1999).

3. CAPÍTULO: CONCEITOS E FUNDAMENTOS

3.1. O Estudo dos Recursos Hídricos em uma Perspectiva Geossistêmica

O presente estudo aborda reflexões sobre o estudo geossistêmico, sendo este um método de análise aplicado dentro da Geografia física, proporcionando a ciência geográfica uma aproximação entre os aspectos físicos naturais com os aspectos sociais e econômicos através de uma análise holística e integrada do espaço geográfico.

Para a efetivação dos argumentos apresentados utiliza-se uma importante base teórica, evidenciada em autores que refletem conceitualmente sobre o Geossistema, Bertalanfy (1975), Chistofolletti (1999), Sotchava (1962), Tricart (1977), Troppmair (1985), Capra (2000), Lima (2012).

O conceito de geossistema permite à geografia avaliar a organização espacial levando em conta os componentes do quadro natural e sua funcionalidade. A interferência das atividades antrópicas sobre o ordenamento e operação das unidades geossistêmicas é indiscutível, logo, deve-se levar em conta as contribuições oriundas dos fatores sociais e econômicos, na determinação das sub-unidades que compõem o geossistema (CORRÊA, 2006, p.86).

Para Troppmair e Galina (2006, p.81), em todo Geossistema circula energia e matéria. Como fontes de energia podemos citar: (...) a energia hidráulica responsável pelos processos erosivos, transporte e deposição de sedimentos; e energia animal e humana pelo emprego da força muscular.

É inegável que o homem a cada tempo que passa transforma, altera e modifica o meio do qual é integrante. Da mesma forma que o homem modifica e altera a natureza, os fenômenos naturais acabam por impactar positivamente ou negativamente a sociedade e suas organizações, sobretudo pela própria dinâmica que o homem provoca, ocasionando situações desconfortáveis pelas alterações ou intensificações dos processos naturais (BELIZÁRIO, 2014, p.10).

O conhecimento do comportamento hidrológico é um importante passo que deve preceder o planejamento do uso e ocupação das áreas costeiras. Embora seja controlada principalmente pelas forças climáticas, pedológicas e geomorfológicas, a dinâmica hidrológica pode sofrer significativas alterações resultantes da ação antrópica, uma vez

que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico.

As análises ambientais envolvendo as áreas de recarga e descarga dos aquíferos integram as análises geossistêmicas envolvendo os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, importantes na gestão sustentável do uso da água e do solo.

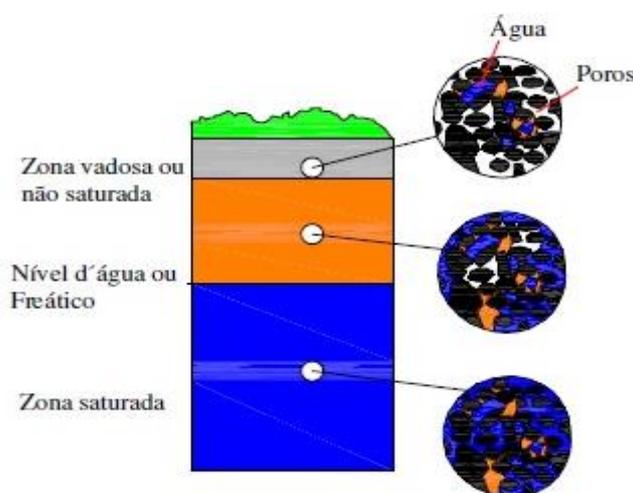
3.2. Dinâmica das Águas

A água penetra no solo definindo as zonas não saturada e saturada, dependendo do preenchimento dos poros. As características das zonas dependem da quantidade relativa de cada componente do solo, refletido nas propriedades geotécnicas dos materiais e capaz de desencadear processos e problemas ambientais.

3.2.1. Distribuição e movimento da água no subsolo

A água, quando penetra no solo, sofre a ação da força gravitacional e depende das características do solo, sedimentos ou rochas, sendo o seu movimento controlado pelas forças de atração entre as moléculas e a tensão superficial. O limite inferior de percolação das águas é dado quando as rochas não admitem mais espaços abertos (poros) devido à pressão da pilha da rocha sobrejacente, formando o nível de água subterrânea (NA) ou superfície freática (Figura 12).

Figura 12: Distribuição de água no subsolo.



Fonte: Karmann, 2001.

O nível estático (NE) é a profundidade do nível da água dentro do poço quando ele não está sendo bombeado por um período considerável. O nível dinâmico (ND) é medido quando o poço está em bombeamento, o rebaixamento (sw) é a diferença entre o nível dinâmico e o estático, ou seja, o quanto o nível da água rebaixou dentro do poço, durante o bombeamento. Medido geralmente em metros (m) (CPRM, 1998).

3.2.2. *Fatores que facilitam ou retardam o movimento das águas*

Para Pereira (2006, p.29), o perfil do solo é formado por camadas ou horizontes distintos com características hidráulicas e físicas específicas. As diferentes camadas do solo facilitam ou retardam o movimento de água durante a infiltração. As camadas de argila impedem o fluxo devido a sua baixa condutividade hidráulica, enquanto as camadas de areia têm uma tendência de facilitar o movimento de água, devido ao tamanho dos poros e ao elevado gradiente hidráulico.

A cobertura vegetal tende a aumentar a infiltração, retardando o fluxo de escoamento superficial e permitindo um tempo maior para infiltração da água. As raízes das plantas também podem favorecer a infiltração aumentando a condutividade hidráulica da superfície do solo. Devido a esses efeitos, a infiltração pode variar amplamente sob diferentes tipos de vegetação. A manutenção da cobertura vegetal aumenta a macroporosidade, pois o sistema radicular das plantas cria caminhos preferenciais que favorecem o movimento da água e protegem os agregados do impacto direto das gotas de chuva (PEREIRA, 2006, p.29,).

O uso do solo pode acelerar ou retardar as taxas de infiltração. As áreas urbanizadas apresentam maiores taxas de impermeabilização da superfície do solo, o que limita sua capacidade de infiltração. Entretanto, em áreas de cultivo, o solo, geralmente, tende a aumentar a capacidade de infiltração em razão da quebra da estrutura da camada superficial.

3.2.3. *Zona Não-Saturada ou Vadosa*

O processo de infiltração inicia-se quando a água da chuva ou de irrigação atinge a superfície terrestre. A infiltrabilidade do solo é a máxima razão na qual a chuva ou

água de irrigação podem ser absorvidas pelo subsolo sob determinada condição. O conhecimento das taxas de infiltrabilidade possibilita estimar a quantidade de água disponível para infiltração e escoamento em uma determinada área.

Um evento chuvoso apresenta altura pluviométrica que exprime a quantidade de chuva pela altura de água caída (h) e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. A altura pluviométrica ou total é expressa em mm que significa 1litro/m², podendo ser mensurada em totais anual, mensal, diário e horário (PEREIRA, 2006, p.28).

Durante a infiltração, forças capilares ou matriciais são dominantes no solo; na redistribuição dessa água, as forças capilares e gravitacionais são importantes e simultaneamente, ocorre a drenagem, em cuja fase se dá o molhamento. No estágio final, a percolação profunda ou recarga ocorre quando a frente de molhamento atinge o nível de água (NA).

3.2.4. Zona Saturada

O movimento da água subterrânea é guiado pela diferença de pressão entre dois pontos, exercida pela coluna de água sobrejacente aos pontos, e pelas rochas adjacentes, denominada de potencial hidráulico, promovendo o movimento da água subterrânea do ponto de alto (tabuleiros) para baixo potencial (fundo de vales). A união de pontos com o mesmo potencial hidráulico em subsuperfície define as linhas equipotenciais do aquífero. A linha de fluxo segue o caminho mais curto entre dois potenciais diferentes, num traçado perpendicular às linhas equipotenciais (KARMANN, 2001; FETTER, 2001; CEDERGREN, 1989).

As unidades rochosas ou sedimentos, porosos e permeáveis, que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea passível de ser explorada pela sociedade, são chamadas de aquíferos, conforme Manoel Filho (1997), Azevedo e Albuquerque Filho (1998), Karmann (2001).

Os aquíferos livres são constituídos por materiais ou rochas que armazenam água e permitem sua circulação, o nível de água subterrânea está submetido a pressão atmosférica sendo denominado aquífero freático ou livre. Na área de estudo, os sedimentos da Formação Barreiras são caracterizados como aquífero livre, Azevedo e Albuquerque Filho (1998).

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.

3.2.5. *Lei de Darcy*

Na dinâmica dos fluidos e hidrologia, a lei de Darcy é uma equação que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso. A lei foi formulada por Henry Darcy com base nos resultados de experimentos, publicado em 1856 sobre o fluxo de água através de leitos de areia.

A permeabilidade dos corpos consiste em uma propriedade dos corpos de permitirem, com maior ou menor facilidade, o escoamento de água através dos seus poros. Já a permeabilidade dos solos consiste, basicamente, em medir a velocidade de percolação da água em uma determinada amostra, considerando-se em escoamento laminar.

Obteve-se como observação que a vazão do escoamento apresentava as seguintes características:

- A vazão era proporcional à diferença de cargas hidráulicas ($h_1 - h_2 = \Delta h$)
- Era inversamente proporcional à distância (L) entre os piezômetros 1 e 2

Sendo representada a Lei de Darcy da seguinte maneira:

$$Q = K (h_1 - h_2) / L$$

A partir de então, foi possível o estudo de outros parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos (Quadro 2), Porosidade, Carga Hidráulica, Condutividade Hidráulica (K), Transmissividade (T) e Coeficiente de Armazenamento (S). Estes conceitos são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Parâmetros fundamentais para estudo dos aquíferos.

| Parâmetro | Descrição | Fórmula |
|------------------------------|--|--|
| 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 fissuras em rochas cristalinas (principalmente Ígneas e Metamórficas) e o aquífero cárstico, no caso da dissolução de rochas carbonáticas. | $n = V_v/V$ <p>n= porosidade total; V_v=volume de vazios; V= volume total</p> |
| 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. No caso das águas subterrâneas, devido à reduzida velocidade de fluxo, o termo relativo à energia cinética é desprezado, sendo apenas composto pela energia potencial gravitacional e a energia de pressão. | $h = z + P / \gamma$ <p>h = carga hidráulica z = a cota do ponto onde é feita a medição P = pressão nesse ponto γ = peso específico da água</p> |
| 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 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. | $K = Q / (A * i)$ <p>K=Condutividade Hidráulica; Q= Vazão; A= Área perpendicular à direção de escoamento da vazão; I= Gradiente hidráulico</p> |
| Transmissividade (T) | A Transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda | $T = K * b$ <p>K=Condutividade</p> |

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| | a espessura saturada do aquífero. | Hidráulica; T= Trasmisividade; b= Espessura do Aquífero |
| Coeficiente de Armazenamento (S) | É a capacidade de o aquífero armazenar e transmitir água, dependendo das propriedades do meio poroso. Corresponde ao volume de água liberado pela coluna de seção unitária de um aquífero sujeito a um decréscimo unitário de carga hidráulica. | |

Fonte: Adaptado de Rodrigues et al (1984); Feitosa et al (2008), p. 79-87.

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 4).

Tabela 2: Valores de Condutividade hidráulica (K) e porosidade total (n) em diferentes materiais.

| Material | Condutividade hidráulica (m/s) | Porosidade total n (%) |
|---|---|--------------------------|
| Rochas sedimentares inconsolidadas | | |
| Cascalho | $10^{-4} - 1$ | 25-50 |
| Areia bem selecionada | $10^{-5} - 10^{-3}$ | 20-35 |
| Silte arenoso, areia fina | $10^{-7} - 10^{-5}$ | 10-20 |
| Silte, Areia Siltica, Argila arenosa | $10^{-8} - 10^{-6}$ | 35-50 |
| Argila | $10^{-11} - 10^{-8}$ | 33-60 |
| Rochas sedimentares consolidadas | | |
| 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 | $8 \times 10^{-9} - 10 \times 10^{-4}$ | 0,1 |
| Basalto | $2 \times 10^{-11} - 10 \times 10^{-7}$ | 3-35 |

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

Fonte: Adaptado de Fetter (1988).

3.3. Métodos de avaliação da Vulnerabilidade de Aquífero

Os métodos para determinação da vulnerabilidade de um aquífero utilizam, em geral, parâmetros hidrogeológicos e morfológicos do meio físico, por vezes de difícil aquisição. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem de eliminar ou minimizar a subjetividade inerente aos processos de avaliação. Os métodos de caracterização da vulnerabilidade mais utilizados são GOD, DRASTIC e GALDIT.

