



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGeo

THOMAS JEFFERSON ALVES SANTOS

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS LAGOAS DA REGIÃO DOS LENÇÓIS
MARANHENSES ENTRE 1985 E 2020**

SÃO LUÍS – MA

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGeo

**ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS LAGOAS DA REGIÃO DOS LENÇÓIS
MARANHENSES ENTRE 1985 E 2020**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Geografia da Universidade Federal do Maranhão como parte do requisito para obtenção do grau de Mestre em Geografia.

Orientador: André Luís Silva dos Santos

Thomas Jefferson Alves Santos

SÃO LUÍS – MA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Alves Santos, Thomas Jefferson.

ANÁLISE MULTITEMPORAL DAS LAGOAS DA REGIÃO DOS LENÇÓIS
MARANHENSES ENTRE 1985 E 2020 / Thomas Jefferson Alves
Santos. - 2021.

119 f.

Orientador(a): André Luís Silva dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Geografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís -
MA, 2021.

1. Geotecnologias. 2. Lagoas Interdunares. 3.
Mudanças Climáticas. 4. Sensoriamento Remoto. I. Silva
dos Santos, André Luís. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos, primeiramente, a meu bom Deus que iluminou todos os meus passos, dando saúde, tranquilidade e sabedoria para superar todos os desafios.

À minha mãe, Dona Edilene, que me deu todo apoio e sustentação em todos os momentos da minha vida.

À Waldiana Cantanhede, minha esposa, que sempre me apoiou nas horas difíceis e ajudou em diversas etapas da pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para meu crescimento durante o programa de pós-graduação.

Aos meus professores ao longo da vida que me apresentaram novos caminhos.

Aos colegas de pós-graduação em Geografia pelo apoio, carinho e companhia em diversos momentos.

Ao Professor Me. Ulisses Denache que me auxiliou nas pesquisas de campo e na correção em diversas partes da pesquisa.

Aos meus amigos do IFMA que estiveram ao meu lado ao longo dos últimos 8 anos dando apoio em diversos momentos.

Ao meu orientador Dr. André Luís, meu muitíssimo obrigado, que sempre serei grato por toda paciência, dedicação, por me ajudar a crescer como profissional, pela orientação e todo seu esforço em concluir esta pesquisa.

Meu muito obrigado a todos!!!!

[...] é comparativamente fácil fazer os computadores exibirem desempenho de nível adulto em testes de inteligência ou jogando damas, e difícil ou impossível dar a eles as habilidades de uma criança de um ano no que diz respeito à percepção e mobilidade (HANS, M., 1988, p.15).

Resumo

A história da água a longo prazo foi usada para produzir produtos temáticos que documentam diferentes facetas da dinâmica das águas superficiais orientando, assim, a busca da gestão responsável da água e colocando-a na agenda de discussão de muitos países ao redor do mundo. Isso exigiu mais informações sobre as mudanças na superfície terrestre, tornando imprescindível o seu constante monitoramento. Com o sensoriamento remoto temos a possibilidade de uma análise multitemporal da paisagem, através da avaliação dos padrões de resposta espectral das imagens de satélite em períodos distintos. Dessa forma, a pesquisa utilizou dados do Satélite TRMM-3B34 em conjunto com dados das estações pluviométricas para análises e validações. O objetivo principal desta dissertação é analisar a dinâmica espaço-temporal das lagoas interdunares do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM) no período de 1985 a 2020, a partir de classificações e análise de produtos disponibilizadas na plataforma do Google Earth Engine, bem como avaliar através da linguagem R a identificação e o monitoramento das alterações da Unidade de Conservação com uso de estatística descritiva e produção gráfica. A área de estudo está localizada na região nordeste do Brasil, litoral oriental do estado do Maranhão, e tornou-se uma área de proteção ambiental por meio do Decreto Federal nº 86.060, de 02 de junho de 1981. Observações de campo foram realizadas para coleta de pontos de controle nas lagoas visitadas, para se avaliar o avanço e a retração, bem como auxiliar na classificação dos corpos hídricos. Foram elaborados mapas de ocorrência e transição das lagoas em um período de mais de 3 (três) décadas, sendo identificada uma tendência de avanço em sentido NE-SW e regiões com estabilidade posicional das lagoas. A variação da precipitação em relação ao sistema eólico dos pontos de monitoramento foi utilizada, para identificar o período da ocorrência da mudança em anos de máxima e mínima histórica de precipitação, como nos anos de 2009 e 2012. Os resultados mostraram as áreas de mudança e não mudança e as variações posicionais das lagoas em relação à área do PNLM. Também se identificou que a expansão das lagoas, do litoral em direção ao interior do continente, ocorre no sentido nordeste – sudoeste (NE-SW) seguindo a circulação dos ventos alísios e que a região de vegetação auxilia na fixação das dunas e conseqüentemente na permanência das lagoas em determinadas regiões. Dados do satélite TRMM e das estações pluviométricas foram de grande importância ao traduzir as alterações na área analisada de forma bastante precisa em relação às estações de dados de referência. A análise multitemporal se mostrou eficaz para entender e monitorar o deslocamento das lagoas no PNLM, além de ser de grande relevância para o planejamento de políticas ambientais e sociais da região.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnologias; Sensoriamento Remoto; Mudanças Climáticas, Lagoas Interdunares.

ABSTRACT

The long-term history of water has been used to produce thematic products that document different facets of surface water dynamics, thus guiding the pursuit of responsible water management and placing it on the agenda for discussion in many countries around the world. This required more information about changes in the Earth's surface, making constant monitoring essential. With remote sensing we have the possibility of a multitemporal analysis of the landscape, that is, through the evaluation of the spectral response patterns of satellite images at different periods. Thus, the research used data from the TRMM-3B34 Satellite together with data from rainfall stations for analysis and validation. The main objective of this dissertation is to analyze the spatial-temporal dynamics of the interdune ponds of the Lençóis Maranhenses National Park (LMNP) from 1985 to 2020, based on product classifications and analysis made available on the Google Earth Engine platform, as well as evaluating through from language R, the identification and monitoring of changes in the Conservation Areas using descriptive statistics and graphic production. The study area is located in the northeast region of Brazil, east coast of the state of Maranhão, and became an environmental protection area through Federal Decree N°. 86.060, of June 2, 1981. Field observations were carried out for collection of control points in the visited lakes, to assess the advance and retraction, as well as help in the classification of water bodies. Occurrence and transition maps of the lakes were drawn up over a period of more than 3 (three) decades, and a trend of advance towards NE-SW and regions with positional stability of the ponds was identified. The variation of precipitation in relation to the wind system of the monitoring points was used to identify the period of occurrence of the change in years of historical maximum and minimum precipitation, such as in 2009 and 2012. The results showed the areas of change and no change and the positional variations of the ponds in relation to the area of the PNLM. It was also identified the expansion of the lakes, from the coast towards the interior of the continent, occurs in the northeast-southwest direction (NE-SW) following the circulation of the trade winds and that the vegetation region helps in the fixation of the dunes and consequently in the permanence of the ponds in certain regions. Data from the TRMM satellite and rainfall stations were of great importance in translating the changes in the analyzed area quite accurately in relation to the reference data stations. The multitemporal analysis proved to be effective to understand and monitor the displacement of ponds in the PNLM, in addition to being of great relevance for the planning of environmental and social policies in the region.

KEYWORDS: Geotechnologies; Remote sensing; Climate Change, Interdunal Ponds.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 01: Esquema estrutural do geossistema e ecossistema: C –Clima; A –Água; R –Relevo; B –Biosfera; S –Sociedade; V –Vegetação; PL –Pedosfera e Litosfera. | 22 |
| Figura 02: Hierarquia espacial da superfície de análise. | 23 |
| Figura 03: Escala humana em relação à escala hidrológica. | 25 |
| Figura 04: Fluxograma do Sistema Lacustre de Análise das Lagoas da Região PNLN..... | 26 |
| Figura 05: Interface Google Earth Engine e demais funcionalidades. | 31 |
| Figura 06: Fluxo de dados (workflow)..... | 35 |
| Figura 07: Interface RStudio e funcionalidades. | 36 |
| Figura 08: Localização do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. | 37 |
| Figura 09: Lagoas interdunares na região de Santo Amaro-MA..... | 38 |
| Figura 10: Geologia Estrutural da região do PNLN. | 40 |
| Figura 11: Lagoas interdunares próximas ao município de Santo Amaro-MA. | 46 |
| Figura 12: Lagoas e drenagens intermitentes que cortam o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses durante a estação de chuvas. | 47 |
| Figura 13: Extensão das bacias hidrográficas dos rios Peria e Preguiças. | 48 |
| Figura 14: Classificação Climática de Köppen–Geiger. | 49 |
| Figura 15: Colonização da vegetação entre dunas. | 53 |
| Figura 16: Restinga auxiliando na fixação de dunas. | 53 |
| Figura 17: Vegetação com influência marinha próximo ao povoado Baixa Grande. | 54 |
| Figura 18: Vegetação característica do cerrado próximo ao povoado Queimada dos Britos..... | 55 |
| Figura 19: Série Anual de Cobertura e Uso de Solo do PNLN. | 56 |
| Figura 20: Classificação da riqueza por Ordens observada no PNLN, excluindo espécies de peixes não nativas. | 57 |
| Figura 21: Comunidades na região da ZP, Baixa Grande. | 58 |
| Figura 22: Pesca artesanal na região litoral do PNLN..... | 59 |
| Figura 23: Cabeceira da ponte inacabada de acesso ao município de Santo Amaro..... | 60 |
| Figura 24: Agências de viagens e serviços em Barreinhas - MA..... | 61 |
| Figura 25: Fluxograma metodológico de estruturação da pesquisa. | 63 |
| Figura 26: Localização dos pontos de coletas de dados. | 70 |
| Figura 27: Termômetro Digital Infravermelho Termal..... | 71 |
| Figura 28: Anemômetro Digital de Rotação. | 72 |
| Figura 29: Termômetro de mercúrio. | 72 |
| Figura 30: Termo-higrômetro digital. | 73 |
| Figura 31: Luxímetro Digital. | 73 |
| Figura 32: Global Positioning System – GPS de navegação. | 74 |
| Figura 33: Comparação de imagem não tratada da coleção do Landsat 7 e imagem tratada do Landsat 8. | 76 |
| Figura 34: Formações de Dunas e Restinga próximas ao povoado Baixa Grande..... | 82 |
| Figura 35: Variação do nível da água em diferentes lagoas no mesmo período. | 83 |
| Figura 36: Ocorrência de águas superficiais de 1984-2020. | 85 |
| Figura 37: Intensidade de mudança na ocorrência de águas superficiais de 1984-2020..... | 86 |
| Figura 38: Variação espacial da precipitação (mm) total para o ano de 2009. | 90 |
| Figura 39: Variação espacial da precipitação (mm) média mensal para o ano de 2009. | 90 |
| Figura 40: Variação espacial da precipitação (mm) total para o ano de 2012. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 41: Variação espacial da precipitação (mm) média mensal para o ano de 2012. | 91 |
| Figura 42: Comparação das lagoas para os anos de 2009 e 2012 com pontos de controle para análise de estimativa da precipitação pontual. | 94 |
| Figura 43: Predominância da direção de ocorrência das lagoas em áreas visitadas..... | 99 |
| Figura 44: Exemplo de pontos de controle para identificação das lagoas (A-lagoas cheias, B-lagoas secas) próximo ao povoado Queimada dos Britos. | 101 |
| Figura 45: Estimativa de migração quinquenal das lagoas na região visitada de 1985 a 2019. | 100 |
| Figura 46: Sistema eólico local..... | 102 |

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Conjuntos de dados Landsat no catálogo de dados do GEE..... | 30 |
| Tabela 2: Conjuntos de dados disponíveis do TRMM no catálogo de dados do GEE... | 33 |
| Tabela 3: Variáveis físicas das lagoas dos Lençóis Maranhenses..... | 80 |
| Tabela 4: Ocorrência de El Niño e La Niña..... | 89 |
| Tabela 5: Coordenadas dos pontos selecionados..... | 93 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1: Série histórica de dados de precipitação (mm) de 1991 a 2019 | 69 |
| Gráfico 2: Série histórica de dados de precipitação (mm) de 1991 a 2019..... | 33 |
| Gráfico 3: Número de imagens utilizadas para o cálculo de área por ano..... | 78 |
| Gráfico 4: Série temporal de área do espelho d'água das lagoas com o NDWI..... | 79 |
| Gráfico 5: Série temporal de área do espelho d'água das lagoas com o MNDWI..... | 80 |
| Gráfico 6: Estimativa da área das lagoas para 35 anos..... | 81 |
| Gráfico 7: Normal climatológica de 1981 a 2010 da precipitação acumulada..... | 89 |
| Gráfico 8: Altura pluviométrica anual de 1991 a 2019..... | 89 |
| Gráfico 9: Comparação das fontes de dados de 2009 (A) e 2012 (B) do Estação-SLZ (82280) e TRMM- 3B43..... | 94 |
| Gráfico 10: Comparação anual de 2009 a 2012 da área superficial das lagoas..... | 96 |
| Gráfico 11: Comparação da precipitação pontual das lagoas selecionadas para os anos de 2009 e 2012..... | 97 |
| Gráfico 12: Correlação da velocidade do vento com a precipitação diante da frequência absoluta..... | 98 |
| Gráfico 13: Densidade de probabilidade (vento x ocorrência de chuvas) 2008 – 2017. | 99 |
| Gráfico 12: Correlação da velocidade do vento com a precipitação diante da frequência absoluta..... | 98 |

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas
API - *Application Program Interface*
CEO - *Chief Executive Officer*
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRU - *Climatic Research Unit*
ETM+ - *Enhanced Thematic Mapper Plus*
GEE - Google Earth Engine
GFS - *Global Forecast System*
GPCC - *Global Precipitation Climatology Centre*
GPM - *Global Precipitation Mission*
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IDE - *Integrated Development Environment*
IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
IMESC - Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
LANDSAT - *Land Remote Sensing Satellite*
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MNDWI - *Modified Normalized Difference Water Index*
MODIS - *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*
NDWI - *Normalized difference Water Index*
NIR - Infravermelho próximo
NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
OLI - *Operational Land Imager*
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONU - Organização das Nações Unidas
PCA - *Principal Component Analysis*
PNLM - Parque Nacional do Lençóis Maranhenses
PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos
RMSE - *Root Mean Square Error*
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SWIR - *Short-wavelength infrared*
TIRS - *Thermal Infrared Sensor*
TM - *Thematic Mapper*

TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission*

TSM - Temperatura Superficial do Mar

USGS - *United States Geological Survey*

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZP - Zona Primitiva

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 Objetivo Geral | 18 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 18 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 19 |
| 3.1 Análises do espaço geográfico e o geoprocessamento para sistemas ambientais: usos e limitações atuais..... | 19 |
| 3.2 Geotecnologias para análise da paisagem em ambientes lacustres..... | 22 |
| 3.3 Sistemas lacustres de regiões costeiras | 26 |
| 3.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG) / Plataforma Google Earth Engine (GEE) | 28 |
| 3.5 Análise Multitemporal das coleções de imagens..... | 32 |
| 3.6 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)..... | 33 |
| 3.7 A linguagem R e o RStudio no tratamento estatístico | 34 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO | 37 |
| 4.1 Localização e delimitação da área | 37 |
| 4.2 Geologia..... | 39 |
| 4.3 Geomorfologia | 44 |
| 4.4 Hidrografia | 46 |
| 4.5 Clima | 49 |
| 4.6 Solos..... | 51 |
| 4.7 Vegetação e Fauna..... | 52 |
| 4.8 Características Socioeconômicas..... | 58 |
| 5 METODOLOGIA | 62 |
| 5.1 Procedimentos Metodológicos..... | 62 |
| 5.1.1 Base de dados..... | 64 |
| 5.1.2 Google Earth Engine/GIS..... | 67 |
| 5.1.3 Processamento das imagens..... | 67 |
| 5.1.4 Análise de dados | 68 |
| 5.2 Coleta de dados <i>in loco</i> | 69 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 75 |
| 6.1 Análise multitemporal das lagoas do PNLM. | 75 |

| | |
|---|------------|
| <i>6.1.1 Processamento de imagens para cálculos de área.</i> | <i>77</i> |
| <i>6.1.2 Caracterização física das lagoas do interdunares do PNLM.....</i> | <i>80</i> |
| <i>6.1.3 Distribuição temporal e mudanças superficiais das lagoas interdunares de 1985 a 2020.....</i> | <i>84</i> |
| 6.2 Implicações climáticas na região das lagoas interdunares do PNLM | 87 |
| <i>6.2.1 Variação espacial da precipitação para os anos de máxima e mínima histórica....</i> | <i>89</i> |
| 6.3 Análise da migração das lagoas através da utilização de imagens de satélite e análise de campo. | 98 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 102 |
| REFERÊNCIAS | 103 |

1 INTRODUÇÃO

Diante das alterações climáticas, estudos dos ecossistemas de lagoas (zonas úmidas) são essenciais para o processo de interpretação dos eventos oriundos das mudanças climáticas regionais. A água e seu bom funcionamento em zonas úmidas desempenham um papel fundamental na regulação dos processos naturais do clima através do ciclo da água, manutenção de biodiversidade, emissões nas reduções de gases de efeito estufa e proteção impactos ambientais (DINSA, T. T., GEMEDA, 2019).

O meio ambiente tornou-se um dos grandes temas da humanidade no século XXI. Destaque para a proteção e a conservação da biodiversidade, que vêm recebendo uma prioridade crescente, sobretudo pelos governos e organizações não-governamentais de todo o mundo. A história da água a longo prazo foi usada para produzir produtos temáticos que documentam diferentes facetas da dinâmica das águas superficiais orientando, assim, a busca da gestão sustentável da água, exigindo mais informações sobre as mudanças da água na superfície do planeta.

Técnicas que combinam o uso de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem ser fáceis, rápidas, precisas e com aplicações de baixo custo para diversos fins (FUJACO *et al.*, 2010; PINAGÉ *et al.*, 2011; RAWAT; KUMAR, 2015). Dessa maneira, a detecção das alterações no meio aquático superficial continua sendo uma área de pesquisa ativa para o desenvolvimento de novas análises.

Como parte do Sensoriamento Remoto, a análise multitemporal a partir das imagens de sensores remotos consiste em uma ferramenta poderosa para estudos de detecção de mudanças em sistemas naturais ao estender informações pontuais de uma área para um contexto histórico (TREBOSEN *et al.*, 2005; KARLSEN *et al.*, 2008). Essa análise utiliza imagens de satélite de determinada área em períodos distintos, não se restringindo a usar imagens de um mesmo sensor na coleta de informações (MOREIRA, 2011).

É de entendimento comum que a superfície da Terra é dinâmica, ou seja, uma porção subaquática e outra nunca subaquática, com o restante se modificando entre esses extremos. Dessa maneira, feições litorâneas que se modificam; novas lagoas permanentes que se formam e outras, posteriormente, se esvaziam ocasionadas por inundações e secas sazonais; todos esses fenômenos criam ciclos periódicos de corpos d'água. Tais

fenômenos, intensamente dinâmicos, podem ser analisados espacialmente de forma multitemporal traçando apenas dois pontos no tempo.

O “ QUANDO? ”, “ ONDE? ” e “ COMO? ” se localiza a água na superfície do planeta é extremamente importante, pois a presença (ou a ausência) da água se relaciona diretamente com os sistemas climáticos em diferentes escalas, bem como explicado em geral por modelos de circulação e emissão de gases como CO² e metano (ZHAO, 2019; BACMEISTER *et al.*, 2020).

A disponibilidade de água no Brasil depende em grande parte do clima. O ciclo anual das chuvas e de vazões no país variam entre bacias hidrográficas, bem como a variabilidade interanual do clima associada aos fenômenos de *El Niño* e *La Niña*. Esses fenômenos podem gerar anomalias climáticas, produzindo grandes secas (MARENGO, 2008). No Brasil, e em especial o nordeste brasileiro, o aumento da seca e da falta de água poderá afetar a região que passará de zona semiárida a zona árida, e as consequências dessa mudança afetarão a alimentação, a sanidade e a saúde da população local.

A importância da temática está no estudo de ecossistemas de áreas úmidas, que globalmente estão sob ameaças devido às mudanças nos regimes hídricos resultante da relação dos rios e das mudanças climáticas (FU *et al.*, 2015). Assim, a abundância dos lagos e lagoas está mudando rapidamente em algumas regiões, e mudanças de lagos e lagoas podem refletir características importantes dos processos hidrológicos e geomorfológicos regionais (ZHANG *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2013).

Estudos para melhor conhecimento das lagoas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM) já foram desenvolvidos (ARAÚJO, A., 1999; PEREIRA, 1999; MOSCHINI-CARLOS & POMPÊO, 2001; DOS SANTOS *et al.*, 2019), mas há ainda uma carência de conhecimento sobre a dinâmica espacial de lagoas interdunares perenes e temporárias que ali se formam. Nesse sentido, este estudo propôs realizar o mapeamento multitemporal da distribuição espacial dos corpos hídricos, entre 1985 e 2020, do setor leste da planície costeira do Estado do Maranhão, onde está inserido um dos maiores complexos de lagoas do Quaternário da América do Sul, delimitado pelo PNLM (GONÇALVES *et al.*, 2003).

A plataforma Google Earth Engine (GEE) foi usada para obter informações para o mapeamento geral de mudanças na região do PNLM ao longo de 35 anos. A utilização da linguagem R nortearam a análise da variação espacial de distribuição da precipitação

pluviométrica com os dados do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) e a visualização de dados estatísticos. Para Álvares *et al.* (2013), a precipitação pluviométrica corresponde ao atributo climático de maior importância em regiões de clima tropical. O Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI-MNDWI) derivado de imagens de satélite em uma escala de tempo entre 1985 e 2020 foi utilizado para mapear ganhos e perdas dos corpos hídricos.

Considerando a complexidade das lagoas interdunares do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, a análise em escala multitemporal contribuirá para comparar uma mesma paisagem em diferentes períodos, a fim de obter dados fundamentais dos recursos hídricos que possam identificar a presença de uma dinâmica a nível superficial, a fim de esclarecer as condições que levam a morfologia das lagoas observadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Compreender a dinâmica hídrica do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, de forma a mapear as mudanças espaço-temporais do complexo de lagoas interdunares a partir de imagens de satélites, no período de 1985 a 2020, relacionando-as à variação pluviométrica da região.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar as áreas de lagoas em escala multitemporal usando a plataforma Google Earth Engine com as imagens disponíveis;
- Correlacionar os dados de precipitação (da janela temporal) para identificação de alterações distintas na região das lagoas;
- Calcular quantitativamente os dados de precipitação pluviométrica estimadas do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) usando a linguagem R (Rstudio).
- Elaborar mapas e gráficos da dinâmica espaço-temporal das lagoas e precipitação na região.
- Avaliar a técnica da análise multitemporal para a identificação e monitoramento das alterações da dinâmica das lagoas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo propõe uma fundamentação teórica para detalhar alguns conceitos que irão se desenvolver no andamento da pesquisa. Dessa maneira, a partir da apresentação de conceitos desenvolvidos ao longo do século XX pela Geografia, analisou-se em que medida podem ser agregados em representações computacionais e quais as limitações da utilização de Sistemas de Informação Geográfica - SIG.

3.1 Análises do espaço geográfico e o geoprocessamento para sistemas ambientais: usos e limitações atuais

Antes de abordar a análise multitemporal ou qualquer metodologia científica embasada no neopositivismo, quanto ao uso de técnicas de estatística, matemática e uso de modelos computacionais em suas múltiplas partes, deve-se dispor sobre questões pertinentes à análise geográfica e o uso da abordagem sistêmica para sistemas ambientais.

Estudar unidades espaciais complexas, tomando a natureza de forma holística dentro das categorias geográficas em suas relações e dinâmicas, não é raro na geografia. Devemos isso às proposições da escola Alemã que foi à precursora das primeiras abordagens das paisagens integradas e dinâmicas, consolidadas nas obras de Alexander von Humboldt (1849; 1856; 1874) e Carl Ritter (1865), Carl Troll (1938), e à escala francesa, sob influência de Paul Vidal de la Blache e Jean Rochefort, que caracterizaram a *paysage* como o relacionamento do homem com o seu espaço físico (SCHIER, 2003).

Nesta pesquisa, partiu-se da preocupação da geografia com a superfície da Terra, como os recursos hídricos superficiais e sua diferenciação, que resulta da interação na geoesfera que compõem a paisagem (PIMENTEL, 2019). Essa interação daria a formação das paisagens naturais, cuja diferenciação na superfície terrestre resultaria da dialética entre as forças endógenas e exógenas. Para Vitte (2007), essa consequência poderia ser observada quando se estabelecessem as relações entre as formas de relevo e as características climáticas, permitindo, com isto, a “regionalização” dos fenômenos da natureza na superfície.

Em 1939, Richard Hartshorne apresentou o conceito de “unidade-área” como elemento básico de uma sistemática de estudos geográficos, denominada pelo autor de “estudos de variação de áreas”. Definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, apresentando características individuais próprias; tornando-se base de um sistema de classificação e organização do espaço.

A partir da decomposição do espaço em uma “unidade de área”, o pesquisador poderia relacionar assim, para cada uma destas partições, as correspondentes características físicas e bióticas que a individualizam em relação aos demais componentes do espaço. Logo, tão importante quanto o fenômeno são as interações e fluxos no fenômeno estudado.

Na abordagem da Geografia Quantitativa, utilizada na pesquisa, temos em sua base a busca da aplicação do método hipotético-dedutivo que caracteriza as ciências naturais nos estudos geográficos. Dessa forma, é preciso construir modelos a serem utilizados na análise dos sistemas geográficos; estes construídos de forma teórica, devem ser verificados e validados com dados de campo a partir de técnicas estatísticas (CÂMARA *et al.*, 2001). Logo, o estudo dos padrões de distribuição espacial dos fenômenos (eventos pontuais, áreas e redes) passa a formar uma base para estudos quantitativos do espaço.

Apesar da forte relação entre os conceitos da Geografia Quantitativa e o Geoprocessamento, apenas a partir de meados da década de 90 os SIG's passam a dispor de representações computacionais adequadas à plena expressão dos conceitos desta escola (CÂMARA *et al.*, 2003). As técnicas de geoestatística ainda estão em processo de integração aos principais sistemas de informação geográfica, bem como os processos de modelagem e propagação de incerteza (HEUVELINK, 1998; FELGUEIRAS, 1999), ou seja, precisam ser plenamente incorporados aos SIG's.

Deste modo, o desafio de incorporação da Geografia Quantitativa ao SIG ainda não está plenamente realizado. Especialmente no caso de modelos para processos espaço-temporais, que refletem mais “*sistemas cartográficos de informação*” a “*sistemas de informação geográfica*”, devido à natureza estática de suas representações computacionais.

Diante das proposições da Geografia Crítica para essa temática, Santos (1996) enfatiza a necessidade de libertar-nos de visões estáticas do espaço (tais como nos vem condicionando séculos de mapas), ao incluir a componente de processos variantes no tempo como parte essencial do espaço. Ele procura diferenciar o conceito de espaço do de paisagem, afirmando que “*a paisagem é o conjunto de formas que num dado momento, exprimem as heranças que representam as sucessivas relações localizadas entre homens e natureza. O espaço são essas formas mais a vida que as anima*”

Do ponto de vista da Análise Geográfica, os conceitos de Harvey (1969) implicam que a forma tradicional de expressar as relações espaciais entre entidades geográficas (propriedades como adjacência e distância euclidiana) capturam apenas efeitos locais, e não permitem representar a dinâmica dos fenômenos sociais e econômicos de nosso tempo. Para remover estes limites, será preciso avançar muito na direção de técnicas de Representação do Conhecimento.

Para Sowa (2000), a representação do conhecimento é “a aplicação da lógica e da ontologia na tarefa de formular modelos computáveis para algum domínio”. Desta forma, os paradigmas atuais de Representação do Conhecimento são essencialmente estáticos, sem modelar adequadamente a dimensão temporal e os relacionamentos dinâmicos e dependentes de contexto entre os objetos.