3.3.1. Método GOD

O método GOD (Groundwater occurrence, Overall lithology of the unsaturated zone, Depth to the water table), desenvolvido por Foster e Hirata (1988) e aperfeiçoado por Foster *et al.* (2002) utiliza informações frequentemente acessíveis em países em desenvolvimento. A vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero é uma característica intrínseca dos estratos geológicos que separa a zona saturada da não saturada, a qual determina a sua sensibilidade para ser afetada por uma carga contaminante adversa. Podendo depender da acessibilidade da zona saturada para a penetração do poluente e da capacidade de atenuação dos estratos geológicos da zona não saturada ou vadosa, através da retenção físico-química ou da reação dos poluentes, (FOSTER; VENTURA; HIRATA, 1987).

Conforme (FOSTER *et al.*, 2002) o grau de atenuação do contaminante pode variar significativamente dependendo do tipo do contaminante, sendo mais consistente avaliar a vulnerabilidade natural à poluição para um poluente ou uma classe específica (nutrientes, patogêneses, microorganismos, metais pesados e outros) ou para uma atividade fonte de poluente (esgoto sanitário, agricultura, disposição de efluentes industriais).

O mapeamento da vulnerabilidade baseada em índices absolutos é muito utilizado para o planejamento do uso do solo e controle de descarga de efluentes. Os índices absolutos são claramente definidos para as classes de vulnerabilidade (Tabela 5).

Tabela 3: Classes de vulnerabilidade de contaminação de aquífero.

| CLASSES DE VULNERABILIDADE | DEFINIÇÃO |
|----------------------------|---|
| Extrema | Vulnerável à maioria dos poluentes da água com rápido impacto em muitos cenários de poluição. |
| Alto | Vulnerável a vários poluentes (exceção para os fortemente absorvidos) em muitos cenários de poluição. |
| Moderado | Vulnerável a alguns poluentes porém somente quando continuamente descartado ou em situação de vazamento. |
| Baixa | Somente vulnerável a poluentes conservativo (baixa mobilidade) quando continuamente e largamente descartados ou em situação de vazamento. |
| Desprezível | Presente em camadas confinadas com insignificante fluxo subterrâneo vertical. |

Fonte: (FOSTER et al., 2002).

O método utiliza os seguintes parâmetros:

G = ocorrência de água subterrânea, indicação do tipo de confinamento do aquífero, com índice que varia de 0 – 1.

O = características litológicas da zona vadosa em termos de grau de consolidação (presença e ausência de fissura) e tipo de litologia (porosidade, permeabilidade, umidade da zona não saturada, ou especificar a retenção), que determinem a capacidade de atenuação do contaminante. O índice varia de 0,4 – 1,0.

D = estimativa da profundidade do aquífero confinado ou não confinado. Este índice varia de 0,4 – 1,0. Finalmente, têm-se os índices de vulnerabilidade, que são obtidos pela integração desses dados, geralmente empregando Sistema de Informação Geográfica – SIG ou superposição de mapas.

As dificuldades mais frequentes na aplicação da metodologia proposta para a avaliação da vulnerabilidade, conforme (FOSTER; HIRATA, 1991) (FOSTER *et al.*, 2002), são as seguintes:

- A presença de estratos de cobertura do aquífero com grandes diferenças de permeabilidade;
- Incertezas na avaliação na capacidade de atenuação do leito dos canais perenes e intermitentes;
- Exploração excessiva do aquífero para suprimento de água, podendo causar rebaixamento do nível de água subterrâneo e afetar o grau de confinamento do aquífero;

- Camadas de argilas compactadas ou potencialmente fraturadas para as quais as componentes principais de direção de fluxos preferenciais são incertas;
- Não utiliza dados de recarga do aquífero;

Os mapas de vulnerabilidade devem ser interpretados em termos relativos, pois a princípio todos os aquíferos são vulneráveis a contaminantes. Adicionalmente, os aquíferos que seriam considerados como de baixa vulnerabilidade natural à contaminação, em termos gerais, tendem a ser os mais difíceis de remediar uma vez contaminados (FOSTER; HIRATA, 1991).

3.3.2. 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 parâmetros de profundidade, recarga de aquífero, material do aquífero, solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica.

O método DRASTIC foi desenvolvido a partir dos seguintes pressupostos (ALLER *et al.*, 1987):

- O contaminante é introduzido à superfície do terreno;
- O contaminante é transportado verticalmente até ao aquífero pela água de infiltração;
- O contaminante tem a mobilidade da água;
- A área mínima avaliada pelo DRASTIC é de 0,4 km² (100 acres).

O índice DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de 7 valores correspondentes aos seguintes parâmetros hidrogeológicos (ALLER *et al.*, 1987):

- D - Profundidade do Topo do Aquífero,
- R - Recarga do Aquífero,
- A - Material do Aquífero,
- S - Tipo de Solo,
- T - Topografia,
- I - Influência da Zona Vadosa,
- C - Condutividade Hidráulica do Aquífero.

3.3.3. Método GALDIT

O método empregado na pesquisa foi o GALDIT do seu acrónimo em inglês (Ground water occurrence (tipo de aquífero); Aquifer hydraulic conductivity (condutividade hidráulica do aquífero); Level above the sea (nível piezométrico); Distance from the shore (Distância à linha de costa); Impact of existing status of sea water intrusion in the area (Impacto do estado atual da intrusão marinha na região); e Thickness of the aquifer (espessura do aquífero), conforme (CHACHADI e FERREIRA, 2001).

O método GALDIT foi desenvolvido por Chachadi e Ferreira (2001) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade à intrusão marinha das regiões costeiras de clima tropical da Índia, no âmbito do projeto COASTIN. Embora tenha sido criado considerando condições particulares do litoral indiano, uma vez que incorpora aspectos universais do funcionamento dos aquíferos costeiros, a sua aplicação é possível em qualquer região costeira (FERREIRA *et al.*, 2011). Posteriormente, o método foi modificado pelos autores, sendo utilizada neste trabalho a versão descrita em Chachadi e Ferreira (2007)

O método GALDIT para a determinação da vulnerabilidade à intrusão marinha foi aplicado com sucesso em vários pontos do globo. É exemplo a aplicação no Brasil nos seguintes pontos: Na bacia hidrográfica do Pindaré- Mirim (PEREIRA *et al.*, 2011) e na bacia hidrográfica do Paciência na cidade de São Luís no estado do Maranhão (PEREIRA *et al.*, 2017); na cidade de Fortaleza, no estado do Ceará (ANDRADE *et al.*, 2011) e na zona costeira da cidade de Recife no estado de Pernambuco (SOBRINHO *et al.*, 2015).

No contexto internacional o método foi aplicado no âmbito do projecto CIAS, na zona de costa da Guiné-Bissau (TERCEIRO; FERREIRA, 2010); foi aplicado também na zona costeira de Goa, mais propriamente em Bardez Taluk (CHACHADI; FERREIRA, 2005); na região de Astanéh-Koochesfahan no Iran (MOGHADDAM *et al.*, 2015) e no nordeste da Argélia na planície de Collo (MAHREZ *et al.*, 2018).

Para além da aplicação a fim de se perceber o estado atual de vulnerabilidade, foi também aplicado ao método o conceito de subida do nível do mar, que não foi adotado na presente pesquisa, porém, foi aplicado no relatório de caracterização da

vulnerabilidade à intrusão marinha dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro em Portugal (LNEC, 2011) e no sul de Portugal para os esteiros do rio Guadiana, na zona de Monte Gordo, onde foram implementados cenários de subida do mar e analisadas as variações da vulnerabilidade à intrusão marinha (FERREIRA et al., 2005).

4. CAPÍTULO: MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

Neste item é apresentada a descrição dos materiais e procedimentos utilizados, além das etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho, para melhor identificação das condições geológico-geotécnicas, de modo a possibilitar a caracterização do meio físico na área estudada. O método científico que se fará uso é o hipotético-indutivo, que parte da observação e experimentação, tendo sua origem no problema, no qual procura soluções por meio de tentativas, hipóteses e teoria.

4.1. Materiais utilizados e procedimentos

A realização dessa pesquisa contou com a utilização de materiais cartográficos, fotointerpretação, trabalhos de campo, análise laboratorial, ensaio *in situ*, elaboração de cartas temáticas utilizando o método do detalhamento progressivo e de uma avaliação da vulnerabilidade natural empregando o método GALDIT para área da Franja Costeira de São Luís e entorno.

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 termos de outorgas com dados hidrogeológicos dos poços tubulares fornecidos pelo banco de dados da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Naturais – SEMA.

4.2. Principais fontes de pesquisa bibliográficas

Os procedimentos metodológicos para o estudo do problema constaram de levantamento e análise de materiais relacionados com a pesquisa (livros, dissertações, teses, documentos, relatórios, mapas, imagens de satélite, artigos etc.) nos mais diversos órgãos de pesquisa (LNEC, CAEMA, SAAE, SEMA, LABOHIDRO, UFMA, UEMA,

IBGE, CPRM). Sendo este material selecionado de importância para o desenvolvimento das fases da pesquisa e para comparação entre os resultados apresentados.

4.3. Trabalhos de campo

Para a realização desta pesquisa, foram necessários os trabalhos de campo para a caracterização e reconhecimento da área estudada com registro fotográfico. Posteriormente foram realizados novos trabalhos de campo para a coleta de água em poços tubulares na área de estudo, para as análises físico-químicas das águas subterrâneas.

4.4. Material cartográfico e aerofotos utilizados

Neste trabalho, foram utilizados no ambiente SIG, o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo e cartas planialtimétricas DSG das Folhas 6 a 15 (DSG, 1980) disponibilizadas no *site* ZEE MA.

Para o desenvolvimento desse estudo foram usados parâmetros constantes nas literaturas que tratam do assunto e, depois foram realizadas as adaptações através da aplicação de técnicas de geoprocessamento envolvendo sistemas de informações geográficas (SIGs) e modelagem digital de elevação, utilizando-se o ArcGis 10.4.

O objetivo desse procedimento foi limitar o tempo do processamento computacional na geração das informações em *raster* necessárias para o MDE, declividade do terreno e da rede de drenagem.

O levantamento da rede de drenagem foi efetuado através da interpretação da imagem de satélite, considerando todos os canais de drenagens existentes, a fim de hierarquizá-los com o emprego da metodologia sugerida Strahler (1964). A fotointerpretação foi realizada com o auxílio de uma imagem *Pleiade* de alta resolução do ano de 2014 para a elaboração da carta de drenagem.

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

Os dados físico-químicos da água dos poços tubulares são necessários para a classificação do parâmetro I.

Como forma de análise preliminar, usou-se os dados físico-químicos dos poços (Tabela 7, subseção 5.1.6), disponíveis nos Termos de Outorgas disponibilizados pela Secretária Estadual de Meio Ambiente do Estado do Maranhão.

Na segunda fase do trabalho, foram coletadas as amostras de água dos poços tubulares (Tabela 8, subseção 5.1.6) na área de estudo e posteriormente foram encaminhadas ao Laboratório de Alimentos e Água - PCQA / CAMPUS – UFMA, foram analisados os teores de cloretos e carbonatos, que indicaram teores nas águas subterrâneas proporcionado um maior esclarecimento sobre o comportamento do fenômeno de penetração da cunha marinha e o comportamento do aquífero frente à amplitude de maré juntamente com os demais compostos inorgânicos presentes na rocha e na água subterrânea.

4.6. Análise do perfil litológico e determinação dos dados hidrodinâmicos

Foram elaborados três perfis (Figuras 9, 10 e 11, seção 2.9) do substrato geológico através da análise dos dados da planilha da coluna estratigráfica de 32 (trinta e dois) poços tubulares de propriedades privadas que forneceram a indicação das características litológicas e hidrodinâmicas dos aquíferos Itapecuru e Barreiras e sua espessura ao longo da Franja Costeira de São Luís.

4.7. Aferição do Nível Estático dos Poços (NE)

O N.E é a profundidade do nível da água dentro do poço, quando não está em bombeamento. Medido geralmente em metros (m) em relação à boca do poço. Os termos de outorgas utilizados descartam a distância da boca do poço em relação à cota do terreno.

Essa etapa analisa o comportamento do aquífero aferindo o nível de água subterrânea. com essa informação será possível o atendimento da variável do parâmetro L (Nível acima do mar), o qual avalia o nível piezométrico.

4.8. Parâmetros de Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K) e Coeficiente de Armazenamento (S) dos poços através do software *Aquiferwin* 32

Para determinar os parâmetros hidráulicos do aquífero, foi utilizado o método de Hantush e Jacob (1955), utilizando os testes de bombeamento para análise das características hidrodinâmicas de aquíferos semiconfinados (seção 2.8). E para caracterizar o aquífero livre, foi analisado os termos de outorga para identificar características geológicas correspondentes ao aquífero e a profundidade do NA de ordem 5-6 metros. O levantamento dos dados referidos é importante para determinar os parâmetros G (ocorrência de aquífero), A (Condutividade Hidráulica) e T (Espessura do aquífero).