Do ponto de vista da representação computacional, o conceito de “unidade-área” de Hartshorne é equivalente aos conceitos de unidade de paisagem (TRICART, 1977) e *land-unit* (ZONNEVELD, 1989), todos baseados no conceito-chave de delimitação de unidades homogêneas. Numa visão geral, pode-se dizer que a atual geração de SIG permite a realização dos conceitos de Hartshorne (e equivalentes), com poucas limitações.

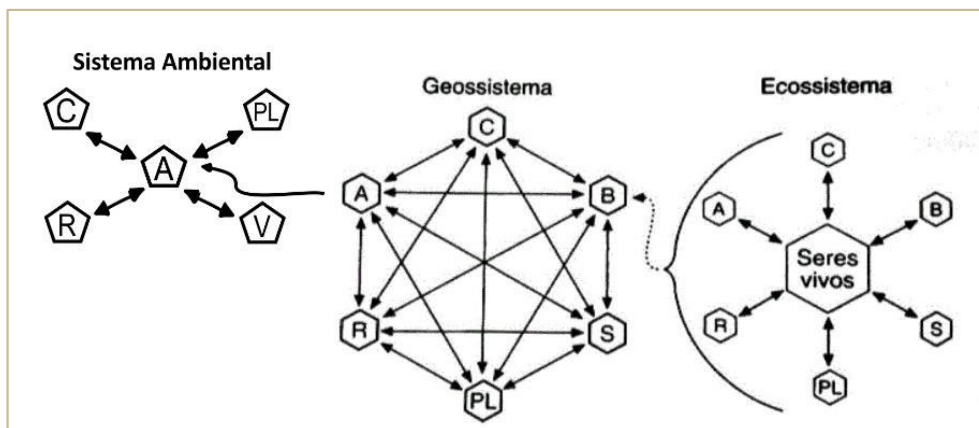
Diante dos fenômenos físicos considerados em modelos de sistemas hidrológicos, esses por sua vez, possuem alto índice de variação do estado da superfície ao longo do tempo. Sua representação acurada depende da capacidade de derivar equacionamentos matemáticos formais que descrevam a variação espaço-temporal do fenômeno.

É fundamental distinguir entre as capacidades da atual geração de SIG e as limitações inerentes a qualquer representação computacional do espaço geográfico. Santos (1996) diz que apesar de ser essencialmente ineficaz capturar, num ambiente de geoinformação, todas as dimensões dos conceitos como “*sistemas de objetos e sistemas de ações*”, desta forma é importante buscar técnicas que permitam aproximar dimensões parciais desta visão.

Sob a ótica da análise geográfica, fenômenos incidem diferentemente sobre os sistemas ambientais de grandezas escalares menores (figura 01). Dessa forma, para uma abordagem de avaliação, cita-se os Geossistemas e Ecossistemas em processos e dinâmicas espaciais, pois essas proposições difundidas da Teoria Geral dos Sistemas possuem grande valor para avaliações ambientais. Das quais, tem destaque a abordagem

morfodinâmica de TRICART (1977) ou a abordagem ecogeográfica (TRICART & KILLIAN, 1979).

Figura 01: Esquema estrutural do geossistema e ecossistema: C –Clima; A –Água; R – Relevo; B –Biosfera; S –Sociedade; V –Vegetação; PL –Pedosfera e Litosfera.



Fonte: Adaptado CHRISTOFOLETTI, 1999.

Para um entendimento melhor no estudo, com foco nos processos hidrológicos, Klemes (1983, p. 4) chama atenção para a complexidade da análise espacial devido a grandeza na magnitude espacial e temporal. Contudo, as características da heterogeneidade nas escalas espacial e temporal, analisadas por Feng *et al.* (2012), Huang *et al.* (2014) e Latrubesse (2015), mostram o uso dos *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) e como os modelos de processos em escala menor podem ser diretamente parametrizados e validados para os sistemas de grandeza espaciais maiores, auxiliando assim na organização das análises geográficas.

3.2 Geotecnologias para análise da paisagem em ambientes lacustres

A análise integrada da paisagem natural orienta a uma categoria mais abrangente e importante para melhor entendimento quanto a região do complexo de lagoas de dunas do PNLM. Porém, ela não é alcançada sem antes passar pela problemática da escala. Posteriormente a isso, parte-se para o ponto focal da localização e persistência das águas superficiais (interiores e costeiras), que estão diretamente relacionadas ao clima, à atividade humana (VÖRÖSMARTY, *et al.*, 2000; RAYMOND *et al.*, 2016), à diversidade biológica (GARDNER *et al.*, 2015) e ao bem-estar humano (WEF, 2016).

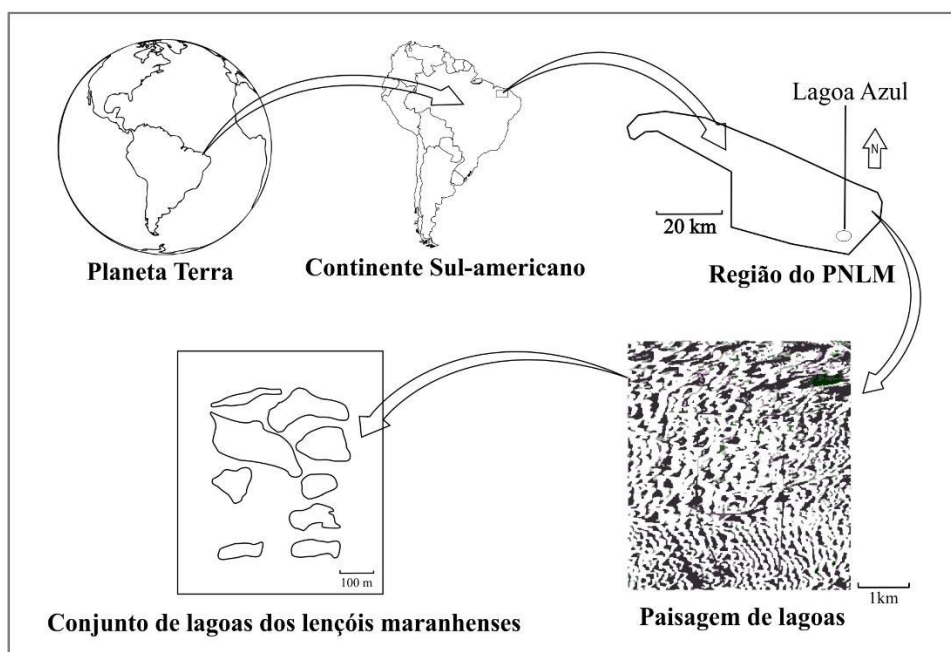
Na literatura, existe um conjunto global de dados que documentam a localização e a sazonalidade das águas superficiais, que foram produzidos a partir de inventários e descrições nacionais (DOWNING *et al.*, 2006) com dados estatísticos regionais e

imagens de satélite (VERPOORTER, *et al.*, 2014; YAMAZAKI; TRIGG; IKESHIMA, 2015). Contudo, medir mudanças de longo prazo, com geotecnologias, em média-alta resolução continua sendo um desafio quando tratamos da magnitude temporal e espacial em diferentes escalas.

Cabe discutir, no escopo desta pesquisa, a paisagem na perspectiva das geotecnologias, pois muitas pesquisas desenvolvidas são realizadas em escalas temporais inadequadas. Jelinski *et al.* (1994, p. 45) relataram que pesquisas, no campo da cobertura espaço temporal, têm sido feitas na ordem temporal equivocadas, ao invés de se utilizar escalas de tempo mais apropriadas. Logo, é importante abordar as limitações e distinções nos diferentes tipos de análises espaciais e temporais.

Para melhor entendimento, usou-se uma abstração para ilustrar as camadas hierárquicas espaciais superficiais identificadas. Nesse contexto, destaca-se: o planeta Terra (Biosfera) subdividido em continentes, que são subdivididos em regiões. Essas divididas em paisagens, que são divididas em ecossistemas locais e, por fim, podem ainda ser divididos de acordo com a sua estrutura interna, na qual cada degrau deve ser representado em uma escala própria (figura 02).

Figura 02: Hierarquia espacial da superfície de análise.



Fonte: Adaptado de Forman (1995).

Dessa forma, com a hierarquização espacial, tem-se uma escala geográfica, pois o geógrafo relaciona-se com as disposições e distribuições, com a integração espacial,

com as interações e organizações espaciais e com os processos espaciais, como citam Berry (1964, p. 3) e Castro (1996).

[...] a escolha de dividir o espaço, definindo uma realidade percebida/concebida, é uma forma de dar-lhe uma figuração, uma representação, um ponto de vista que modifica a percepção da natureza deste espaço e, finalmente, um conjunto de representações coerentes e lógicas que substituem o espaço observado (CASTRO, 1996, p.136).

Na escala local, ecossistemas lacustres estão diretamente relacionados com os cursos d'água, lagos e lagoas. Assim, considerando a paisagem descrita como um grande mosaico em grandeza espacial, e este se correlaciona sistematicamente com ecossistemas, manchas e corredores; tem-se na categoria região a composição de paisagens com o mesmo macroclima e integrada conjuntamente por atividades humanas (FORMAN, 1995).

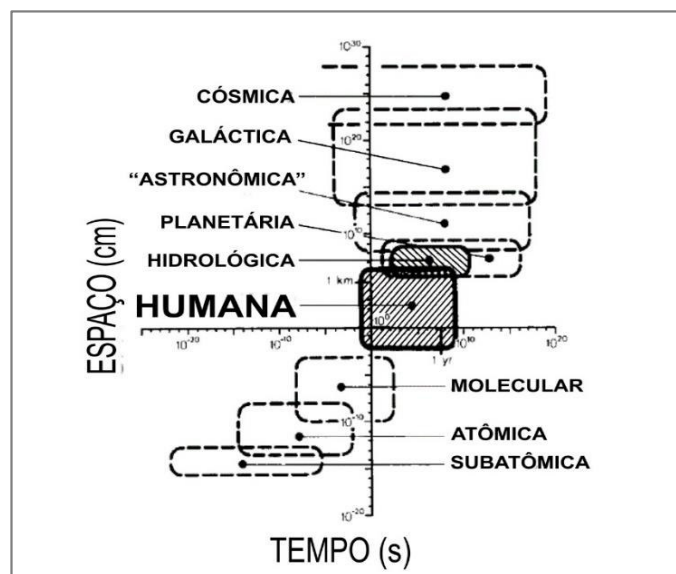
Quanto aos estudos da composição, fisionomia e organização de paisagens, relacionam-se os conceitos de dinâmica e evolução de paisagens, pois estes estão engendrados dentro de uma definição maior, a morfologia da paisagem. A paisagem como categoria geográfica difere de espaço, mas a complementa; algo como um parâmetro ou medida multidimensional de análise espacial.

Dessa forma, para uma análise da paisagem apoiada em Sistema de Informação Geográfica (SIG), objetiva-se, fundamentalmente, gerar novas informações por meio da manipulação e integração com camadas de dados já existentes (LANG; BLASCHKE, 2009). Entretanto, deve-se inicialmente trabalhar com a identificação dos espaços na escala em que eles são percebidos, ou seja, o fenômeno observado, articulado a uma determinada escala, ganha sentido intrínseco e particular.

Muitos estudos mostraram que os resultados das investigações geográficas são específicos da escala (BIRD, 1956; PAIN *et al.*, 2014; MOORE, 2018). A consideração da escala cai em categorias como: a escala de variação na forma da paisagem, a escala da ação do processo e a escala da investigação (ROSSER, N. J, 2002, p. 47). Diante das escalas em que as superfícies são estudadas é, em última instância, um equilíbrio entre a precisão da medição e o tamanho do objeto de análise.

A relação da escala "humana" e da escala "hidrológica", essas no contexto de intervalos de tempo e espaço (aproximado), correspondem aos principais níveis de escalas usados para representações de processos físicos (figura 03).

Figura 03: Escala humana em relação à escala hidrológica.



Fonte: Adaptado de Klemes (1983).

Nessa relação a importância da escala de investigação enquanto caracterização hidrológica, ou seja, em termos de hidrologia da superfície, é necessária para um equilíbrio entre a variabilidade da escala local, como por exemplo em ambientes semiáridos é geralmente alta (AGNEW; ANDERSON, 1992) e as restrições sensoriais do tamanho da atuação do fenômeno estudado.

De forma contextual, é natural que se tenha a melhor compreensão das coisas que estão dentro da “escala humana”, ou seja, acessível a nós diretamente por nossos sentidos (não auxiliados): de milímetros a alguns quilômetros no espaço e de segundos a algumas décadas no tempo. Diante da complexidade de um sistema ambiental físico, o uso de geotecnologias (meio auxiliar) para a análise geográfica, ajuda a relacionar a noção de espaço numa escala perceptível.

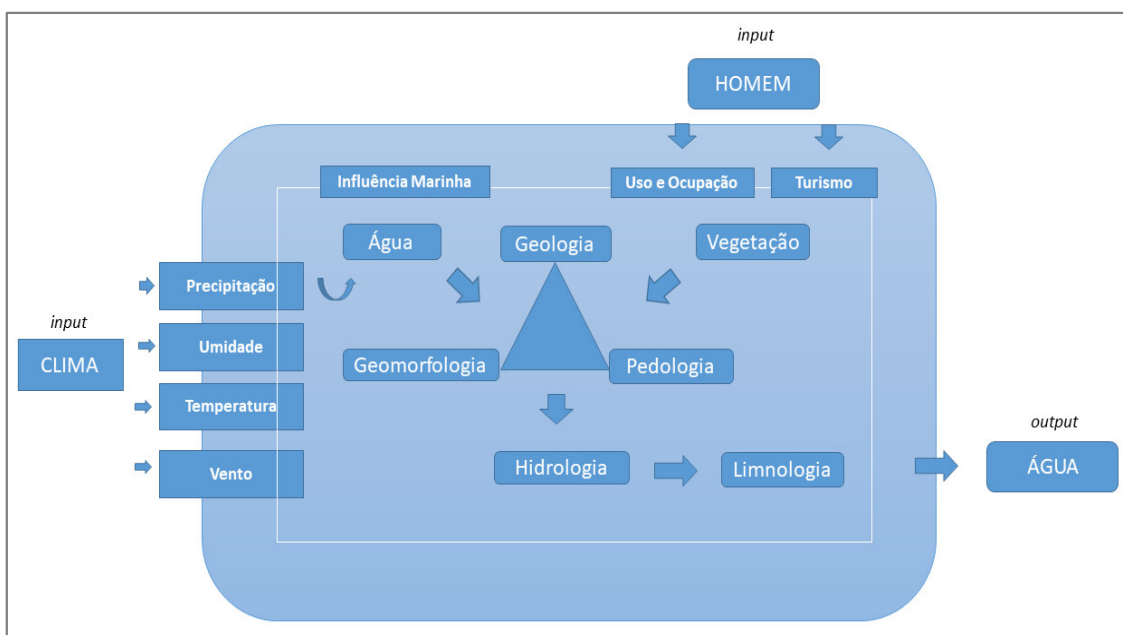
A adoção das geotecnologias com sua vasta gama de ferramentas para análises multitemporais da paisagem, traduz o anseio da interpretação de um ambiente complexo, como sistema lacustre. Entretanto, deve-se tomar todos os cuidados quanto a abordagem sistêmica, diante da lógica humana de criação das relações (padrões) entre um simples sistema de armazenamento de dados de um SIG e a realidade espacial na “escala humana”.

3.3 Sistemas lacustres de regiões costeiras

Os sistemas lacustres das zonas costeiras são ambientes altamente dinâmicos em nosso planeta. São regiões onde se observa a inter-relação entre continente, oceano e atmosfera apresentando um equilíbrio dinâmico alinhado pelas variações energéticas dos processos naturais de diferentes escalas espaciais e temporais (OLIVEIRA, 2018). Para uma análise integrada das lagoas, os sistemas ambientais que conjugam e integram perspectivas estruturais, dinâmicas e evolutivas, devem ser avaliados à luz da teoria dos geossistemas, nos levando à necessidade de uma reflexão sobre o sistema lacustre e costeiro no âmbito da geografia científica.

Na figura 04 podemos identificar dentro de um sistema, um subsistema destacando suas relações internas do sistema hídrico, do qual faz parte e alimenta uma região com um complexo de lagoas. Assim, para um sistema lacustre altamente dinâmico e aberto temos uma relação cíclica e evolutiva.

Figura 04: Fluxograma do Sistema Lacustre de Análise das Lagoas da Região PNLM.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

As estruturas mais significativas quanto aos aspectos morfológicos de regiões costeiras estão relacionadas às formações geológicas pleistocênicas e holocênicas sensíveis e dinâmicas. Em diferentes magnitudes e frequências, o elemento geomorfológico como a linha de costa tem alta dinâmica espacial decorrentes de processos costeiros relacionados às mudanças de posição, de natureza complexa. Assim,

envolve diversos processos ligados às variações do nível do mar (em curto e longo prazo), balanço de sedimentos, movimentos tectônicos, deformações, escoamentos e ações antrópicas (CAMFIELD; MORANG, 1996, p.141-143).

Na escala geológica, os lagos são corpos d'água de curta duração, não permanentes na paisagem terrestre, além de não se ligarem diretamente ao mar podendo ter diversas origens (MEES, 2016). Complementar a essa definição de lagoas, Kjerfve (1986), considera as lagoas costeiras sendo geralmente orientadas à linha de costa e com profundidade média de um metro, de modo que a luminosidade atinge o substrato. Lagoas na abordagem de Esteves (1988a, p.11) considera que são corpos d'água rasos, de água doce, salobra ou salgada, em que a radiação solar pode alcançar o sedimento, influenciando o crescimento de macrófitas aquáticas (macroalgas) em toda a sua extensão.

O monitoramento biológico é realizado principalmente através da aplicação de diferentes protocolos de avaliação, índices biológicos e multimétricos, tendo como base a utilização de bioindicadores de qualidade de água e habitat (GOULART; CALLISTO, 2003).

Os lagos e lagoas de água doce são exemplos clássicos de "habitats isolados ou ilhados", como as ilhas, em geral, os sistemas mais antigos tendem a ter altos níveis de endemismo. O fato dos lagos serem usualmente isolados pode explicar a ampla variabilidade existente entre eles, mas a existência de características regionais, comuns a grupos de lagos, como destaca Lima (1996), reconhecendo sistemas de lagoas com uma série de características comuns com os ecossistemas lacustres.

As lagoas costeiras são particularmente vulneráveis às mudanças ambientais, pois são, por definição, habitats relativamente fechados e abrigados, com troca limitada de água do mar, encontradas em apenas 13% da zona costeira do mundo do planeta (HERBERT, 2020, p.633). Constituem ambientes ecológicos de grande importância, devido aos ecossistemas (ou mosaicos de ecossistemas) que aí se definem, caracterizados, em geral, por elevada produtividade biológica, considerados assim, uma prioridade na conservação (JOYCE *et al.*, 2005; MIRANDA *et al.*, 2012).

Na região dos Lençóis Maranhenses, a partir da precipitação pluviométrica ocorre a recarga do aquífero e elevação no nível de água do lençol freático. Decerto, as lagoas localizadas nos pontos mais baixos apresentam um maior aumento no nível da

água refletido na profundidade da coluna de água. Sazonalmente, por intermédio da evaporação a evapotranspiração ocorre a diminuição do nível do lençol freático (POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS, 2009, p.2).

As lagoas ao longo de um ciclo anual, relativo ao regime hídrico, podem ser classificadas como: lagoas temporárias que secam a cada ciclo anual; lagoas eventuais que secam em períodos excepcionalmente quentes ou após épocas de baixa precipitação pluviométrica; lagoas permanentes que nunca secam. No Brasil, excetuando a Região dos Lençóis, não houve formação de grandes sistemas lacustres, ocorrendo predominância numérica de sistemas fluviais, que se relaciona com a atividade geológica, sendo responsável pela formação da maioria dos lagos brasileiros cujas dimensões e profundidade são geralmente pequenas (< 20m), exceção de lagos artificiais, exemplo das represas.

A água também é um importante limitador na forma e crescimento das barcanas, por exemplo, em relação à altura podem atingir 15 a 20 m, pois sem as lagoas, as dunas tenderiam a crescer indefinidamente à medida que avançam para o interior (LUNA *et al.*, 2012, p. 176). Para Santos (2008, p. 89-92), a formação de cadeias barconoides são originadas da junção de dunas ativas, as barcanas, que são fixas ou livre formadas por sedimentos não coesos e em uma resultante da velocidade e direção dos ventos incidentes.

Outro ponto relevante é o crescimento da vegetação que também afeta morfologia das dunas (GONÇALVES *et al.*, 2003; LEVIN *et al.*, 2009). Variações sazonais no crescimento da vegetação podem ocorrer devido às oscilações no lençol freático afetando a dinâmica do transporte de areia dentro das dunas e, portanto, pode desempenhar um papel relevante na evolução da morfologia das dunas.

3.4 Sistema de Informação Geográfica (SIG) / Plataforma Google Earth Engine (GEE)

O termo Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para os sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica, isto é, georreferenciados. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados, sendo relacionados em um banco de dados indexados espacialmente (SMITH *et al.*, 1987).

A totalidade de uso de um SIG está na sua capacidade de realizar análises complexas a partir da integração, em uma base de dados única, de representações de dados espaciais (FELGUEIRAS, 1999). Os procedimentos de análise espacial, desenvolvidos no ambiente de um SIG, possibilitam, no estágio tecnológico atual, a análise de processos, alguns simples e outros mais complexos, do mundo real.

Para Nascimento (2009, p.26), os SIG's permitem trabalhar a informação proveniente de diversas fontes, como informação de sensores espaciais, informação recolhida com GPS ou obtida com os métodos tradicionais da topografia. Essa informação pode ter utilidade em diversas áreas do conhecimento. Contudo, respondem de maneira mais eficaz em aplicações espaciais.

Para uma das definições mais abrangentes do geoprocessamento, temos aspectos que vão além do espaço, da matemática e da informática, são os processos, as entidades e os recursos humanos envolvidos, o qual se relaciona no geoprocessamento, para Rocha (2000, p.210), como:

Uma tecnologia transdisciplinar, que através da axiomática da localização e do processamento de dados geográficos, integra várias disciplinas, equipamentos, programas, processos, entidades, dados, metodologias e pessoas para coleta, tratamento, análise e apresentação de informações associadas a mapas digitais georreferenciados (ROCHA, 2000, p. 210).

Diante da temática das tecnologias digitais, é vasta e concentrada a utilização das ferramentas Google nas diversas áreas do conhecimento, e claro na geografia, que se efetivou em uma prática que teve como foco inicial a construção cartográfica.

Em parceria com Centro de Pesquisa Conjunta da Comissão Europeia e a Organização das Nações Unidas (ONU), o Google tem realizado um empreendimento global no mapeamento geográfico, ultrapassando o limite planetário, possibilidade atingida graças aos novos métodos de processamento de dados (GORELICK, 2013). Uma das grandes ferramentas da Google é o Google Earth Engine (GEE), plataforma de computação em nuvem projetada para armazenar e processar enormes conjuntos de dados (em escala de petabytes) para análise e tomada de decisão final (MUTANGA, KUMAR; 2019).

Após a livre disponibilidade da série Landsat, em 2008, o Google arquivou todos os conjuntos de dados e os vinculou à nuvem como mecanismo de computação para uso de código aberto. O arquivo atual de dados inclui os de outros satélites, bem como

conjuntos de dados vetoriais baseados em SIG's sociais, demográficos, meteorológicos, modelos digitais de elevação e camadas de dados climáticos.

Essas parcerias auxiliaram no fornecimento de dados abertos e gratuitos sobre a extensão da água de uma forma que seja compatível com as políticas, para que os cidadãos e os governos possam avaliar facilmente o que está realmente acontecendo com os recursos naturais do mundo, começando com dados sobre a extensão da água como uma questão ambiental prioritária.

Para o presidente e CEO do Instituto de Recursos Mundiais Andrew Steer:

O Google Earth Engine tornou possível, pela primeira vez na história, processar com rapidez e precisão grandes quantidades de imagens de satélite, identificando onde e quando a mudança na cobertura das árvores ocorreu em alta resolução [...] (GOOGLE, 2019, p. 5-6).

O GEE fornece acesso a cobertura mundial dos satélites MODIS, LANDSAT e outras imagens de outros satélites, o que inclui quase 40 anos de séries históricas LANDSAT (PATEL *et al.*, 2015). Dessa maneira, a plataforma não só torna viável o estudo de uma série temporal de quase 40 anos, como também pode relacionar os dados de precipitação de forma simples e com rápido processamento. A maior parte do catálogo do GEE é composto por imagens de sensoriamento remoto que observam a Terra, incluindo todo o arquivo Landsat, como mostrado na tabela 01.

Tabela 01: Conjuntos de dados Landsat no catálogo de dados do GEE.

| Conjunto de dados | Resolução espacial | Tempo de revisita | Série temporal | Cobertura espacial |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Landsat 8 OLI/TIRS | 30 m | 16 dias | 2013 – Atualmente | Global |
| Landsat 7 ETM+ | 30 m | 16 dias | 2000 – Atualmente | Global |
| Landsat 5 | 30 m | 16 dias | 1984 – 2012 | Global |

Fonte: USGS/GOOGLE, 2020.

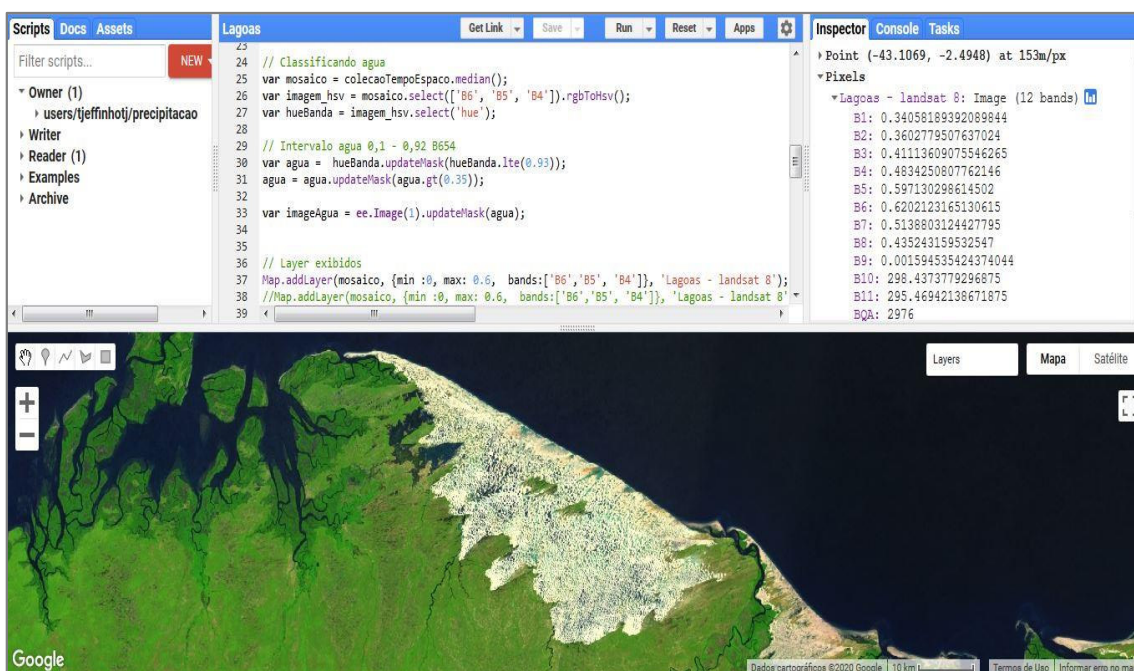
Para uma análise integrada de dados climáticos descrevendo condições previstas e medidas em determinado período de tempo, incluindo: precipitação, temperatura, umidade e vento e outras variáveis. O GEE possui uma biblioteca gigantesca quanto aos dados de previsão, baseados no Sistema Global de Previsão da NOAA (GFS), no Sistema de Previsão Climática do NCEP (CFSv2) e além de dados de sensores de fontes como a *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM).

A interface da API GEE (API - *Application Program Interface*) em conjunto com outras ferramentas permitem a análise de grandes conjuntos de dados pelo usuário,

bem como desenvolver e aplicar algoritmos ao conjunto de dados de imagens do Google Earth disponíveis, através da plataforma de computação em nuvem.