Para simular o comportamento do nível da água durante os testes de bombeamento, foi utilizado o software *Aquifer Win32*¹ (*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. Até o momento, foram analisados 03 (três) poços tubulares P-01, P-02 e P-07 (Tabela 01, seção 2.9) os quais possuem teste de bombeamento disponibilizados pela SEMA

4.9. Aplicação do método GALDIT

Foi desenvolvido um procedimento que permite a combinação ponderada dos vários fatores em função da sua importância no fenômeno de intrusão marinha. O sistema inclui a atribuição de pesos, a classificação dos parâmetros GALDIT em classes, a sua combinação para obtenção de um valor numérico e a atribuição de uma classificação qualitativa ao índice GALDIT.

As caracterizações espaciais de cada um destes fatores, e a sua combinação conjunta, permitem obter um índice ponderado que representa a vulnerabilidade à

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.

intrusão marinha do sistema aquífero costeiro em estudo. Geralmente é possível obter os dados hidrogeológicos necessários à caracterização dos parâmetros GALDIT (Quadro 3).

O peso de cada parâmetro no índice GALDIT varia entre 1 e 4, valores que são associados os pesos, relacionado a maior ou menor influência do parâmetro na vulnerabilidade.

Quadro 3: Parâmetros GALDIT

| PARÂMETRO GALDIT | VALOR DO COEFICIENTE DE PONDERAÇÃO |
|--|------------------------------------|
| G – Ocorrência de Aquíferos | 1 |
| A – Condutividade Hidráulica | 3 |
| L – Nível piezométrico (acima do nível do mar) | 4 |
| D – Distância à linha de costa | 4 |
| I – Impacto do estado atual da intrusão | 1 |
| T – Espessura do aquífero | 2 |

O Conhecido o valor de cada parâmetro, o índice GALDIT é calculado utilizando todos os parâmetros, através da equação 1 (CHACHADI E FERREIRA, 2001, 2007). As classes de vulnerabilidade GALDIT são definidas em função do índice calculado (Quadro 4).

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

Quadro 4: Classes de vulnerabilidade

| CLASSES DE VULNERABILIDADE | ÍNDICE GALDIT |
|----------------------------|---------------|
| Vulnerabilidade elevada | $\geq 7,5$ |
| Vulnerabilidade moderada | $5 - 7,5$ |
| Vulnerabilidade baixa | ≤ 5 |

Os valores dos parâmetros GALDIT variam entre 2,5 e 10 e são atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais dos parâmetros observado ao valor do coeficiente de ponderação. Estes índices serão descritos conforme (CHACHADI; FERREIRA, 2001, 2007).

Ocorrência de Aquíferos (G) – A ocorrência de intrusão marinha depende do tipo de aquífero presente na área. Os aquíferos podem ser confinados, livre, semiconfinado ou limitado por uma ou mais fronteiras (Quadro 5).

Os aquíferos confinados possuem a proteção de uma carga hidráulica superior à pressão atmosférica. Contudo, quando há exploração, o aquífero confinado torna-se entre todos, o mais vulnerável, devido à formação de um maior cone de rebaixamento e descarga instantânea de água para as captações durante o bombeamento.

Os aquíferos semiconfinados são menos susceptíveis uma vez que não só possuem uma carga hidráulica superior à que existiria num aquífero livre, como também podem manter ao longo do tempo pelo menos uma parte dessa carga através da drenagem a partir dos aquíferos circundantes.

Os aquíferos separados do mar por uma barreira impermeável encontram-se mais protegidos da intrusão marinha, sendo os menos vulneráveis a este fenômeno (NOVO, 2007; CHACHADI; FERREIRA, 2001, 2007; FCT, 2010). Os últimos autores ressaltam que, no caso de sistemas multi-aquífero, se pode atribuir o valor 10 ao aquífero confinado.

Para Gonçalves e Giampá (p.81, 2006), um aquífero livre corresponde a primeira camada porosa e permeável do perfil geológico, onde as águas da zona saturada estão sob condições de pressão atmosférica normal, isto é livre. Para (CHACHADI; FERREIRA, 2001) esse tipo de aquífero pode ter valor atribuído igual a 7,5 no índice GALDIT (Quadro 5).

Quadro 5: Parâmetro G: ocorrência de aquíferos

| CLASSES “OCORRÊNCIA DE AQUÍFEROS” | VALOR DO ÍNDICE |
|--|-----------------|
| Aquífero confinado | 10 |
| Aquífero livre | 7,5 |
| Aquífero semiconfinado | 5 |
| Aquífero limitado (recarga e/ou barreira impermeável alinhada paralelamente à linha de | 2,5 |

Condutividade hidráulica (A) – Este parâmetro mede a velocidade de fluxo de água entre o aquífero e o mar. A condutividade hidráulica de um aquífero define-se como a sua capacidade em transmitir água e depende da porosidade eficaz e da fraturação em rochas consolidadas. A condutividade hidráulica influencia a dimensão

da intrusão marinha, ou seja, quanto mais elevado for o seu valor maior será o avanço da cunha marinha (Quadro 6).

Quadro 6: Parâmetro A: condutividade hidráulica

| CLASSES “CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA” | INTERVALO (M/D) | VALOR DO ÍNDICE |
|--|--------------------|--------------------|
| Elevada | > 40 | 10 |
| Média | 10 – 40 | 7,5 |
| Baixa | 5 – 10 | 5 |
| Muito Baixa | < 5 | 2,5 |

Nível piezométrico (acima do nível do mar) (L) – refere-se ao nível de água subterrânea medido em relação ao nível do mar. É um parâmetro bastante importante, uma vez que permite determinar a carga hidráulica que faz recuar o avanço da cunha marinha. Neste parâmetro deve ser considerada apenas a variação temporal de longo período dos níveis de água (Quadro 7).

Quadro 7: Parâmetro L: nível piezométrico (acima do nível do mar)

| Classes “nível piezométrico (acima do nível do | Intervalo | Valor do |
|--|-----------|----------|
| Elevada | < 1 | 10 |
| Média | 1 – 1,5 | 7,5 |
| Baixa | 1,5 – 2 | 5 |
| Muito Baixa | > 2 | 2,5 |

Distância à linha de costa (D) – O impacto da intrusão marinha geralmente diminui com o aumento da distância na perpendicular à linha de costa, apresentando valores máximos junto da linha litoral (Quadro 8).

Quadro 8: Parâmetro D: distância à linha de costa

| Classes “distância à linha de costa” | Intervalo (m) | Valor do índice |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|
| Muito perto | < 500 | 10 |
| Perto | 500 – 750 | 7,5 |
| Meia distância | 750 – 1000 | 5 |
| Longe | > 1000 | 2,5 |

Impacto do estado atual da intrusão marinha na região (I) – 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. Chachadi e Ferreira (2001) recomendam a

utilização da razão $Cl^-/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ como um dos possíveis critérios de avaliação da intrusão marinha em aquíferos costeiros. Na ausência de dados hidroquímicos pode usar-se informação recolhida no campo ou dos próprios utilizadores da água (Quadro 9).

Quadro 9: Parâmetro I: Impacto do estado atual da intrusão marinha na região.

| Classes “impacto do estado atual da intrusão marinha na região” | Relação $Cl^-/[HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ 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 |

Espessura do aquífero (T) – A espessura do aquífero e a espessura saturada do aquífero confinado desempenham um papel importante no controle da intrusão marinha. Quanto maior for a espessura do aquífero maior a extensão da intrusão, Chachadi e Ferreira (2007) (Quadro 10).

Quadro 10: Parâmetro T: espessura do aquífero.

| Classes “espessura do aquífero” | Intervalo (m) | Valor do índice |
|---------------------------------|---------------|-----------------|
| Grande | > 10 | 10 |
| Média | 7,5 – 10 | 7,5 |
| Pequena | 5 – 7,5 | 5 |
| Muito pequena | < 5 | 2,5 |

5. CAPÍTULO: AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA UTILIZANDO O MÉTODO GALDIT

5.1. Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do Método GALDIT

Neste capítulo, serão caracterizados os parâmetros do Método GALDIT, conforme Chachadi e Ferreira (2001), considerando os dados hidrodinâmicos dos poços tubulares como ocorrência de aquífero, condutividade hidráulica, nível piezométrico, impacto da intrusão marinha e espessura do aquífero.

5.1.1. Parâmetro “G” - Ocorrência do Aquífero

Na área de estudo há dois aquíferos, o aquífero Barreiras e o aquífero Itapecuru. O aquífero Barreiras é livre por apresentar as camadas que compõem o seu substrato formado por sedimentos arenosos parcialmente consolidados constituídos por areia fina a média com intercalações de silte e argila. Sotoposta tem-se o aquífero semi-confinado Itapecuru pertencentes as rochas da Formação Cujupe e Alcântara, caracterizado por argilitos e folhelhos intensamente mosqueados.

O aquífero Barreiras aflora, predominantemente, na Ilha do Maranhão, nas falésias, colinas, encostas e topos dos tabuleiros. A espessura não excede 35 metros.

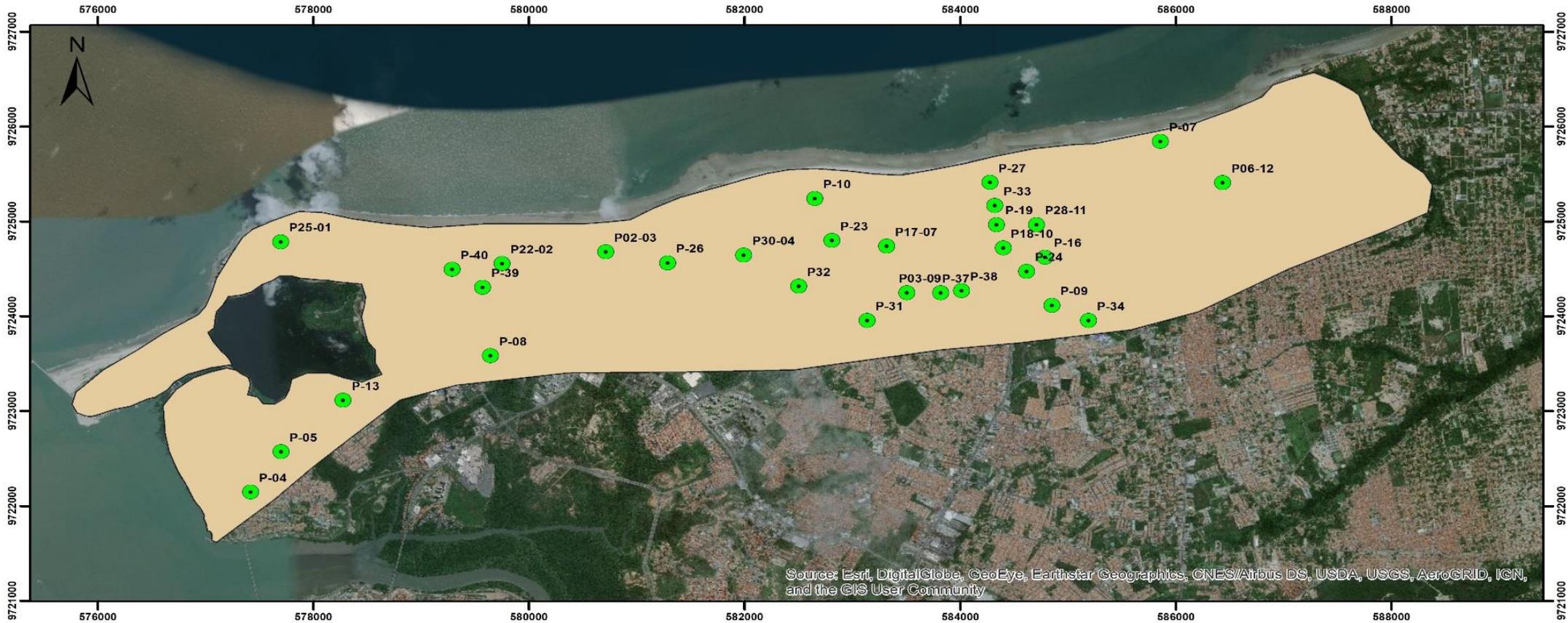
O aquífero Itapecuru é semi-cofinado ou não drenante segundo os resultados dos testes de bombeamento aplicados ao modelo proposto por Theis (1963), no software *AquiferWin32*.

Na área de estudo há a ocorrência do aquífero livre e semi-confinado em todos os poços tubulares, com exceção dos poços P25-01, P6-12 e P07 que estão apenas em aquífero livre. Logo, foi considerado o aquífero Barreiras para a área de estudo devido a formação estar abaixo da cota do nível do mar em todos os poços.

Desta forma, tomando por base os critérios utilizados pelo método GALDIT, segundo Ferreira e Chachadi (2001), o valor para parâmetro G (Ocorrência do aquífero) será 7,5, correspondente ao índice para aquíferos livres (Figura 13).