O Editor de códigos do Earth Engine é um IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) baseado na Web para a API JavaScript do Earth Engine. Os recursos do Editor de códigos foram projetados para tornar o desenvolvimento de fluxos de trabalho geoespaciais complexos de forma rápida e fácil. Também possui diversos elementos que ajudam na codificação, importação e exportação das camadas de resultados em um ambiente de desenvolvimento totalmente (figura 05).

Figura 05: Interface Google Earth Engine e demais funcionalidades.



Fonte: GEE, 2020.

Pode-se verificar o uso conjunto dos SIG's na perspectiva tanto qualitativa como quantitativa na análise descritiva da natureza. Decerto, a organização dos produtos da empresa Google em conjunto com os SIG's gera grande potencial de análise espacial e apresenta versatilidade de uso para desenvolver outras ferramentas no âmbito de identificar problemas ambientais e resolvê-los. Ademais, ficou evidenciado em diversas pesquisas científicas a importância do uso das tecnologias no contexto de aprimorar e potencializar o uso de novas linguagens e abordagens para compreender o ambiente natural e antrópico.

3.5 Análise Multitemporal das coleções de imagens

Diante disso, vários procedimentos se destacam na literatura acadêmica, como por exemplo: comparar classificações de cobertura, diferenciação de imagem, índice de diferença normalizada da água (NDWI), análise de componentes principais (PCA), análise de variáveis vetoriais, e entre outros, a análise multitemporal (MEI *et al.*, 2016; BITENCOURT, 2018; PEREIRA *et al.*, 2019).

A análise multitemporal é uma importante ferramenta para o estudo da evolução ambiental de uma área, pois estabelece comparações de uma mesma paisagem entre dois ou mais períodos, auxiliando assim, o monitoramento e/ou diagnóstico dessas regiões (RICHARDS, 1993; MESQUITA, 1998; PARANHOS, 2000; GRIGIO *et al.*, 2005).

Nestas análises são importantes a utilização de ferramentas adequadas para a possibilidade de combinação de técnicas, para que assim, tenha-se bons resultados na correlação das bandas de imagens multitemporais de regiões com intensas modificações em regiões dinâmicas (GALLO, 2015). Diante disso, a análise multitemporal é uma excelente ferramenta, pois utiliza imagens de satélite de determinada área em períodos distintos, não se restringindo a usar imagens de um mesmo sensor na coleta de informações (MOREIRA, 2011).

O mapeamento do complexo de lagoas torna-se viável pela comparação de imagens coletadas em séries temporais, viabilizando com isso o reconhecimento dos padrões espaciais apresentados no tempo e no espaço, com a escala definida, além da quantificação das alterações encontradas (FLORENZANO, 2008). O mapeamento sistemático com uma abordagem geográfica de determinada região e o acompanhamento de suas mudanças, quanto a dinâmica superficial das lagoas, é de grande importância, pois representam ferramentas para a geração de informações de grande valor para o planejamento e gerenciamento costeiro do parque.

As imagens de sensores remotos de diferentes épocas convertem a análise multitemporal em uma excelente ferramenta para auxiliar o estudo ao estender informações pontuais de uma área para um contexto geográfico, possibilitando o entendimento da história evolutiva desses sistemas (TREBOSEN *et al.*, 2005; CHU *et al.*, 2006; FARIAS; MAIA FILHO, 2018).

3.6 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

O clima é de importância fundamental para a fisiologia e ecologia dos organismos, e a variabilidade climática tem uma influência crítica no comportamento, evolução e conservação de muitas, se não a maioria das espécies (CLARKE; 2017). Diante do elevado custo e a dificuldade na obtenção de informações das estações meteorológicas convencionais na área de estudo, simulações numéricas e dados de satélite foram escolhidos como seguimento para gerar informações detalhadas para os estudos climatológicos e hidrológicos.

Considerando a área da região das lagoas dos Lençóis Maranhenses, tanto para Longo *et al.* (2006, p.141-142), como para Adams *et al.* (2009, p.169), os dados orbitais e geoestatísticos contribuem para o aumento da cobertura de análise climática. Dessa forma, é indispensável o uso de satélites para suprir a escassez de dados em regiões que não possuem estações pluviométricas ou que não abrangem todo o seu território (SANCHEZ-MORENO *et al.*, 2014).

Dentre os diversos satélites existentes para monitoramento de elementos meteorológicos remotamente, estão disponíveis os dados do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) que é alimentado por produtos de dados observacionais baseados em satélite e em terra, usando assim, técnicas avançadas de modelagem e assimilação de dados da superfície terrestre (tabela 02).

Tabela 02: Conjuntos de dados disponíveis do TRMM no catálogo de dados do GEE.

| Conjunto de dados | Resolução espacial | Tempo | Série temporal | Cobertura espacial |
|-------------------------|--------------------|---------|----------------|--------------------|
| TRMM 3B42 precipitation | 15° | 3 horas | 1998 - 2015 | 50°N–50°S |
| TRMM 3B43 precipitation | 15° | 1 mês | 1998 - 2019 | 50°N–50°S |

Fonte: NASA GES DISC, 2020.

Lançado em novembro de 1997, o TRMM, em parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), teve como objetivo principal monitorar a precipitação nos trópicos, correspondendo com a área de estudo. Além disso, verificar a influência da precipitação no clima global (KUMMEROW *et al.*, 2000).

O TRMM fornece dados mais precisos do que técnicas indiretas baseadas em imagens de outros satélites. Dessa forma, apresenta-se como o mais equipado em termos de instrumentos para estimativa de precipitação (VOLPATO *et al.*, 2013; MAHMUD,

2014). Entretanto, para garantir que esse satélite forneça estimativas consistentes é necessário validar essas informações com as medidas de superfície, visando quantificar sua precisão e exatidão (KUMMEROW *et al.*, 2000; KARASEVA *et al.*, 2011).

Trabalhos identificaram que a topografia pode afetar o desempenho da precipitação do TRMM (MILEWSKI *et al.*, 2015; EL *et al.*, 2015), especialmente em termos de detecção probabilidade e viés. Para Zhao *et al.* (2018) regiões com terrenos complexos exibiram fraca detecção de chuva e erros médios dependentes da magnitude. O TRMM pode estimar eventos de precipitação abaixo de 1000 m com precisão, porém enfrenta dificuldades na área de elevações com alto teor de neve e regiões costeiras com terrenos complexos e baixa precipitação.

Em 2014, a *Global Precipitation Mission* (GPM) foi lançada como uma continuação do projeto TRMM com o objetivo de observar a precipitação global com mais frequência e precisão. O design do GPM é baseado na melhoria das deficiências do TRMM, ou seja, baseado em um estudo profundo de desempenho. No entanto, apesar de ter um período significativo de registros de chuvas, no nordeste maranhense, mais precisamente, na região dos lençóis, ainda são escassas e pouco sólidas.

Para uma análise em escala temporal e espacial também afeta o desempenho das estimativas do TRMM. Existem algumas incertezas que tornam a sensibilidade das chuvas em escala local em uma pequena região passíveis de contestação (MAHMUD *et al.*, 2015).

Já existem vários estudos de validação e precisão desses dados de precipitação por satélite, das quais foram implementados com vista a fornecer informações aos utilizadores e fornecedores sobre a qualidade das estimativas de precipitação por satélite (KRAJEWSKI *et al.*, 2000; MCCOLLUM *et al.*, 2002; ADLER *et al.*, 2003; GOTTSCHALCK *et al.*, 2005; BROWN, 2006; EBERT *et al.*, 2007; DA SILVA-FUZZO, ROCHA, 2016; ZAD *et al.*, 2018; DUARTE; SILVA FILHO, 2019).

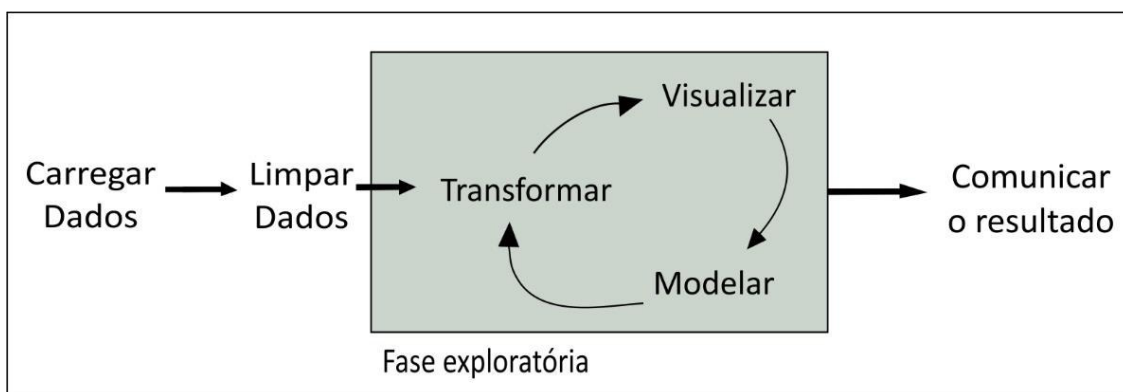
3.7 A linguagem R e o RStudio no tratamento estatístico

A linguagem R é uma linguagem de programação eficiente para análise espacial de dados, por isso se destaca cada vez mais nas áreas relacionadas ao geoprocessamento, SIG e sensoriamento remoto.

O R é um software de código aberto gratuito, multiplataforma, para análise estatística, programação, mineração de dados e gráficos, criado por Robert Gentleman e Ross Ihaka, em 1993. Cresceu em popularidade na década de 1990, tornando-se um dos pacotes estatísticos mais usados, classificado entre as 5 linguagens mais populares de ciência de dados pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) em 2019 (IEEE, 2020).

Para a análise espacial com o uso do R devemos tangenciar a Ciência de Dados, ou seja, trabalhar com a organização do fluxo de dados e, para isso, deve-se abordar uma forma de estruturar e aplicar os conhecimentos de forma lógica (workflow). A forma de aplicação varia bastante conforme a necessidade ou o objetivo que se almeja na pesquisa. Nesta pesquisa, usou-se um modelo de workflow bastante conhecido academicamente de Hadley Wickham e Garrett Golemund (2016), exemplificado na figura 06.

Figura 06: Fluxo de dados (workflow).



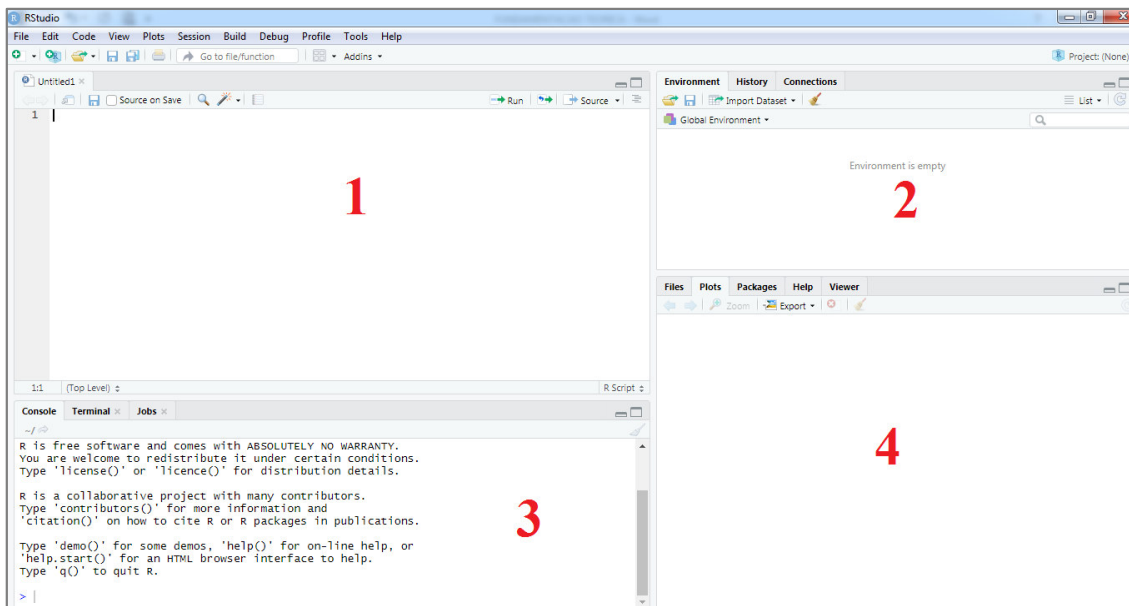
Fonte: adaptado de Wickham; Golemund, 2016.

O R é uma linguagem de programação estatística que vem passando por diversas evoluções e se tornando cada vez mais uma linguagem de amplos objetivos. Podemos entender o R também como um conjunto de pacotes e ferramentas estatísticas, munido de funções que facilitam sua utilização, desde a criação de simples rotinas até análises de dados complexas, com visualizações elegantes (OLIVEIRA; GUERRA; MCDONNEL, 2018). A página oficial do Projeto R pode ser acessada através do endereço: <https://www.r-project.org/>.

O RStudio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), ou seja, uma interface gráfica com diversas funcionalidades que melhoram ainda mais o uso, o aprendizado, as funcionalidades e por fim os resultados da linguagem de programação. A IDE pode ser baixada em: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/>.

A figura 07 mostra quatro janelas básicas da interface do RStudio. A seção no canto superior esquerdo é chamada de editor de scripts (1). A parte superior direita (2) contém a seção de ambiente, onde as variáveis são exibidas, mostrando a seção de histórico e execuções anteriores e a seção de conexões mostra o servidor ou os links da web. As janelas desta seção podem ser alteradas a partir das configurações. Os programas funcionais podem ser escritos com funções e códigos na seção do editor de scripts. A parte inferior esquerda é o console e a janela do terminal (3), ou seja, a saída dos códigos escritos pode ser vista na seção do console. A seção inferior direita (4) contém: a seção padrão de pastas e arquivos; resultado de plotagens mostrando gráficos; mostra pacotes de downloads e bibliotecas já baixadas; possui seção de ajuda; a janela do visualizador que mostra mapas e desenhos.