Figura 13: Ocorrência de aquífero – Parâmetro

Parâmetro G - Ocorrência de Aquífero Franja Costeira de São Luís - MA



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

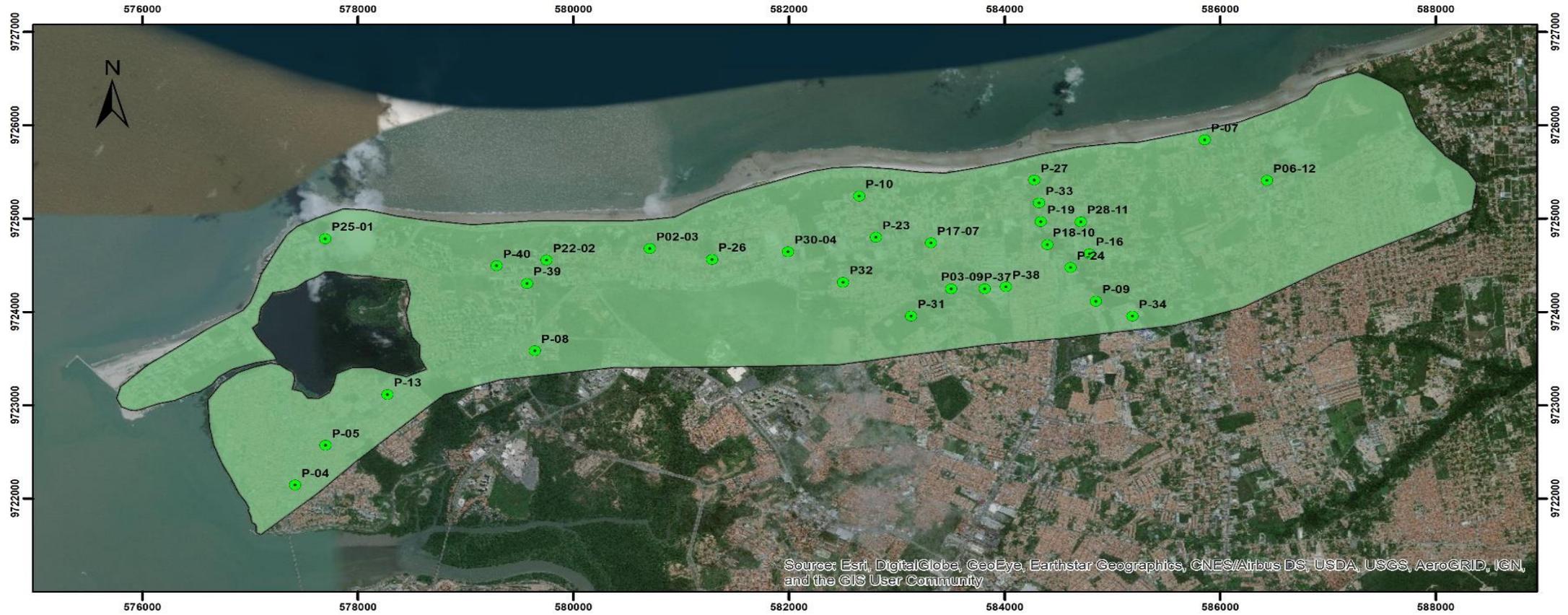
| | | |
|--|---|--|
| <p>● Poços</p> <p>Parâmetro G</p> <p>7,5 Aquífero livre - Barreiras</p> | <p>1:50.000</p> <p>1,5 0,75 0 1,5 km</p> <p>Projeção Universal Transversa de Mercator Datum de Origem SIRGAS 2000 Zona 23 M</p> <p>Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.</p> | <p>Situação geográfica</p> <p>1:30.000.000 1:1.250.000</p> |
|--|---|--|

5.1.2. *Parâmetro “A” - Condutividade Hidráulica*

Foram interpolados os valores reais de condutividade hidráulica e posteriormente reclassificou-se com os valores dos índices do parâmetro A. Para toda a área de estudo foi atribuído o valor de 2,5 devido a condutividade hidráulica ser <5 m/d em todos os poços tubulares, indicando uma baixa condutividade. Possuindo assim, seguinte representação espacial, conforme Figura 14.

Figura 14: Condutividade Hidráulica - Parâmetro A - Franja costeira de São Luís - MA

Parâmetro A - Condutividade Hidráulica Franja Costeira de São Luís - MA



| | | |
|---|---|---|
| <p style="text-align: center;">● Poços</p> <p style="font-size: 1.2em; font-weight: bold;">Índice A</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: #90EE90; margin-right: 5px;"></div> <p>2.5</p> </div> <p style="margin-top: 20px; text-align: center;">Intervalo <5</p> | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>1:50.000</p> <p>1,5 0,75 0 1,5 km</p> </div> <p style="font-size: 0.8em; text-align: center;">Projeção Universal Transversa de Mercator Datum de Origem SIRGAS 2000 Zona 23 M</p> <p style="font-size: 0.7em; text-align: center;">Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.</p> | <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Situação geográfica</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p style="font-size: 0.7em;">1:30.000.000</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p style="font-size: 0.7em;">1:1.250.000</p> </div> </div> |
|---|---|---|

5.1.3. Parâmetro “L” - Nível do Piezômetro

O nível piezométrico se refere à cota de nível de água subterrânea medida em relação ao nível do mar. Esse parâmetro permite determinar a carga hidráulica que pode fazer recuar o avanço da cunha marinha.

Foram interpolados os valores reais das cotas dos níveis piezométricos e posteriormente reclassificou-se o *raster* com os valores dos índices do parâmetro L. Na área a variação do Nível Piezométrico (NP) ocorre de 26m a -7m indicando os índices de 2,5 a 10 do parâmetro L, conforme (CHACHADI; FERREIRA, 2001) (Tabela 6 e Figura 15).

Para a elaboração deste mapa atribuiu-se o nível piezométrico igual = 0 (zero) metros na linha de costa, nas margens da laguna da Jansen e foz do rio Anil.

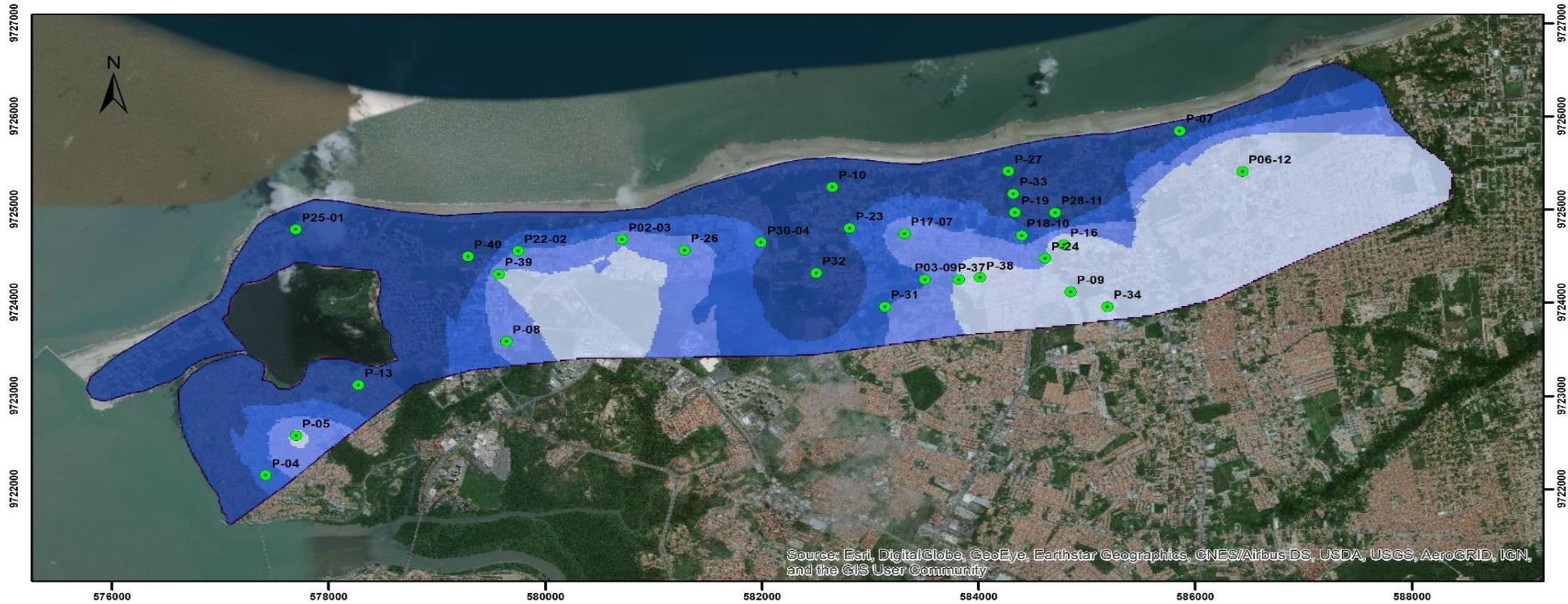
Tabela 4: Dados hidrodinâmicos da área de estudo - Franja costeira - São Luís - MA

| Poço | Localidade | PROF (m) | COTA | NE | NP |
|--------|-----------------------|----------|------|-------|------|
| P25-01 | Petro Marcos | 48 | 11 | 12 | -1 |
| P22-02 | Hotel Costa Atlântico | 85 | 36 | 28,35 | 7,65 |
| P02-03 | Edifício MBIO | 81 | 31 | 20 | 11 |
| P30-04 | Cond. The Prime | 77 | 9 | 4,35 | 4,65 |
| P17-07 | Cond. Ravena | 60 | 22 | 12 | 10 |
| P03-09 | Grand Park II | 92 | 14 | 8 | 6 |
| P18-10 | Cond. Ilhas Gregas | 70 | 16 | 11 | 5 |
| P28-11 | Planta Comércio Eng | 110 | 25 | 32 | -7 |
| P06-12 | Hidroágua | 30 | 44 | 18 | 26 |
| P-04 | Posto Helio | 50 | 13 | 7,8 | 5,2 |
| P-05 | Bom Preço | 72 | 19 | 6 | 13 |
| P-07 | Cristal I | 30 | 8 | 5 | 3 |
| P-08 | Boa Vista | 60 | 16 | 7,7 | 8,3 |
| P-09 | Golden Gree | 60 | 26 | 13 | 13 |
| P-13 | Contab. MA | 60 | 10 | 8 | 2 |
| P-16 | Águas Prata | 96 | 27 | 6 | 21 |
| P-19 | Cond. Sport | 52 | 11 | 7,1 | 3,9 |
| P-23 | Montenegro | 60 | 17 | 12 | 5 |

| | | | | | |
|------|---------------------------------|-----|----|-------|------|
| P-24 | Pavi Imobili | 60 | 18 | 9,4 | 8,6 |
| P-26 | Fibral | 54 | 22 | 12 | 10 |
| P-27 | Cristal II | 68 | 9 | 4,5 | 4,5 |
| P-31 | Turim | 60 | 18 | 10,59 | 7,41 |
| P32 | Telec. Lago | 50 | 6 | 12 | -6 |
| P-33 | Aguamax | 60 | 11 | 5,5 | 5,5 |
| P-34 | Cond. Cidade Milão | 80 | 32 | 20 | 12 |
| P-37 | Varandas Grand Park I | 60 | 20 | 8,5 | 11,5 |
| P-38 | Varandas Grand Park II | 92 | 24 | 8,5 | 15,5 |
| P-39 | Cond. Vivendas do Renascença | | 33 | 20 | 13 |
| P-40 | Construtora Escudo | 153 | 40 | 49 | -9 |
| P-10 | CD Melo Pinheiro | 60 | 15 | 19 | -4 |

Figura 15: Nível piezométrico - Parâmetro L - Franja costeira de São Luís - MA

Parâmetro L - Nível Piezométrico Franja Costeira de São Luís - MA



| | |
|--|----------------------|
| ● Poços | |
| Parâmetro L | Intervalo (m) |
| 2 | >2 |
| 5 | 1.5 - 2 |
| 7 | 1 - 1.5 |
| 10 | <1 |

1:50.000

1,5 0,75 0 1,5 km

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum de Origem SIRGAS 2000
Zona 23 M

Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA
Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.



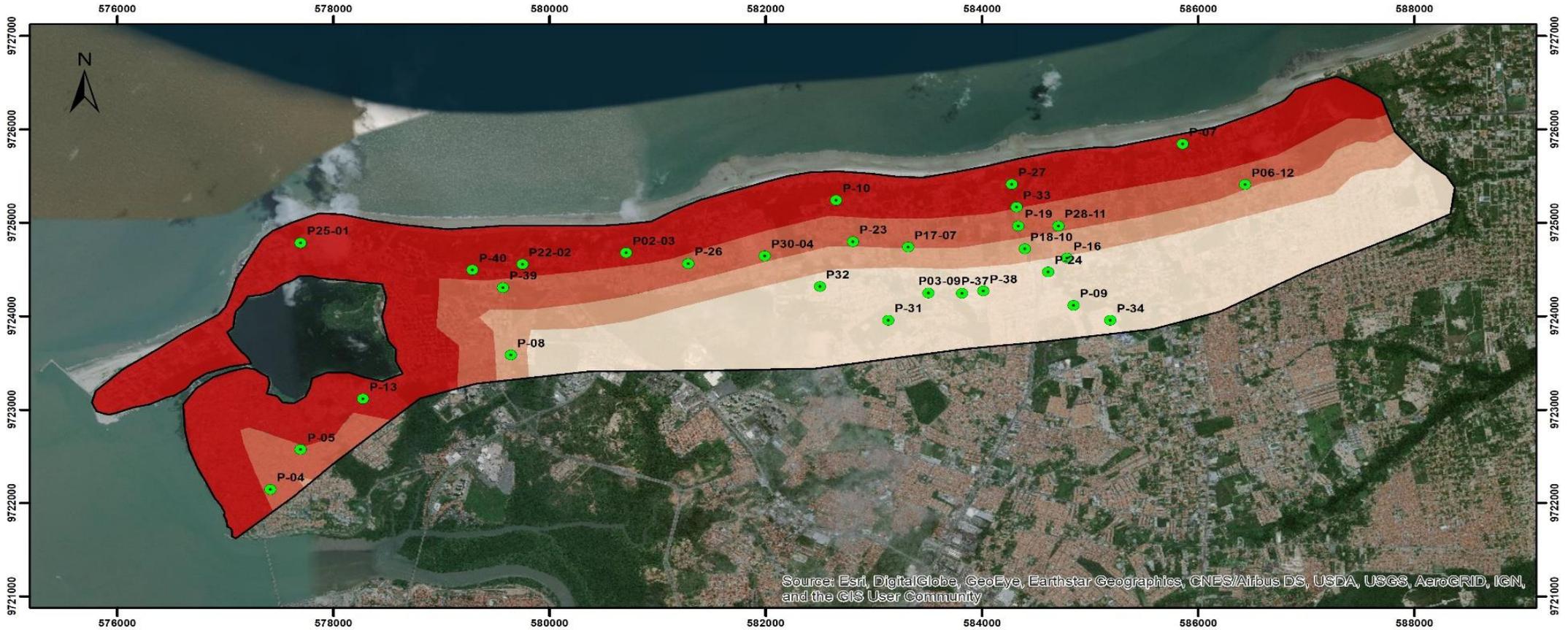
5.1.4. Parâmetro “D” - Distância da Linha de Costa (metros)

A distância da linha de costa se refere à distância em metros em relação ao mar. É um parâmetro que permite avaliar a maior ou menor influência da maré em relação aos poços estudados.

Foram traçados intervalos de <500, 500-750, 750-1000, >1000, para a atribuição dos índices correspondentes a cada intervalo do parâmetro D (2.5, 5, 7.5 e 10), a partir da linha costeira do aquífero e da foz do rio Anil. A água de superfície da saída do Rio Anil é salobra, a vulnerabilidade a intrusão de água para essas áreas tem os mesmos efeitos práticos negativos que os da franja costeira. A distribuição do parâmetro D é apresentada na figura 16.

Figura 16: Distância da linha de costa - Parâmetro D - Franja costeira de São Luís – MA

Parâmetro D - Distância da linha de costa Franja Costeira de São Luís - MA



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

| | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Poços <p>Parâmetro (D) dist_m</p> <ul style="list-style-type: none"> >1000 750-1000 500 - 750 <500 | <p>Intervalos (m)</p> <p>Muito perto - <500 m</p> <p>Perto - 500 - 750 m</p> <p>Média distância - 750-1000m</p> <p>Longe - >1000 m</p> |
|---|---|

1:50.000

1,5 0,75 0 1,5 km

Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum de Origem SIRGAS 2000
Zona 23 M

Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA
Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

Situação geográfica

1:30.000.000

1:1.250.000

5.1.5. Parâmetro “I” - Impacto do Estado Atual da Intrusão Marinha - razão $Cl^- / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$

As águas naturais possuem um conjunto de sais em solução, sendo sua concentração maior nas águas subterrâneas em comparação as águas superficiais. Nestas primeiras ocorrem por possuírem uma capacidade de incorporar grande quantidade de materiais solúveis presentes no solo e nas rochas, sobre as quais circulam. Entretanto, estas quantidades variam também em função dos comportamentos geoquímicos dos compostos químicos envolvidos.

Para analisar o estado atual da intrusão marinha na franja costeira de São Luís, o método GALDIT recomenda a utilização da razão $Cl^- / [HCO_3^- + CO_3^{2-}]$ para a caracterização do parâmetro I. O parâmetro I 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 franja. Representado:

≤ 5 Vulnerabilidade baixa

5 – 7,5 Vulnerabilidade moderada

$\geq 7,5$ Vulnerabilidade elevada

Para a avaliação do parâmetro I foram utilizados os dados dos parâmetros físico-químicos presentes em 14 (quatorze) termos de outorgas disponibilizados pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Maranhão – SEMA e os dados de coletas de poços tubulares realizados em campo. Essas amostras indicaram um Ph médio de 5,89, fracamente ácido teores médios de 33,14mg/l de cloreto e 2,94 mg/l de HCO_3^- .

Para atualização dos dados físico-químicos, foram realizados no primeiro semestre de 2019 as coletas de água e sua posterior análise em 10 (dez) poços tubulares, 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 (Tabela 7).

Para fim de melhor espacialização do parâmetro I, também foram adicionados pontos à linha de costa com valor igual a 2,5 para terem valor no parâmetro igual a 10, pressupondo que a água do mar possui valores de Cl^- / HCO_3^- elevados.

Os poços que apresentaram maior concentração da relação $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ foram os poços P25-01, P13, P32, P3, P03-09, P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09 e P10, com valores reais variando de 2,59 a 5,7 (Tabelas 7 e 8). A partir da interpolação dos valores reais por TIN, as amostras de pontos foram interpoladas de acordo como a influência de um ponto relativo a outro, depois foi reclassificado os valores de acordo com os índices do parâmetro I, sendo possível visualizar a espacialização do parâmetro na área de estudo (Tabelas 7 e 8; Figura 17).

Tabela 7: Dados dos parâmetros físico-químicos das águas dos poços na franja costeira de São Luís – MA, conforme SEMA.

| POÇO | NOME | Cl⁻ mEq/l | HCO₃⁻ mEq/l | Cl⁻/HCO₃⁻ | Índice I |
|-------------|------------------------------------|-----------------------------|--|---|-----------------|
| P25 | Petro Marcos | 1,1 | 0,19 | 5,7 | 10 |
| P40 | Construtora Escudo | 4,8 | 1,27 | 3,7 | 10 |
| P39 | Vivendas Renascença | 0,81 | 0,19 | 4,2 | 10 |
| P02-03 | Edifício Mbio | 1,05 | 1,34 | 0,78 | 2,5 |
| P30-04 | Cond. The Prime | 1,05 | 1,34 | 0,78 | 2,5 |
| P03-09 | Cond. Grand Park II | 0,90 | 0,20 | 4,5 | 10 |
| P17 | Ravena | 1,42 | 0,4 | 3,55 | 10 |
| P18-10 | Cond. Ilhas Gregas | 1,06 | 0,25 | 4,24 | 10 |
| P06-12 | Hidroágua | 1 | 1,35 | 0,74 | 2,5 |
| P31 | Cond. Turim | 0,62 | 0,13 | 4,7 | 10 |
| P09 | Cond. Golden Gree | 0,64 | 0,52 | 1,2 | 2,5 |
| P07 | Cristal | 0,64 | 0,52 | 1,2 | 5 |
| P13 | Conselho De Contabilidade Do Ma | 0,91 | 0,52 | 1,75 | 7,5 |
| P26 | Fibral | 0,80 | 0,59 | 1,35 | 5 |

Tabela 8: Dados dos parâmetros físico-químicos das águas dos poços tubulares coletadas na franja costeira de São Luís – MA

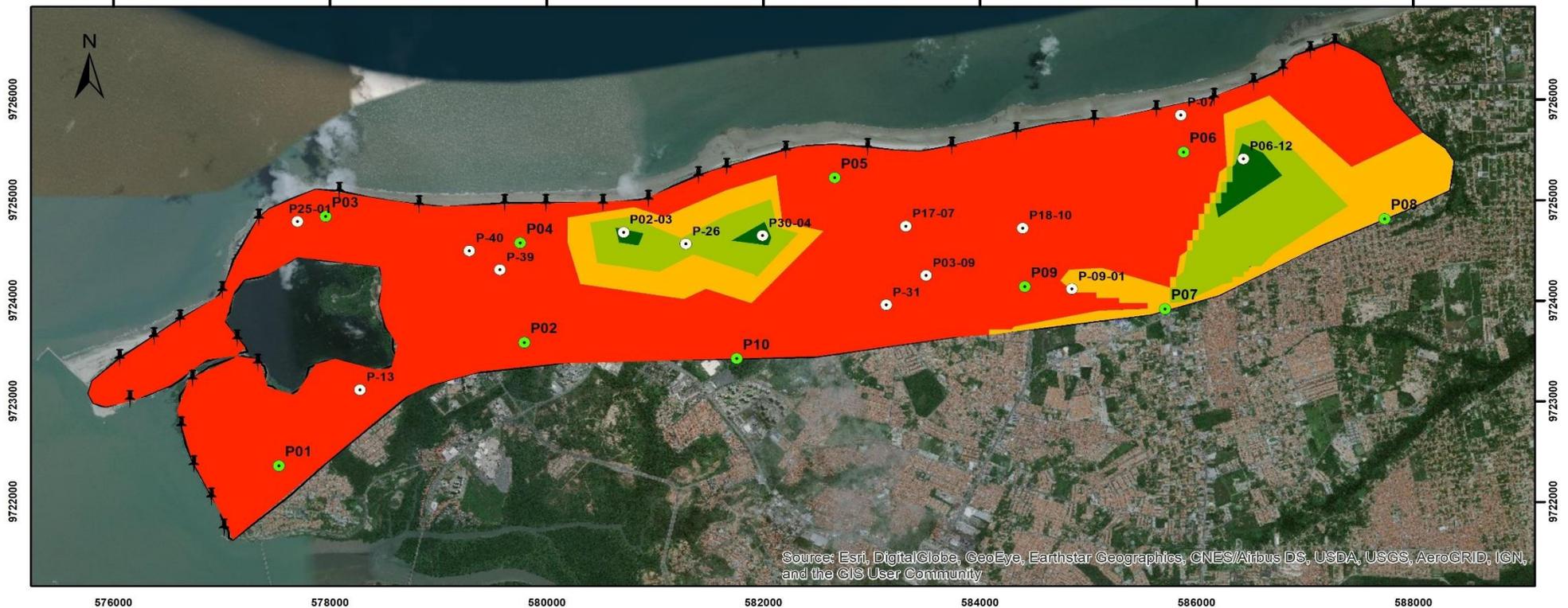
| | Y | POÇO | NOME | Cl- mg/l | Cl- mEq/l | HCO ₃ ⁻ mg/l | HCO ₃ ⁻ mEq/l | Cl-/ HCO ₃ ⁻ mg/l | INDICE I |
|--------|---------|------|---|----------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|---|----------|
| 577529 | 9722359 | P01 | Cond. Una dos Moraes - São Francisco | 37,26 | 1,06 | 15,15 | 0,24 | 4,41 | 10 |
| 579795 | 9723585 | P02 | Hospital Carlos Macieira - Renascença | 530,3 | 15,15 | 269,25 | 4,41 | 3,43 | 10 |
| 577960 | 9724837 | P03 | Barbearia Privilege – Ponta do Farol | 77,42 | 2,2 | 11,65 | 0,19 | 11,57 | 10 |
| 579757 | 9724574 | P04 | Hotel Costa Atlântico - Calhau | 22,26 | 0,63 | 12,82 | 0,21 | 3 | 10 |
| 582661 | 9725222 | P05 | Residêncial Novelle Vie - Calhau | 21,4 | 0,6 | 6,99 | 0,11 | 5,72 | 10 |
| 585882 | 9725478 | P06 | Olho D'água | 26,61 | 0,75 | 8,16 | 0,13 | 5,76 | 10 |
| 585711 | 9723918 | P07 | Restaurante Cheiro Verde – Av. São Luís Rei de França | 54,19 | 1,54 | 6,99 | 0,11 | 1,4 | 5 |
| 586019 | 9719784 | P08 | Construtora - Turu | 19,84 | 0,56 | 1,16 | 0,09 | 1,75 | 7,5 |
| 584415 | 9724139 | P09 | Cond. Magistral Parque - Cohajape | 22,26 | 0,63 | 6,99 | 0,11 | 5,7 | 10 |
| 581796 | 9723168 | P10 | Cond. Jardins - Cohafuma | 40,64 | 1,16 | 23,31 | 0,38 | 3,05 | 10 |

Fonte: Dados da pesquisa

Figura 17: Impacto da intrusão marinha - Parâmetro I - Franja costeira de São Luís – MA

Carta do Parâmetro I - Impacto da intrusão salina - Cl- / HCO3

Franja Costeira de São Luís - MA



| <ul style="list-style-type: none"> Poços com valores assumidos na linha de costa Poços Poços coletados em campo | | <p style="text-align: center;">Situação geográfica</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> </div> | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--|--|---------|--|-----------|--|-------------|--|--------|---|--|
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Índice I</th> <th>Cl- /HCO3-2 mEq/l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>2,5 < 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5 1 - 1,5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>7,5 1,5 - 2</td> </tr> <tr> <td></td> <td>10 > 2</td> </tr> </tbody> </table> | Índice I | Cl- /HCO3-2 mEq/l | | 2,5 < 1 | | 5 1 - 1,5 | | 7,5 1,5 - 2 | | 10 > 2 | <p style="text-align: center;">1:71.973</p> <p style="text-align: center;">Projeção Universal Transversa de Mercator Datum de Origem SIRGAS 2000 Zona 23 M Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.</p> | <p style="text-align: center;">1:30.000.000 1:1.250.000</p> |
| Índice I | Cl- /HCO3-2 mEq/l | | | | | | | | | | | |
| | 2,5 < 1 | | | | | | | | | | | |
| | 5 1 - 1,5 | | | | | | | | | | | |
| | 7,5 1,5 - 2 | | | | | | | | | | | |
| | 10 > 2 | | | | | | | | | | | |

5.1.6. Parâmetro - "T" - Espessura do Aquífero

Foram elaborados três perfis litológicos (perfil A-B, C-D e E-F), para descrever o comportamento dos aquíferos da área de estudo, utilizando-se um total de 26 (vinte e seis) poços tubulares (Figuras 10, 11, 12 e 18).