Figura 07: Interface RStudio e funcionalidades.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Em breve revisão literária, destacam-se muitos trabalhos que usam softwares livres para o aperfeiçoamento da visualização de dados espaciais, como: espacialização de dados na epidemiologia, tão importante na atualidade; visualização de dados em larga escala espacial; análise interativa do crescimento de árvores em uma cidade; combinação e sobreposição de dados espaciais, essencial de um SIG; análise de potencial eólico de uma região; visualização do volume de intensidade dinâmica, com dados geográficos; e soluções com SIG para adequação da análise espacial com grande volume de dados (*Big Data*) (RYTKÖNEN, 2004; POPOV, 2006; BRASCH *et al.*, 2009; BIMONTE *et al.*, 2010; IBRAHIM *et al.*, 2015; DU *et al.*, 2016; YOUSEFI *et al.*, 2019).

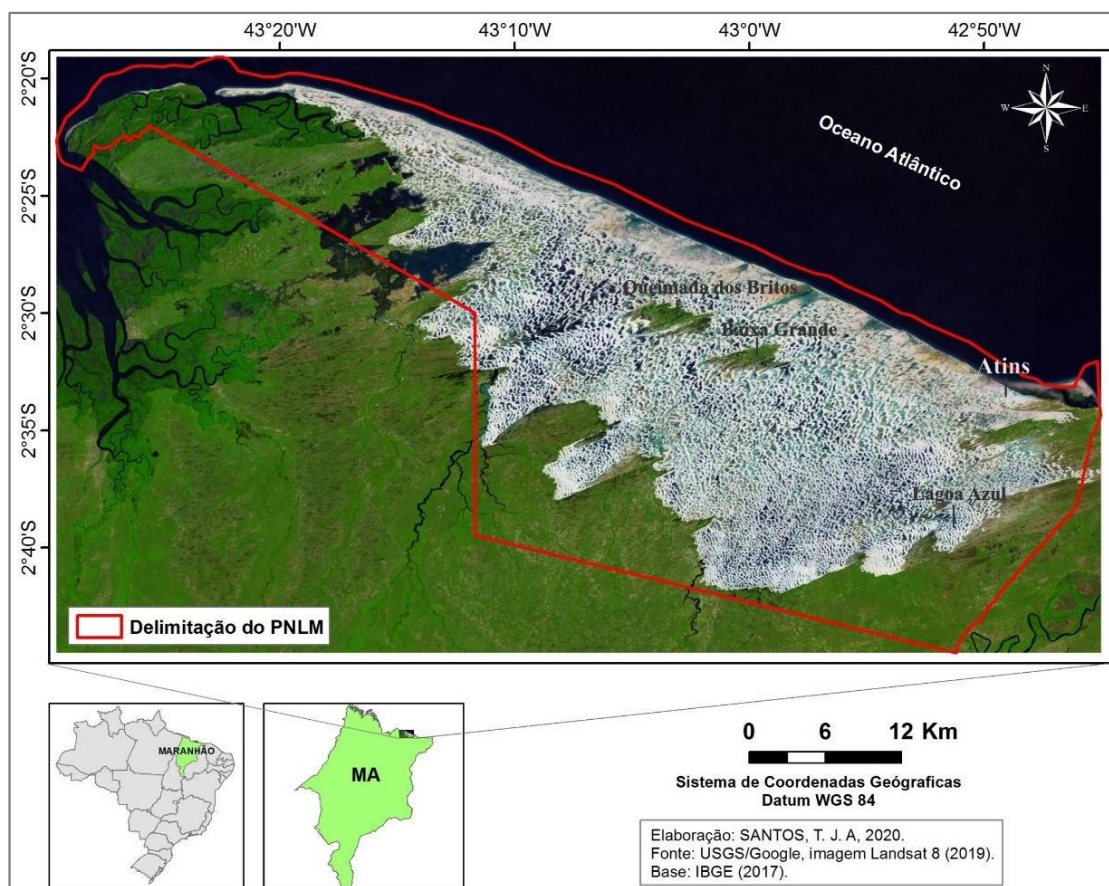
4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e delimitação da área

No Estado do Maranhão, a costa apresenta uma extensão de aproximadamente 640 km, estendendo-se no sentido Oeste-Leste da foz do rio Gurupi, na divisa com o estado do Pará, até o delta do Rio Parnaíba no limite com o Estado do Piauí (SILVA; LIMA, 2017, p.2758).

O Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses localizado no litoral oriental é caracterizado pela predominância de extensas áreas de lagoas e dunas de areias que apresentam mobilidade influenciada por processos eólicos e correntes oceânicas (PALMA, 1979). O complexo de lagoas de dunas dos Lençóis Maranhenses, objeto de estudo desta pesquisa, está na Zona Costeira do Estado do Maranhão, no litoral entre as seguintes coordenadas geográficas: 02° 14' 26'' e 03° 26' 25'' lat. S; 44° 15'24'' e 41° 47' 37'' long. W (figura 08).

Figura 08: Localização do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Delimitado no decreto nº 86.060 de 02 de junho de 1981, o Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses (PNLM) foi criado com uma área de 155.000 ha (BRASIL, 1981). Inserido nos municípios de Primeira Cruz, Santo Amaro e Barreirinhas, o PNLM é classificado como uso indireto dos recursos, exprimindo a não ocupação do espaço para exploração direta, ou seja, os atrativos naturais devem integrar atividades de lazer com a educação e sensibilização ambiental (BRUCK *et al.*, 1995; MOREIRA, 2008).

Em abrangência territorial, o PNLM está contido nas mesorregiões norte e leste maranhense e nas microrregiões dos Lençóis Maranhenses, Rosário, Baixo Parnaíba Maranhense, Chapadinha e Itapecuru-Mirim (IBGE, 2002). Neste setor da planície costeira maranhense existe o maior registro de dunas costeiras do Brasil desenvolvidas ao longo do quaternário e maior registro de sedimentação eólica da América do Sul (GONÇALVES *et al.*, 2003, 2005). Podemos caracterizar a paisagem principalmente pela presença de barcanoides e dunas transversais separadas na estação chuvosa por lagoas cristalinas (figura 09).

Figura 09: Lagoas interdunares na região de Santo Amaro-MA.



Fonte: Acervo de pesquisa, 14/06/2018.

Quanto ao complexo de sistemas de lagoas e de dunas do PNLM, podem ocorrer subsistemas mais semelhantes entre si, interação de lagoas menores, devido à grande área da Unidade de Conservação, 150.000 hectares. Segundo Leentvaar (1997), as lagoas de dunas são geralmente pequenas e rasas, muitas desaparecem na época da estiagem.

Alguns estudos destacam a relação entre as lagoas temporárias e as cadeias de dunas, pois na estação chuvosa as lagoas entre cadeias de dunas são as responsáveis por suavizar e alongar as curvas das cadeias de dunas barcanoides, criando a forma encontrada nos Lençóis Maranhenses (PARTELI *et al.*, 2006; LUNA *et al.*, 2012).

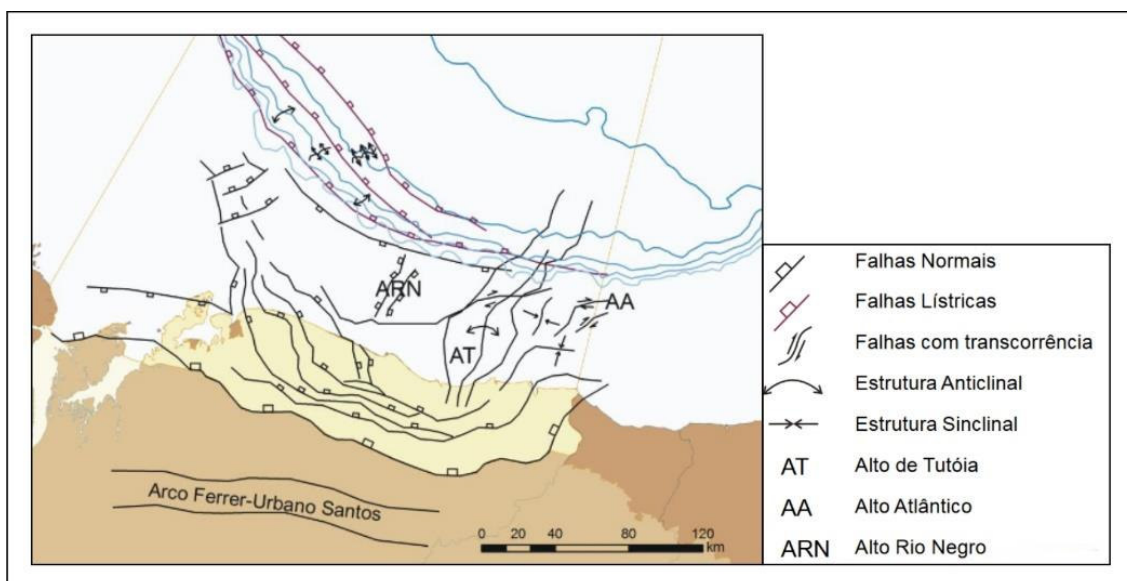
4.2 Geologia

Ao estudar estruturas de origem sedimentar, a geologia se orienta a entender se o sedimento foi depositado acima ou abaixo do nível do mar, isto é, se é ou não de origem marinha. Para sedimentos marinhos, o estudo é em relação a profundidade da deposição, ou seja, sobre a posição de nível do mar em relação ao ambiente sedimentar. Neste sentido, entender profundidade de deposição é um fator relevante para determinar os principais padrões de fácies do material acumulado nele (SEIBOLD; BERGER, 2017).

Onde o nível do mar cruza a margem continental, processos físicos, químicos e biológicos são de alta intensidade (SEIBOLD; BERGER, 2017, p.75). Dessa forma, áreas expostas estão sujeitas a erosão, enquanto áreas submersas geralmente recebem sedimentos. Em áreas costeiras, a erosão e a deposição são processos no nível do mar ou próximo dele que são indicadores do nível do mar, além disso eles ajudam a determinar a morfologia costeira (SEIBOLD; BERGER, 2017, p.75-76).

Quanto aos eventos de transgressões e regressões marinhas (hidroisostasia) ocorridas desde o Pleistoceno, estes depositaram sedimentos ao longo do continente e formaram sucessivos campos de dunas ao longo dos últimos 100 mil anos (PARTELI *et al.*, 2006). Para Suguío *et al.* (2018, p. 284), as flutuações do nível relativo do mar, associadas a modificações climáticas no decorrer do Quaternário, desempenharam um papel fundamental na formação das planícies sedimentares do litoral brasileiro, o que torna o complexo de lagoas do PNLN uma excelente região de estudo para relacionar morfologia costeira e alterações climáticas regionais.

De rara formação geológica, a região do PNLN limita-se ao norte com o oceano Atlântico, ao sul com os tabuleiros dissecados da Formação Barreiras, a leste com o rio Parnaíba (PI) e a oeste com a baía de São José (MA) e o rio Itapecuru. Quanto aos limites, a bacia sedimentar cretácea de Barreirinhas é limitada ao norte pelo Alto Atlântico; ao sul, por uma série de falhamentos normais e pelo Arco Estrutural Ferrer-Urbano Santos (figura 10).

Figura 10: Geologia Estrutural da região do PNLM.

Fonte: Adaptado de Azevedo (1986).

Estes arcos permitiram a erosão do pacote sedimentar superior da Bacia do Parnaíba e influenciaram fortemente na evolução das bacias de margem continental (CPRM, 2000).

A Bacia de Barreirinhas limita-se a oeste por estruturas tectônicas positivas dentro de um sistema de falhas gravitacionais, de leste-oeste, em blocos (*horst*) de Rosário que separa a bacia de São Luís. Para o leste, a bacia se limita até o Alto de Tutóia. A espessura máxima da bacia é de 7000 m e ocupa uma área de 85.000 km² dos quais 75.000 são submersos (POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS, 2004).

A posição intracratônica do Meio-Norte (Maranhão-Piauí) favoreceu a formação da estrutura geológica sedimentar, oriundas de transgressões e regressões marinhas, combinadas com movimentos subsidentes e arqueamentos ocorridos desde o início do Paleozoico ao final do Mesozoico (MARANHÃO, 1984). Durante os movimentos negativos eram depositados sedimentos marinhos, acumulando-se arenitos, folhelhos e calcários, enquanto que durante os movimentos epirogenéticos positivos depositaram-se sedimentos basálticos de origem continental (IMESC, 2007).

A região continental adjacente às bacias marginais de Barreirinhas e São Luís tem somente magmatismo trapeciano Jurássico-Eocretáceo da bacia epicontinental do Parnaíba (ALMEIDA, 2017, p.133). O Arco Ferrer-Urbano Santos, responsável pelos afloramentos de rochas pré-cambrianas, mais importantes na área do Gurupi, e pela

fragmentação da grande bacia sedimentar, dando origem às bacias epicontinentais de São Luís e Barreirinhas (MARANHÃO, 1984).

O Quaternário (Holoceno) é representado pelos depósitos litorâneos marinhos e depósitos eólicos, muito extensos na região de Barreirinhas-Humberto de Campos e por aluviões flúvio-marinhos do Golfão Maranhense e do estuário do rio Turiaçu. A região apresenta um forte controle estrutural (COSTA *et al.*, 1991), seguindo as orientações das falhas normais NW-SE e falhas transcorrentes NE-SW, a qual segue a orientação geral da drenagem, vinculadas a uma movimentação dextral e projeção em crosta continental da Zona de Fratura Romanche, do Quaternário e Terciário (SOARES *et al.*, 2008).

A exploração da Bacia de Barreirinhas foi concentrada nas décadas de 70 e 80 que proporcionaram grande impulso nas pesquisas referentes a essa bacia. O último poço perfurado na parte terrestre foi em 1987, enquanto na parte marítima foi em 1988. De acordo com Ferreira (2013, p.14), novos dados estratigráficos advindos de poços foram incorporados ao conhecimento geológico dessa bacia da margem equatorial desde a publicação pioneira da Petrobras sobre as cartas estratigráficas das bacias brasileiras.

Recentemente, geólogos da Petrobras novamente se mobilizaram para um processo extensivo de revisão das cartas estratigráficas. Diversas bacias tiveram uma enorme evolução do conhecimento desde 1994, a exemplo das bacias da margem equatorial brasileira (quadro 01). Dessa forma, obteve-se a aquisição de um volume novo de informações sobre dados geológicos e geofísicos e pela evolução natural do conhecimento acumulado.