O contato com o Grupo Itapecuru ocorre de forma brusca a gradacional geralmente passando da litologia arenosa para a argilosa e areno-argilosa.

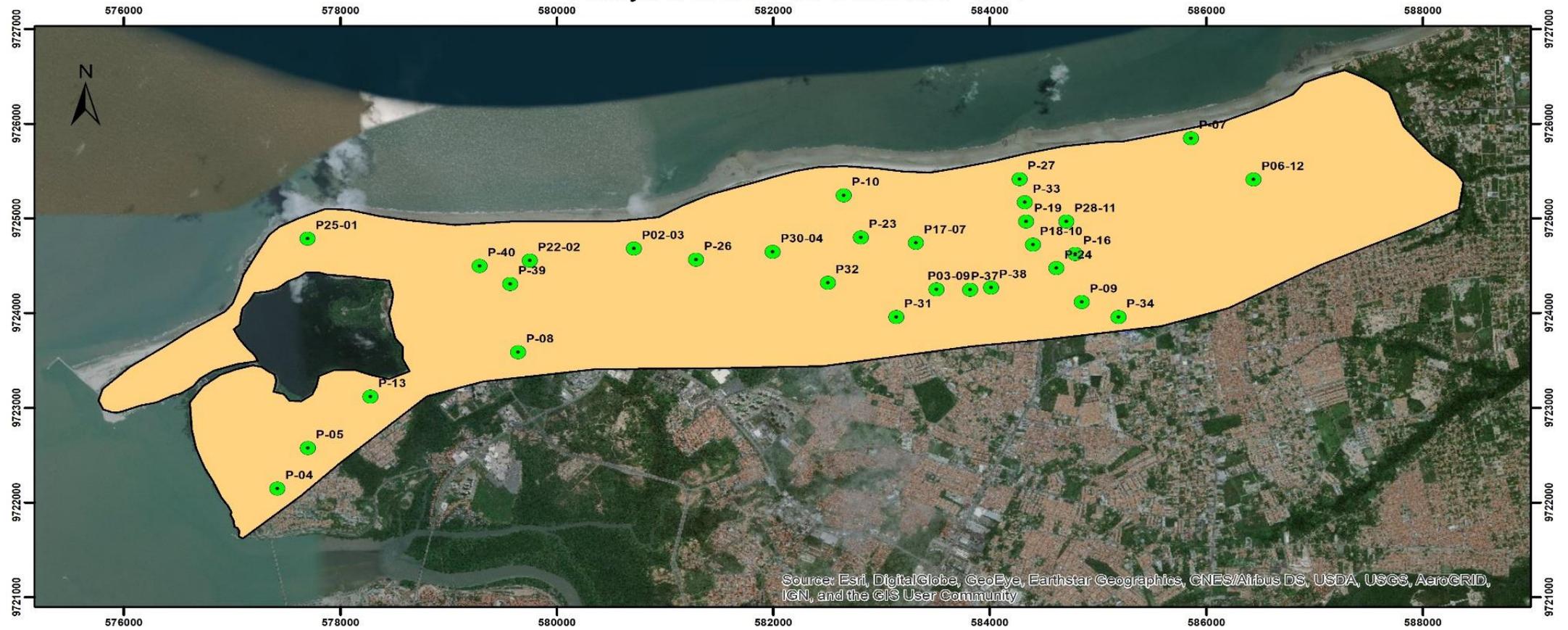
Nas figuras (10, 11 e 12 na seção 2.9; e 18) é possível visualizar a variação da espessura dos aquíferos da Formação Barreiras e Itapecuru na área de estudo. A maior espessura para a Formação Barreiras é de 40 metros no poço P25-01, e a espessura média desta formação é de 25m. Tendo o poço P06-12 de menor espessura com 10 metros

Uma vez que muitos poços captam os dois aquíferos e todos eles apresentam no conjunto uma espessura saturada superior a 10 m, adota-se o valor 10 do parâmetro T conforme (CHACHADI; FERREIRA, 2001).

Figura 18: Espessura do aquífero - Parâmetro T - Franja costeira de São Luís – MA

Parâmetro T - Espessura do Aquífero

Franja Costeira de São Luís - MA



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

| | | | |
|--|---|--|--|
| <p>● Poços</p> <p>Parâmetro T</p> <p>10</p> | <p>Intervalo (m)</p> <p>>10</p> | | <p>Situação geográfica</p> <p>1:30.000.000 1:1.250.000</p> |
| | | <p>1:50.000</p> <p>1,5 0,75 0 1,5 km</p> | |
| | | <p>Projeção Universal Transversa de Mercator Datum de Origem SIRGAS 2000 Zona 23 M</p> <p>Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.</p> | |

5.2. Vulnerabilidade à intrusão marinha na franja costeira de São Luís – MA

O método GALDIT leva em conta as águas vindas do mar ou de corpos d'água superficiais salinizados. No caso da franja costeira de São Luís, além do mar, temos os estuários de alguns rios como Anil, Calhau, Pimentas, Claro e Jaguarema; e para a espacialização do método GALDIT foi considerado os limites da linha de praia e os limites da laguna da Jansen.

Com cada um dos Índices GALDIT mapeados em arquivo *raster* e polígono em um aplicativo SIG, foi possível fazer a classificação da área costeira em categorias de vulnerabilidade à intrusão da água do mar.

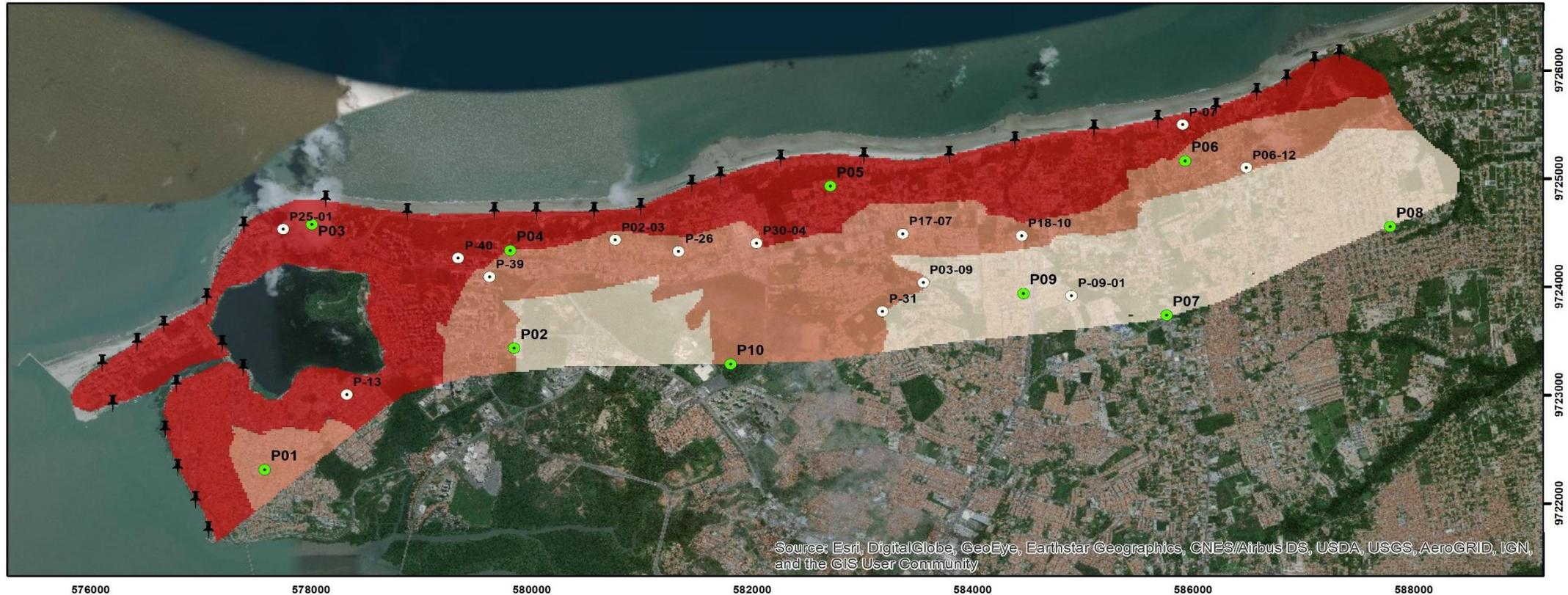
Os valores dos parâmetros variam entre 2,5 e 10 que correspondem, respectivamente, a uma vulnerabilidade à intrusão marinha baixa e alta. De forma geral, estes valores são atribuídos a partir de tabelas que fazem a correspondência entre as características hidrogeológicas locais e o valor do parâmetro associado (Tabela 6). Os coeficientes de ponderação variam entre 1 e 4, valores que são associados, respectivamente, aos parâmetros com menor e maior influência na vulnerabilidade (Tabela 8; Figuras 19 e 20).

Na franja costeira de São Luís o método GALDIT (Figura 21) indicou uma vulnerabilidade elevada ($\geq 7,5$) à intrusão marinha na porção leste, na área da planície flúvio-marinha do Rio Anil, no poço P-01, P-13 nas proximidades do bairro São Francisco, Ilhinha e nos pontos P25-01 e P03 entre a Ponta do Farol e Ponta D'areia. Houve a ocorrência nas desembocaduras dos rios Calhau, Pimenta, Claro e Jaguarema e nas áreas mais próximas à linha de praia nos poços localizados nos bairros São Marcos e Olho D'água nos poços P01, P04, P05, P-07, P10, P13, P26, P27, P-40, seguindo até o bairro Cohafuma no poço P10 próximo ao Sítio do Rangedor (Figura 19; Tabela 8).

Houve a indicação de moderada vulnerabilidade nos poços P02-03, P09-01, P-09, P-07, P-08, P39, P-17, P-26 e P-19, nas áreas mais urbanizadas presentes nos topos de tabuleiros com altitudes que variam de 20 a 58 metros. As áreas com menor vulnerabilidade foram encontradas a oeste da área de estudo entre os pontos P06-12 e P-06 apresentando uma degradação do índice da linha de costa ao continente como mostra a figura 19.