O arcabouço estratigráfico da Bacia de Barreirinhas teve estudos pioneiros como: Noguti & Santos (1972), Pamplona (1969, 1972), Soares Jr. (2002), Zalán (2004) e Milani *et al* (2007). Seguindo a descrição dos autores, o embasamento cristalino da Bacia de Barreirinhas é constituído por gnaiss, granitos e quartzo-mica xisto de idade Pré-cambriana, e sobrepõem-se a estas rochas o pacote sedimentar cretáceo, formado pelo Grupo Canárias e Caju, conforme descrito por Feijó (1994), no quadro 02.

Quadro 02: Estratigrafia Meso-Cenozoica da bacia de Barreirinhas.

| PERÍODO | GRUPO | FORMAÇÃO SEDIMENTAR | COMPOSIÇÃO |
|-------------|--------------------|----------------------|---|
| Quaternário | - | Açuí | Areias e argilas inconsolidadas da zona litoral |
| Terciário | - | Pirabas | Calcário creme-claro, mole,ossilífero, folhelho vermelho a cinza esverdeado |
| | Humberto de Campos | Areinha | Arenitos finos, folhelhos, siltitos e calcilitos |
| | | Ilha de Santana | Folhelhos, margas, calcarenitos e calcilitos |
| | | Travosas | Arenito avermelhado, caulínico com folhelho |
| Cretáceo | Caju | Periá | Folhelhos cinzentos com calcarenitos |
| | | Preguiças | Calcilito creme |
| | | Bonfim | Calcarenito bioclástico e oncolítico |
| | Canárias | Barro Duro | Arenito fino a grosseiro |
| | | Tutóia | Folhelhos escuros |
| | | Bom Gosto | Arenito com folhelhos |
| Arpoador | | Folhelhos e arenitos | |
| Jurássico | Canárias | Corda | Arenito argiloso, silito, folhelho e sílex |
| | | Pastos Bons | Silito vermelho e calcário róseo |

Fonte: Adaptado de Brandão (1990) & Feijó (1994).

O Grupo Canárias compreende as formações Arpoador, Bom Gosto, Tutóia e Barro Duro (PAMPLONA, 1969), diferente do Grupo Caju que compreende as formações Bonfim, Preguiças e Periá. Dessa forma, Figueiredo *et al.* (1983 *apud* FEIJÓ, 1994) relacionam o Grupo Caju a uma idade Albo-Cenomaniana caracterizando-a como um ambiente marinho transicional.

A Formação Pirabas (Cretáceo Superior/Terciário) corresponde a um pacote de rochas, com 3500m de espessura, formado por conglomerados, arenito continental e marinho, folhelhos e calcários marinhos (GONÇALVES, 1997), que se desenvolve por toda a bacia, capeando os sedimentos cretáceos.

A Formação Arpoador representa a unidade basal do pacote sedimentar sendo constituído por folhelhos e arenitos, assentados discordantemente sobre os sedimentos pré-cretáceos e/ou embasamento. A Formação Bom Gosto é predominantemente arenosa com alternância de folhelhos sobrepondo-se à Formação Arpoador em discordância litológica. A Formação Tutóia se caracteriza por uma sequência transgressiva de folhelhos escuros, assentando-se sobre a Formação Bom Gosto e Arpoador. A Formação Barro Duro compreende arenitos quartzosos de coloração branca a cinza-claro esverdeados, de granulometria variando de fino a grosseiros, caracterizando depósitos de leques deltáicos em ambiente marinho (SOARES JUNIOR *et al.*, 2008).

Para Ab'saber (1960), a forma atual da zona costeira do estado do Maranhão é produto da evolução do Golfão Maranhense, que teve início no final do Terciário (Plioceno), ocorrendo o soerguimento da faixa litorânea, provocando a sobreposição da rede de drenagem e conseqüentemente a erosão da Formação Barreiras. No evento seguinte, final do Pleistoceno, houve a retomada da erosão e aprofundamento dos vales e uma moderna transgressão marinha.

Os sedimentos do Quaternário na Bacia de Barreirinhas estão representados pela Formação Açuí que ocorre em ambientes marinhos litorâneos constituída por depósitos em planícies flúvio-marinhas, aluviões, praias, restingas e dunas (PEREIRA, 2006). Caracteriza-se por areias quartzosas e pequenas proporções de minerais pesados, compreende sedimentos arenosos inconsolidados, uma matriz argilosa em função do ambiente de deposição eólica, fluvial ou litorânea não adensados que preenchem as partes topograficamente mais baixas e pelas areias de praias e das dunas móveis da faixa litorânea atual (RODRIGUES *et al.*, 1994). Esses sedimentos cobrem totalmente a Bacia de Barreirinhas em forma de campo de dunas livres (móveis) e fixas.

4.3 Geomorfologia

Estudos sobre a gênese de ecossistemas lacustres litorâneos brasileiros evidenciam que na sua formação participam processos fluviais, marinhos e fluviomarinhos. Em consequência, são encontradas lagoas de água doce, lagoas com

características estuarinas ou marinhas. Tratam-se de ecossistemas bem diferenciados quanto a gênese, fauna e flora (ESTEVEES *et al.*,1984). A unidade integrante geomorfológica da região de lagoas dos Lençóis Maranhenses discrimina-se no subsistema ambiental: costa de dunas e restingas, como destaca Feitosa (2006):

A costa de dunas e restingas é constituída de formações superficiais exclusivamente arenosas com ausência de cobertura vegetal ou com cobertura vegetal parcial conformando dunas móveis e fixas intercaladas por lagoas de origem pluvial, contendo água doce (FEITOSA, 2006, p. 6).

O PNLM é caracterizado por formação dunas, que se movem e se remodelam constantemente de acordo com o tecido marinho e os cursos de água. O maior acúmulo de água ocorre no período chuvoso (janeiro a junho), pois a chuva é o principal fator responsável pela formação das lagoas que ocupam as depressões entre dunas, alimentadas pelo excedente hídrico acumulado pelas dunas (FEITOSA, 2005).

Na faixa sublitorânea da porção oriental, constituída pelo Lençóis Maranhenses, podem ser verificados duas épocas de formação de dunas, de transgressão marinha (Flandriana), quando as grandes oscilações das marés, permitiam, durante a baixa-mar, a exposição de larga faixa arenosa (SILVA, 2011). O vento constante, transportando o farto material arenoso para o continente, originou dunas que recobriram grandes extensões podendo ser assinaladas algumas localizadas a mais de 100 km do litoral. Seguiu-se uma fase climática mais úmida, responsável pela fixação das mesmas, que foram parcialmente edafizadas (MARANHÃO, 1984).

Bem mais recente, há pelo menos 3.000 anos, com uma nova fase seca, surgiu uma segunda etapa com a formação de novas dunas que recobrem uma franja de terra ao longo do litoral (MAIA *et al.*, 2011). Outra fração dos Lençóis é representada pelos campos de deflação, muito associados à gênese das dunas (MMA, 1996).

A planície costeira em que se insere o PNLM, e respectiva zona de entorno, caracteriza-se por apresentar um relevo suave a moderadamente ondulado, no qual são comuns extensos campos de dunas móveis, caracterizado pela presença de dunas barcanoides transversais separadas por lagoas interdunares, com altura média em torno de 15 a 30 m (LUNA *et al.*, 2012, p. 170) (figura 11).

Figura 11: Lagoas interdunares próximas ao município de Santo Amaro-MA.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

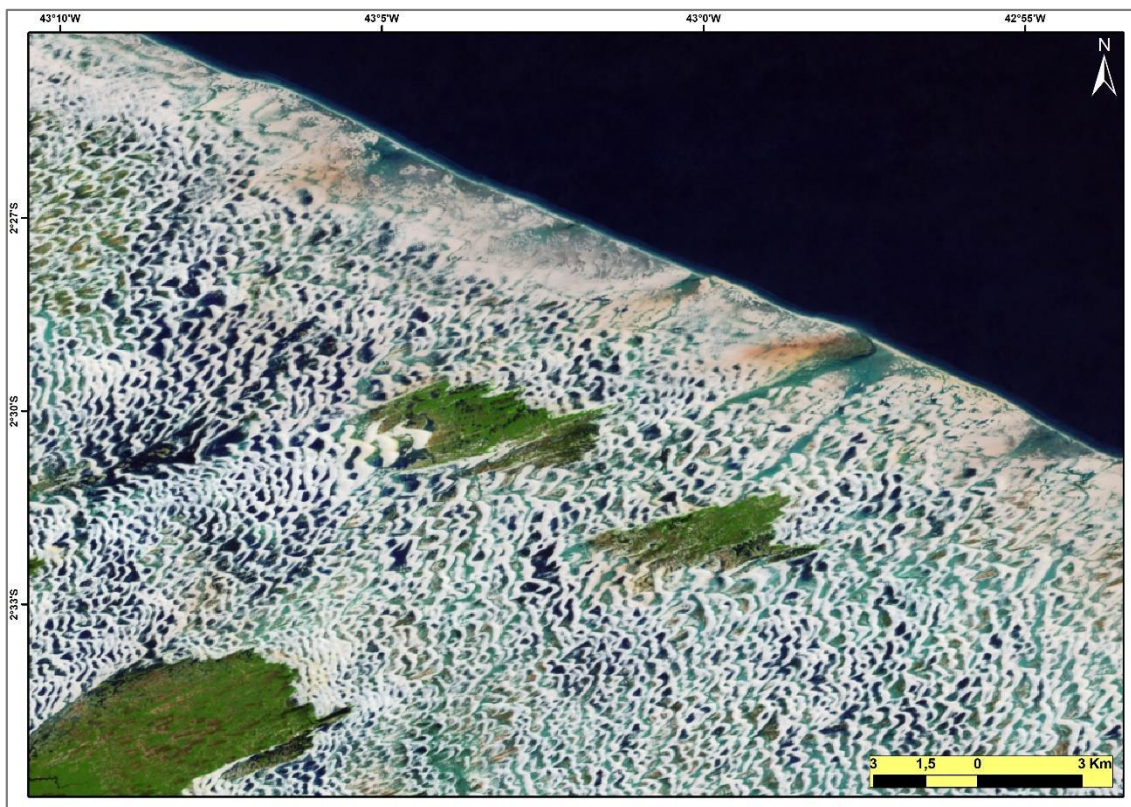
Na planície deltaica do rio Parnaíba, constituído predominantemente por sedimentos fluviais com forte influência marinha, também ocorrem recobrimentos parciais de depósitos dunares devido à intensa atividade eólica. O deslocamento de depósitos arenosos na faixa costeira neste trecho induz a depósitos dunares e cordões arenosos marinhos na foz de inúmeros rios, podendo criar barragens naturais gerando, normalmente, lagoas costeiras (MMA, 1996).

Na região os cordões de depósitos marinhos e fluviomarinhos tendem a se processar na direção leste-oeste, direção predominante dos ventos alísios, bem como os depósitos eólicos continentais que se revelam através dos extensos campos de dunas (POMPÊO; MOSCHINI-CARLOS, 2009).

4.4 Hidrografia

A hidrografia da área é caracterizada pela presença de baías, rios, córregos, lagos e lagoas. Segundo Santos (2008), as baías de São José e Tutóia são as que merecem maior destaque na região. A região marcada por vários rios que drenam e cortam os depósitos sedimentares ali existentes, formando, em alguns casos, profundos vales. A orientação geral S-N, drenam as lagoas presentes nos interdunas durante a estação de chuvas (figura 12).

Figura 12: Lagoas e drenagens intermitentes que cortam o campo de dunas dos Lençóis Maranhenses durante a estação de chuvas (mosaico de imagens - Landsat 8).

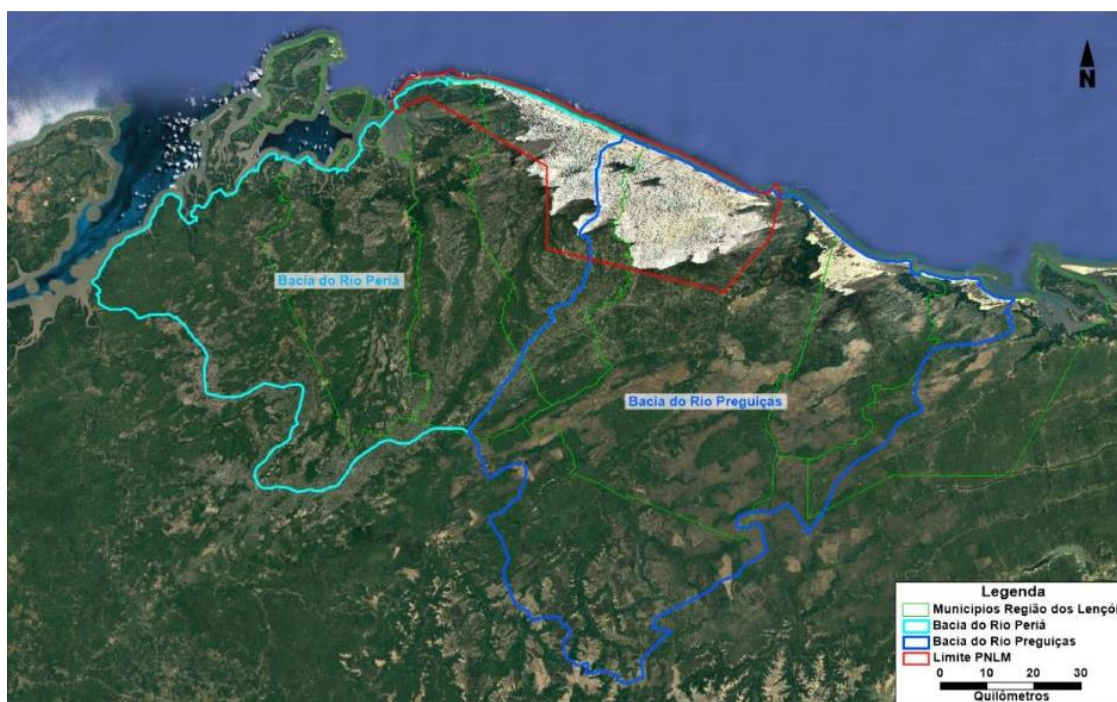


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para Gastão e Maia (2010), a ocorrência de um padrão de drenagem paralelo a retangular sobre esses terrenos soerguidos dos Lençóis Maranhenses reforça o controle estrutural sobre a porção leste-sudeste dessa unidade geomorfológica. Assim com pequenas bacias do Norte, destacando-se os rios Preguiças, Negro, Grande, Peria e Mirim. Além desses, os lagos de Santo Amaro e da Travosa e as lagoas da Betânia e Esperança, que são perenes e como as lagoas interdunares, em sua maioria ocorrem no período das chuvas, são importantes na hidrografia da região.