CARTA DE VULNERABILIDADE À INTRUSÃO MARINHA - METÓDO GALDIT

Franja Costeira de São Luís - MA



Legenda

- Poços com valores assumidos na linha de costa
- Poços coletados em campo
- Poços SEMA

Índice GALDIT

- ≤ 5 Vulnerabilidade baixa
- 5 – 7,5 Vulnerabilidade moderada
- ≥ 7,5 Vulnerabilidade elevada

1:50.000



Projeção Universal Transversa de Mercator
Datum de Origem SIRGAS 2000
Zona 23 M

Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Maranhão - SEMA, 2018.
Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

Situação geográfica



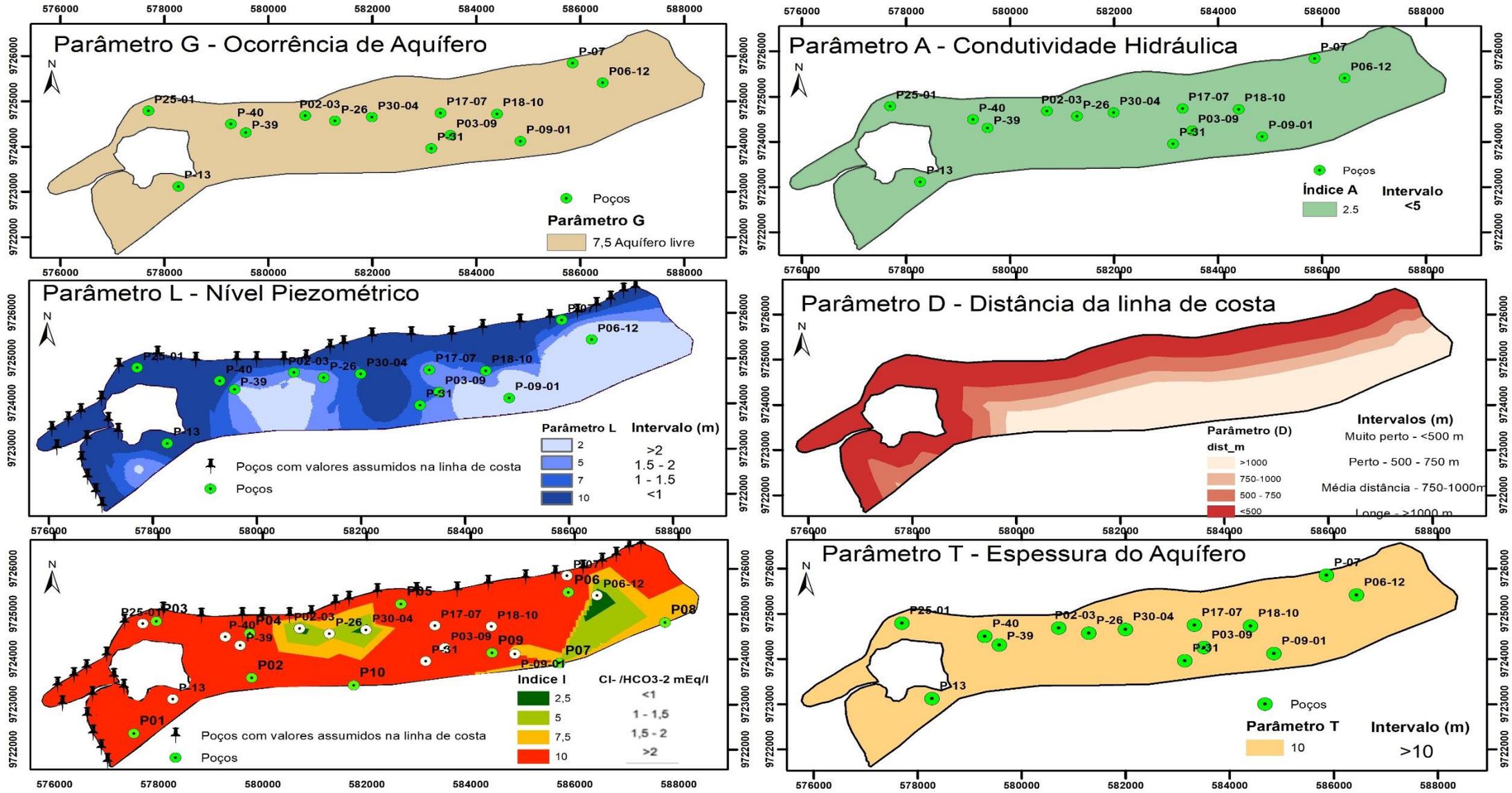
1:30.000.000

1:1.250.000

Figura 20: Carta dos parâmetros GALDIT - Franja Costeira - São Luís – MA

CARTA DOS PARAMETROS DE VULNERABILIDADE A INTRUSAO SALINA - METODO GALDIT

Franja Costeira de São Luís - MA



Projeção Universal Transversa de Mercator
 Datum de Origem SIRGAS 2000
 Zona 23 M

Fonte: Secretaria de Meio Ambiente do Maranhão - SEMA
 Elaboração: Renata Maria Sousa Castro, 2019.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A Ilha do Maranhão possui um ecossistema estuarino tendo uma altura de maré chegando a atingir 7 metros, com duas preamares e duas baixamares. São Luís é altamente influenciado pelas marés, condicionando a formação de uma cunha de água marinha no interior dos rios presentes na área, caracterizado pela presença dos mangues na planície flúvio-marinha.

A cidade de São Luís apresenta grandes trechos de mangue e de estuários de rios. Tanto os mangues como os estuários apresentam salinidade elevada, principalmente nos períodos de estiagem, durante a preamar, o que aumenta o risco da salinização dos aquíferos. E por meio dos mangues estuarinos e a Laguna da Jansen as águas marinhas podem alcançar o aquífero livre Barreiras, e por percolação, pode também atingir o aquífero semiconfinado Itapecuru.

Após a aplicação da Metodologia GALDIT, observa-se que as áreas mais propensas à salinização são as próximas à linha de costa. Porém, a salinidade pode ser conduzida pelas calhas dos rios Anil, Calhau, Pimenta e córregos que por influência dos movimentos de maré conduzem as águas marinhas para o interior da cidade de São Luís, como observado nos poços tubulares P30-04, P32, P19 e P18-10.

O mapeamento dos parâmetros do GALDIT considera que as áreas com maior densidade de poços tubulares, e com poços tubulares mais próximos à faixa costeira apresentam média e elevada vulnerabilidade a intrusão marinha, o que pode estar associado à proximidade com o mar e a alta exploração de água subterrânea facilitando o avanço da cunha marinha. Essa proximidade de poços próximos a faixa costeira é um problema grave, pois influencia diretamente no avanço da cunha salina.

Observou-se também que os parâmetros que mais influenciaram o índice GALDIT foram o parâmetro L (nível piezométrico) e o parâmetro D (distância da linha de costa), demonstrando que o peso atribuído a estes dois parâmetros tem grande influência na geração da carta de vulnerabilidade. E isto ocorre devido estes dois parâmetros terem os pesos 4 (quatro) mais elevados.

Dessa forma, recomenda-se a adoção de gestão e planejamento territorial, em consonância com as propriedades geológico-geotécnicas da Ilha do Maranhão. Faz-se necessária também a gestão das áreas de tabuleiros, pois são áreas de recarga dos aquíferos, indispensáveis para manutenção das reservas hídricas da Ilha do Maranhão, pois, representam áreas altas e planas, onde a especulação imobiliária é muito forte e desenfreada. Essas áreas devem ser protegidas por lei municipal para manutenção das reservas hídricas genuinamente ludovicenses.

É importante também a preservação da área do Parque Estadual do Sítio do Rangedor, que apesar de possuir média vulnerabilidade de contaminação dentro dos seus limites, a sua área

de entorno possui elevada vulnerabilidade. Sendo assim, faz-se necessário a implementação de políticas públicas voltadas para a preservação e conservação do Parque, uma vez que ele representa um bolsão verde junto ao centro urbano e área de grande importância para preservação dos recursos hidrogeológicos.

Faz-se necessário e como medida imediata o monitoramento e fiscalização por parte dos órgãos competentes, referentes aos poços tubulares que apresentaram elevada vulnerabilidade, principalmente os poços com fins de exploração de água para comércio como os poços tubulares P33 e P07 e que estão inseridos próximos às áreas de entrada da cunha marinha. A vulnerabilidade do aquífero e o intenso uso e ocupação na franja costeira de São Luís indicaram a necessidade da realização de monitoramento dos poços tubulares e a aplicação urgente de gestão na exploração das águas subterrâneas considerando sua capacidade de vazão e seu o tempo de bombeamento diário.

É necessário implementar metodologias que preservem o aquífero, recuperem seus níveis de pressão, e reponham gradualmente os volumes retirados nos últimos anos. Uma alternativa que vem sendo adotada em áreas com escassez de água, como o Oeste dos EUA e Israel é o aproveitamento de águas servidas, de rios ou de chuvas para a recarga artificial (PYNE, 1994). A recarga artificial do aquífero utilizando águas de chuva também tende a aliviar problemas de drenagem urbana. Chuvas de alta intensidade como as que ocorrem em São Luís, tendem a gerar alagamentos, sendo gradualmente escoadas para o oceano.

Segundo Barbosa e Mattos (2008, p.2), esta modalidade de recarga de aquíferos é direcionada para os seguintes objetivos:

- proporcionar tratamento adicional de efluentes;
- aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis;
- proporcionar reservatórios de água para uso futuro;
- prevenir subsidência do solo;
- prevenir a intrusão de cunha marinha, em aquíferos costeiros.

Portanto, as políticas de planejamento público e metodologias de recuperação de aquífero, podem ser viabilizadas por meio de projetos de educação ambiental, a serem oferecidos por instituições públicas de ensino ou Organizações Não Governamentais (ONGs), além da adoção de medidas mais eficazes na área da franja costeira do município de São Luís, e em outras áreas litorâneas pelos órgãos competentes.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. C. A. **Avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos costeiros pela intrusão marinha em trecho da orla de Fortaleza, CE.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Coordenadoria de Ensino Tecnológico. Mestrado em Tecnologia Ambiental. Dissertação de Mestrado. 2012. 104 p.
- ALLER, L. et al. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings.** EUA: EPA, EPA/600/2-87/035, 1987.
- AZEVEDO, A.A.; ALBUQUERQUE FILHO. **Águas Subterrâneas.** In: SANTOS A.M. e.BRITO S.NA Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998, p.111 – 130.
- BARBOSA, C. M. de S.; MATTOS, A. Conceitos e Diretrizes para Recarga Artificial de Aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15^a, 2008, São Paulo. Anais São Paulo: Revista Águas Subterrânea, 2008, p. 1-12.
- BARBOSA, A.C.L. **Espaço Urbano e Percepção do Ambiente: o caso da “Avenida Litorânea” em São Luís do Maranhão – São Luís-MA – 2012.** p.8-53. (Pós-Graduação em Cultura e Sociedade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012.
- BERTALANFY, Ludwig von. **Teoria Geral dos Sistemas.** Petrópolis: Ed. Vozes, 1975.
- BEZERRA, D. S. **O ecossistema manguezal em meio urbano no contexto de políticas públicas de uso e ocupação do solo na bacia do rio Anil, São Luís, Maranhão.** Dissertação de Mestrado (Mestrado de Saúde e Ambiente). São Luís: UFMA, 2008.
- BLOOM, A. L. **Superfície da terra.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1972.
- BARBOSA, A. C. L. Espaço Urbano e Percepção do Ambiente: o caso da “Avenida Litorânea” em São Luís do Maranhão – São Luís-MA – 2012. p.116. Dissertação (Mestrado em Cultura e Sociedade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2012, p.50-58.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Gerenciamento costeiro ministério meio ambiente.** Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/informma/item/10430-gerenciamento-costeiro.html>> Acesso em: 06 jun 2019.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 20, de 18 de junho de 1986. Estabelece a classificação de águas doces, salobras e salinas. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília. 1986, p. 16.
- _____. DSG - Diretoria de Serviço Geográfico. Zoneamento ecológico econômico do Maranhão: Carta Topográfica São Luís, MA, 1983. Escala 1:10.000. Disponível em: <http://ww.zee.ma.gov.br/subsidio/html/cart2.html>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- CHACHADI, A.G; LOBO FERREIRA, J. P. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. COASTIN – a coastal policy research newsletter, nº4, 2001, p. 7-9.

_____. Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method: Part 2 – GALDIT indicators description. In: Lobo Ferreira, J. P.; Vieira, J. (eds). *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, 2007, p. 172-180.

CORREIA FILHO, F. L. *Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de São Luís. Relatório Parcial 05 (RP05)*. CPRM, 2017.

CEDERGREN, H. R. *Seepage, drainage and flow nets*. New York: John Willey and Sons, 465 p., 1989.

CHACHADI, A.G; FERREIRA, J.P.L. **Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method**. *COASTIN* – a coastal policy research newsletter, n.º4, 2001, pp. 7-9.

CHACHADI, A.G; FERREIRA, J.P.L. **Sea water intrusion vulnerability using GALDIT method**: Part 2 – GALDIT indicators description. In Ferreira, J.P.L; Vieira, J. (eds) – *Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability*, IAHS Red Books, London, IAHS Publication 310, ISBN 978-1-901502-88-6, 2007, pp. 172-180.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COELHO, M. T. **Avaliação da eficácia da lei de uso e ocupação do solo em São Luís: o caso da Lagoa da Jansen**. Dissertação de Mestrado. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2002.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Coordenadores: Feitosa F. A. C. & Filho, J. M. Fortaleza: CPRM, LABHID- UFPE, 1997.

COSTA, N. N. S.; CASTRO, A. C. L.; COSTA, N. F. A. Análise de uma unidade de conservação de proteção integral: o caso do Parque Ecológico da Lagoa da Jansen, São Luís, MA. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, 21 (1), 2008, p. 01-08. Disponível em: <www.labohidro.ufma.br> Acesso em Mai 2018.

CPRM. **Ações Emergenciais de Combate aos Efeitos das Secas - Noções Básicas Sobre Poços Tubulares**. 1998. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/Nocoas_Basicas_Pocos_Tubulares.pdf>. Acesso em: jul., de 2017.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, R. **Hidrologia subterrânea**. Ed Omega, Barcelona. v. 2, 2189 p. 1983.

DINIZ, J; ARRAES, C; FEITOSA, F. **A rede integrada de monitoramento de águas subterrâneas - RIMAS: efeitos de maré em um poço no Aquífero Beberibe, João Pessoa – PB**. CPRM. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/1103>>. Acesso em: jan., 2019.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F. W. *Physical and Chemical Hidrogeology*. 2 edition, Wiley and Sons, EUA, 1997. p. 505.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop. Release 10. Redlands, CA: Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, 2011. Disponível em: <https://www.esri.com/pt-br/home> Acesso em: 17 mar. 2017.

EL-ROBRINI, M. *et al.* Maranhão. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**: Maranhão. Brasília: MMA. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=publicacao.publicacoesPorSecretariaeidEstrutura=78>> Acesso em jun. 2018.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

Escala 1:10.000 Topografia DSG - São Luís - ZEE-MA, 1980. Disponível em: <www.zee.ma.gov.br/subsidio/html/cart2.html>. Acesso em: jul., de 2017.

F. JUNIOR et al. **Acuífer detrítico costero de Ponta da Madeira – Maranhão, Brasil**, Modelización Hydrogeológica Preliminar. Tecnologia de intrusion de água de mar em Acuíferos costeros. Madrid: IGME, 2003, p. 281-290.

FEITOSA, A.C. **Dinâmica dos processos geomorfológicos da área costeira a nordeste da Ilha do Maranhão**. Rio Claro. 249 p. Tese (Doutorado em Geografia) – UNESP: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 1996.

FERREIRA, J. P. L. et al. **Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha da Zona de Influência de Maré Da Guiné-Bissau**. Lisboa: 8 Seminário sobre águas subterrâneas, 2011.

FERREIRA, J.P, Chachadi, A.G., Diamantino, C., Henriques, M.J. Assessing Aquifer Vulnerability to Sea-Water Intrusion Using Galdit Method: Part 1 - Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. Comunicação apresentada no 4º **Intercéltico Water in Celtic Countries**: Quantity, Quality and Climate Variability, Guimarães, 2005.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**, 4 ed., New Jersey: Prentice Hall, 2001, 256 p.

FOSTER, S. *et al.* **Groundwater quality protection**. Washington: WHO/CEPIS, 103p, 2002.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterraneas: una metodología basada en datos existents**. Lima: CEPIS, 1991.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assement a methodology USING available data, technical manual**. WHO.PAHO/HPE-CEPIS, 1988.

FOSTER, S.; VENTURA, M.; HIRATA, R. **Contaminacion de las águas subterraneas: um enfoque ejecutivo de la situación em América Latina y el Caribe em relación com el suministro de agua potable**. Lima: CEPIS, 1987.

GONÇALVES, V.G.; GIAMPÁ, C.E.Q. **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. São Paulo. Signus Editora, 502 p, (2006).

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 5 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GONÇALVES, C.S; CONCEIÇÃO, A. O.; SANTOS, J. N.; SANTOS, L. C. Estudo do quadro socioambiental da bacia hidrográfica do rio Jaguarema – São Luís (MA). In: **REUNIÃO ANUAL DA SBPC**, 62^a, 2010, Natal. Editorial Científica. Anais Natal: 2010, p. 324.

HORTON, R.E. **Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geol Soe. Am. Bull., v.56, n.3, p.275-370, 1945.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**: São Luís. 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/sao-luis/panorama>. Acesso em: 17 mar. 2020.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Topodata. 1983. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 06 out. 2018.

INMET - **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <www.inmet.gov.br/>. Acesso em: jul., 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. Cidades/São Luís. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/sao-luis/panorama>>. Acesso em: out. de 2018.

JAKOB, A. A. E. YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambu, p.07, 2006.

JIAO, J. J.; TANG, Z. An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in leaky confined aquifer, *Water Res. Research* (35):3, 1999.

KARMANN, I. **Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica**, In: TEIXEIRA, W. et al. (Org.) *Decifrando a terra*, 2 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2001, p. 114-138.

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.

LOBO FERREIRA, J. P.; TERCEIRO, P.; OLIVEIRA, L. G. S.; BALDÉ, I. Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha da Zona de Influência de Maré da Guiné-Bissau. In: **8 SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**, 8., 2011, Lisboa. Anais ..., 2011. Disponível em: https://www.aprh.pt/images/stories/pdf/as2011_lferreira2.pdf. Acesso em 26 out. 2018.

LEITE, F.P.R. **Palinofloras Neógenas da Formação Pirabas e Grupo Barreiras, área Litorânea, nordeste do Estado do Pará, Brasil**. Dissertação (Mestrado em geologia sedimentar) – USP/Instituto de Geociências, São Paulo, 1997.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 216p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 100-1006, 2002.

LIMA, C. dos S. SILVA, J. F. **A Expansão Urbana em São Luís-Ma a partir da ampliação da avenida Litorânea e seus Impactos Ambientais**. Iv Congresso Brasileiro De Gestão Ambiental. Salvador/Ba, p. 02, 2013.

LIMA, E. C. **Planejamento ambiental como subsídio para gestão ambiental da bacia de drenagem do açude Paulo Sarasate Varjota-Ceará**. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal Do Ceará – UFC. Fortaleza. 2012.

LNEC. **Caracterização da vulnerabilidade à intrusão marinha dos sistemas aquíferos da região hidrográfica do Centro, Portugal**. Lisboa: Relatório realizado para a Administração de Região Hidrográfica do Centro, 2011.

LOPES, J. **São Luís Ilha do Maranhão e Alcântara: guia de arquitetura e paisagem**. Sevilla, Consejería de Obras Públicas y Transportes, Dirección General de Arquitectura y Vivienda. 2008.

MAHREZ, B. *et al.* **GIS-based GALDIT method for vulnerability assessment to seawater intrusion of the Quaternary coastal Collo aquifer (NE-Algeria)**. Saudi Society for Geosciences, 2018.

MANOEL FILHO, J. **Ocorrência das águas subterrâneas**, In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, Jr. (Coord). Hidrologia: Conceitos e aplicações, Fortaleza: CPRM, 1997, 389 p. MARANHÃO, Decreto Estadual nº 7.545 de 07 de março de 1980 – Cria o Parque Estadual do Bacanga e dá outras providências. Diário Oficial Estadual, nº 56 de 21 de março de 1980.

MARANHÃO, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro. Macrozoneamento do Golfão Maranhense. **Diagnóstico Ambiental da Microrregião da Aglomeração Urbana de São Luís e dos Municípios de Alcântara, Bacabeira e Rosário**. Apostila. SEMA/MMA/PNMA: Estudo de Pedologia/ Cobertura Vegetal; São Luís, 2002.

MARCONI, M. de A. LAKATOS, E. M. **Metodologia Científica**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2011.

MARTINS, B. N. **Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Salina no Curso Inferior do Rio Bacanga Através do Método Galdit**. 2018. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço) - Departamento de História e Geografia, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019, p.60.

MUEHE, D. **Geomorfologia Costeira**. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p. 253-308, 1995.

MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. C. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

MENDES, S. R. C. Problemas ambientais na Área da Bacia do rio Calhau, São Luis- MA/ Sara Regina Cunha Mendes- São Luis, 2001.

MESQUITA, R. Plano de Expansão da Cidade de São Luís. São Luís, DER-MA. 1958.

MOGHADDAM, H. K. *et al.* **Evaluation Vulnerability of Coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC Index using Quality parameters.** Londres: Hydrological Sciences Journal, 2015.

NASCIMENTO, E.; MATIAS L.F. **Expansão Urbana e Desigualdade Socioespacial: uma análise da cidade de Ponta Grossa (PR). Raega o Espaço Geográfico em Análise,** Paraná, v.23, p.65-97, 2011.

ONU - Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos: **Habitat.** Projeto Indicadores Socioeconômicos dos Municípios do Entorno da Refinaria Premium I. Bacabeira, Imagem Pleiades 8 bits, WGS 84/UTM ZONE 23S, ERDAS Banda 3, 52477X,75464Y, Tamanho 0,5-0,5 pixel, convênio Petrobras/ Fundação Sousandred. Universidade Federal do Maranhão, 2014.

PEREIRA, E. D. **Vulnerabilidade natural à contaminação do solo e do Aquífero do Reservatório Batatã.** Tese (doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências exatas. Unesp; Rio Claro, 2006.

PEREIRA, E.D., Martins, T., Henriques, M.J., Ferreira, J.P. L, Querner, E. Avaliação da Vulnerabilidade à Contaminação da Água Subterrânea e da Intrusão Marinha na Bacia Hidrográfica do Rio Pindaré-Ma Utilizando o Método DRASTIC e GALDIT". 10.º SILUSBA, 2011, 10 pp.

PEREIRA, M. R. da S. ALCÂNTARA JR., José O. **A mobilidade e a expansão territorial na cidade de São Luís, MA: um novo paradigma social na ocupação do espaço urbano.** Cad. Metrop., São Paulo, v. 19, n. 40, pp. 977-998, 2017.

PEREIRA, E. D., **Avaliação da Vulnerabilidade à Intrusão Marinha do Aquífero Costeiro da Bacia Hidrográfica do Rio Paciência Utilizando o Método Galdit.** Relatório final Fapema. São Luís, 2017.

RODRIGUES, T. L. N. *et al.* (Org) **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil:** São Luís, Folha SA-23-2-A, Cururupu Folha SA-23-X-C, escala 1: 250.000, Brasília: CPRM, 1994, 185 p.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior na Bacia de São Luís, MA. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Série Ciências da Terra, v.9, 1997, p.31-43.

ROSSETTI, D. F. Arquitetura Depositional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. (Coords.). O Cretáceo na Bacia de São-Luís Grajaú. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46. (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em:<<http://www.revistas.usp.br/guspssc/article/viewFile/27420/29192>>. Acesso em: 13 jul. de 2017.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; SOUZA, L.S.B. Estratigrafia da sucessão Pós-Barreiras com base em radar de penetração no solo. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v.19, n.2, 2001, p.113-130. SANTOS, L. S. **Morfometria de bacia hidrográfica costeira**: um estudo de caso da sub-bacia do rio das Bicas no município de São Luís - MA. Monografia de Graduação. São Luís: UEMA, 2007.

SANTOS, J. H. S. dos. **Lençóis maranhenses atuais e pretéritos**: um tratamento espacial. 2008. 250 f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SCHOBENHAUS, C. *et al.* **Geologia do Brasil**. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1984.

SILVA, Q.D. **Mapeamento Geomorfológico Da Ilha Do Maranhão**. Tese (Doutorado em Geografia), FCT – UNESP, Presidente Prudente, 2012.

SOUSA, C. S.; KLEIN, E. L.; VASQUEZ, M. L.; LOPES, E. C. S.; TEIXEIRA, S. G.; OLIVEIRA, J. K. M.; MOURA, E. M.; LEÃO M. H. B. Mapa Geológico e Recursos Minerais do Estado do Maranhão. In: 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. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. New Haven: Transactions: American Geophysical Union, v.38, 1964, p. 913-920.

SOTCHAVA, V. B. **Definition de Quelques Notions et Termes de Géographie Physique**. Institute de Geographie de la Sibirie et Extrem Orient. 3: 94-177, 1962.

STRAHLER, A. N. **Climate and their classification**. Physical geography, 2 ed., New York: John Wiley, p. 181-193, 1960.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Haven: Transactions: American Geophysical Union, v.38. p. 913-920, 1964.

SUGUIO, K. **Dicionário de geologia marinha**: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol. São Paulo: Quercus, 1992.

TERCEIRO, P., FERREIRA, J.P.L. Cooperação Internacional em Águas Subterrâneas (CIAS). Relatório científico da componente LNEC do ano 2010. Relatório 286/2010-NAS, 2010, 23 pp.

THEIS, C.V. Estimating the transmissivity of a watertable aquifer from the specific capacity of a well. **US Geological Survey Water supply Paper**. 1963, p 332–336.

TONELLO, K.C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas**, Guanhães, MG. 2005. 69p. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005, p.35.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. IBGE, Rio de Janeiro, 1977.

TROPPEMAIR, H.; GALINA, M. H. **Geossistemas**. Mercator, v. 5, n. 10, p. 79-89, 2006. Disponível em: < <http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/69/44>>. Acesso em: jul., de 2017.

UFMA. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental da Refinaria Premium I**. V. 2. São Luís: UFMA, 2009.

VEIGA JÚNIOR, J. P. **São Luís NE/SE, folhas SA-23-X e SA-23-Z**: Estados do Maranhão e Piauí. Brasília, DF, 2000. Escala 1:500.000. CPRM, 2000. p. 5-23. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI N. **Cartografia geotécnica**, São Paulo: Oficina de texto, 190 p., 2004.

ZUQUETTE, L.V. **Mapeamento geotécnico**: Ribeirão Preto. Relatório Científico, FAPESP, inédito, V. 2, 269p, 1993.