O PNLM está inserido nas bacias hidrográficas dos rios Preguiças e Peria que se localiza a nordeste do Estado na região hidrográfica do Atlântico Nordeste ocidental (figura 13). A bacia hidrográfica do rio Preguiças tem uma área de 6.750 km² e uma extensão de 125 km (MARANHÃO, 2002, p.11) correspondente a 2,02% da área do Estado.

Figura 13: Extensão das bacias hidrográficas dos rios Peria e Preguiças.



Fonte: Agência Nacional das Águas (ANA) Portal de Dados Abertos – Bacias Hidrográficas Ortocodificadas. Vetores corrigidos pelo modelo de elevação construído com dados provenientes do Alos Palsar e imagens de alta resolução da área costeira.

O rio Preguiças nasce no interior do continente (região Nordeste), segue sinuoso até desaguar no oceano, a noroeste da localidade de Atins no município de Barrerinhas-MA. Na bacia encontram-se dez municípios, entre os quais dois possuem sedes localizadas dentro dela e apenas um município, Paulino Neves-MA, encontra-se totalmente inserido na bacia do Preguiças. Com uma população total de 96.379 habitantes, essa bacia representa 1,5% da população estadual e sua densidade demográfica é de 14,37 hab./km² (MARANHÃO,2011, p.20; IBGE, 2010).

Na bacia hidrográfica do rio Peria encontram-se localizados seis municípios, desses apenas três possuem sedes localizadas dentro dela. Porém, nenhum deles se encontra totalmente inserido na bacia do rio Peria. Com uma população total de 64.049 habitantes, essa bacia representa 1,0% da população do estado. A densidade demográfica é de aproximadamente 18,87 hab./km² (MARANHÃO, 2011, p.20; IBGE, 2010).

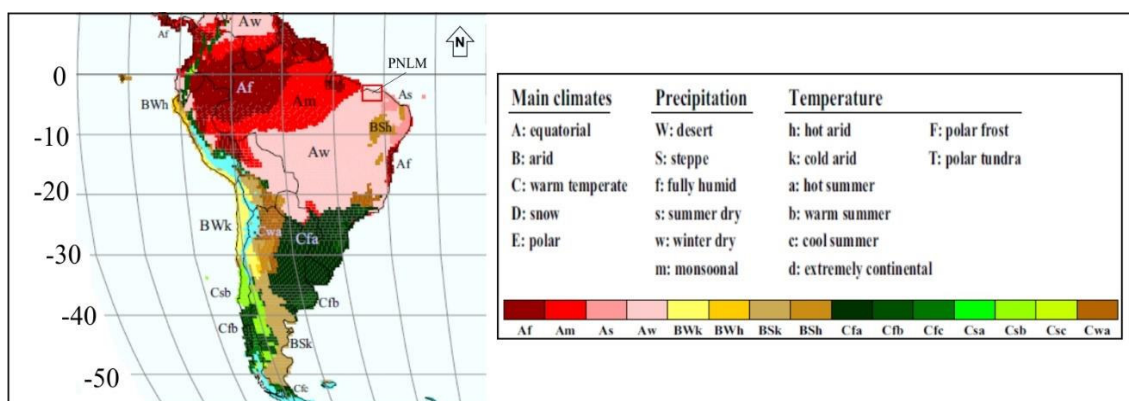
O rio Peria possui 98,17 km de extensão, com característica principal da hidrodinâmica na foz do sistema estuarino e uma amplitude de maré na sua foz em torno de 180 cm (HARARI *et al.*, 1995). Com influência das marés e característica de foz larga e orlada por exuberante vegetação de mangue, as quais influenciam também o ritmo de vida da população local (ANA, 2006; PNRH, 2006).

4.5 Clima

O mapa de classificação climática mais usado é o de Wladimir Köppen, apresentado em sua versão de 1961 por Rudolf Geiger. Um grande número de estudos climáticos e publicações adotaram este ou um lançamento anterior do mapa de Köppen-Geiger. Destaca-se que o conceito de classificação climática tenha sido amplamente aplicado a uma ampla gama de tópicos na pesquisa sobre clima e mudanças climáticas, bem como em aspectos físicos da geografia.

Em uma nova atualização do modelo climático, com base em conjuntos de dados recentes da Unidade de Pesquisa Climática (CRU) da Universidade de East Anglia e do Centro Global de Climatologia por Precipitação (GPCC) do Serviço Meteorológico Alemão, Kottke *et al.* (2006) apresentam uma nova abordagem de Köppen-Geiger (figura 14), que foi adaptada para região de estudo.

Figura 14: Classificação Climática de Köppen–Geiger.



Fonte: adaptado de Kottke *et al.*, 2006.

O PNLM apresenta clima megatérmico (Aw', classificação de Köppen), muito quente, úmido e subúmido, com precipitações distribuídas em dois períodos sazonais bem definidos ao longo do ano. As temperaturas médias situam-se entre 26°C e 27°C, com temperaturas máximas que podem alcançar 38°C, enquanto a precipitação anual situa-se entre 1600 e 2000 mm (IBAMA, 2003; PARTELI *et al.*, 2006). Essa quantidade de precipitação anual, quase amazônica, é bastante atípica da precipitação média em áreas desérticas em geral (menos de 250 mm anuais).

Os Lençóis Maranhenses recebem relativamente muita água: quase 2 mil milímetros de precipitação anual. Mais de 90% dessa chuva, porém, está concentrada entre janeiro e julho, com média mensal de 200 mm, quando é absorvida rapidamente

pela areia, elevando o lençol freático enchendo as lagoas temporárias entre as cadeias de dunas (PARTELI *et al.*, 2006).

A precipitação máxima no norte do Maranhão está relacionada ao período de fevereiro a maio e deve-se ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para as latitudes mais ao sul, sendo determinante na qualidade do período chuvoso da região (UVO, 1989).

Essa região recebe ao longo do ano a influência da ZCIT e das altas pressões estacionárias do atlântico sul (IBAMA, 2003). Dessa forma, a ZCIT é considerada o principal fenômeno atmosférico que controla a distribuição espacial e temporal da precipitação e do vento no PNLM. Para Carvalho (2013), na região em que atua a ZCIT, é constatada a presença de aglomerados convectivos, sendo considerado um dos principais mecanismos para o aquecimento atmosférico com origem na liberação de calor latente e pela interação entre a radiação solar e a nebulosidade.

Outros fenômenos meteorológicos que causam estiagens ou chuvas acentuadas na América do Sul, particularmente, é a ocorrência de *El Niño* (EN) e *La Niña* (LN) respectivamente. A componente oceânica deste modo oscila entre dois extremos, com o EL em sua fase quente, e a LN, na fase fria.

O EN pode também causar alterações nas posições e intensidades de duas zonas de convergência, a do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão e, a intertropical (ZCIT) durante o outono e, portanto, alterar a distribuição de chuvas no nordeste do Brasil (KAYANO *et al.*, 2016, p. 8). Durante a LN, os padrões anômalos de circulação atmosférica e climáticos são inversos aos descritos para o EN.

Recentemente, Kayano e Capistrano (2013) evidenciaram um padrão de anomalias da TSM sobre o oceano Atlântico tropical, comumente chamado de padrão de Dipolo do Atlântico, e que este padrão está associado a mudanças nos valores de precipitação sobre a região Nordeste e Norte do Brasil.

O regime de vento incidente no PNLM pode ser unidirecional (MCKEE, 1979) ou ventos secundários e oblíquos (TSOAR, 1984, *apud* SANTOS, 2008). Os ventos mais fortes, que podem atingir velocidades acima de 8 m/s (JIMÉNEZ *et al.*, 1999; PARTELI *et al.*, 2006), sopram principalmente do Leste. O comprimento do vetor de cada direção do vento fornece a taxa potencial de transporte de areia nessa direção, ou o potencial de

deriva (FRYBERGER, 1979, p.133-147). As direções do vento parecem variar porque as dunas do tipo barcanas, com direção NE-SW do vento, fundem-se em sinuosos conjuntos de dunas.

4.6 Solos

Considerando a região da pesquisa foi identificada a presença de solos Areno-Quartzosos e de solos Halomórficos (BARBOSA; PINTO, 1973; EMBRAPA, 2011) são indicadas as unidades associações de solos das respectivas classes identificadas. A dinâmica sedimentar dificulta a formação de solos com grande proporção de matéria orgânica, fato que explica o caráter efêmero da cobertura vegetal dos campos de dunas móveis. Mas nas dunas fixas não se evidenciam os processos de edafização.

As areias quartzosas marinhas apresentam solos profundos, com baixo conteúdo de argila, sempre inferior a 15% (BRASIL, 1973). A fertilidade natural é muito baixa e apresenta-se excessivamente drenada. O horizonte A é fracamente dissolvido e repousa sobre o C constituído por areias quartzosas, cuja origem está ligada à ação dos ventos na orla litorânea (LIMA *et al.*, 1999, p. 26-27). Nele estão inclusas as dunas tanto fixas como moveis e ocorre entre as cidades de Tutóia e Primeira Cruz.

Os solos são de textura arenosa, profundos e muito profundos, mal drenados, estrutura em grãos simples, e fertilidade natural baixa, e são inundáveis periodicamente de acordo com o fenômeno das marés (BRASIL, 1973). São solos não consolidados, de coloração branca e cinzento claro, onde o horizonte se apresenta ligeiramente enriquecido pela matéria orgânica uma vez que a vegetação predominantemente é a litoral de restingas e dunas.

Apresenta baixa saturação de bases e alta a média saturação de alumínio trocável. Não dispõem praticamente de nenhuma reserva de nutrientes para as plantas. A sequência dos horizontes é do perfil do tipo A/C, onde A apresenta profundidade variável, com baixos teores de matéria orgânica (EMBRAPA, 1986).

Grande parte dos solos da região litorânea dos Lençóis é considerado sem aptidão agrícola. Nos ecossistemas costeiros sobre solos arenosos, a entrada de nutrientes via atmosfera pode ser significativa. Este fluxo origina-se tanto pela lixiviação da atmosfera pela chuva (precipitação úmida) quanto pela deposição de partículas de origem

marinha (salsugem), provenientes da evaporação de gotículas de água do mar ejetadas na atmosfera pelo rompimento de bolhas na superfície do mar (HAY; LACERDA, 1984).

De maneira geral, são baixos os teores de nutrientes totais e dissolvidos determinados na água das lagoas presentes no interior da área de dunas (MOSCHINI-CARLOS *et al.*, 2008, p. 108). Moschini-Carlos & Pompêo (2001) determinaram uma composição no sedimento de fundo constituído de areia quartzosa fina com pequeno teor de matéria orgânica.

Esses autores verificaram ainda baixíssimas concentrações de nitrogênio e carbono total, sugerindo que o sedimento é muito pobre em matéria orgânica e nutrientes, correspondendo a Neossolos Quartzarênicos. Quando ocorre acúmulo de matéria orgânica em profundidade, devido à translocação, formam-se Espodossolos Ferri-Humilúvicos (BANDEIRA, 2013, p.41-42). Importantes áreas de manguezais também se desenvolvem ao longo dos baixos cursos dos rios Peria, Preguiças e Novo.

4.7 Vegetação e Fauna

Os Lençóis Maranhenses compreendem belas paisagens naturais e sítios de beleza cênica únicas. É composta pelos maiores campos de dunas do Brasil (cerca de 120.000 ha de dunas contínuas) espalhados por milhares de lagoas de água doce formadas anualmente por chuvas. Diante de um ecossistema em zona de transição, os animais e as plantas que se encontram nesta região ainda são pouco conhecidos. Há estudos crescentes disponíveis que se concentraram apenas em espécies, geralmente relatando apenas sua ocorrência (RÊGO; ALBUQUERQUE, 2006; SILVA *et al.*, 2009; MIRANDA *et al.*, 2012; BRITO *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2019).

A vegetação é um dos fatores de mobilidade das dunas, pois sobrepostas por vegetação rasteira, as dunas conseguem se fixar, diferentemente das dunas móveis desprovidas de vegetação e mais suscetíveis a serem transportadas pelo vento. Assim, cobertos por depósitos arenosos de grande extensão, uma parte do lineamento de dunas são colonizadas pela vegetação local (figura 15, coordenadas 2° 30' 51" lat S e 43° 2' 48" long W).

Figura 15: Colonização da vegetação entre dunas.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

Sobre esses tipos de depósitos arenosos, a maré construiu restingas que se orientam divergentemente em relação às dunas móveis, como mostrado na figura 16, localizado na coordenada: 2° 30' 52" lat S e 43° 2' 48" long W.

Figura 16: Restinga auxiliando na fixação de dunas.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

Os ecossistemas de restinga, segundo os pesquisadores Lacerda *et al.* (1993) e ARAÚJO *et al.* (1998), ocupa cerca de 79% da costa brasileira, cobrindo extensas áreas de até 3000 km² ou compõem-se de estreitas faixas litorâneas. Nesses ecossistemas costeiros, ocorrem depressões lacustres que são oriundas de fechamentos da desembocadura de rios, abastecidas por águas da chuva ou por pequenos córregos.

As restingas são sistemas importantes para o metabolismo das lagoas costeiras e para a manutenção de uma vegetação especializada, a qual tem importância fundamental no suprimento de nutrientes, substâncias húmicas e detritos, que são relevantes no funcionamento ecológico das lagoas costeiras e na manutenção de processos biogeoquímicos e biológicos (ESTEVES, 1988a). A vegetação de restinga apresenta uma ampla variação de fisionomias: formação de campo, frutíceto e florestal, dispostas em solos sempre arenosos (SILVA; BRITZ, 2005).

A paisagem vegetal natural característica da região dos Lençóis Maranhenses é composta por vegetações com influência marinha (restinga), flúvio-marinha (mangue), fluvial (comunidades aluviais), destacada na figura 17.

Figura 17: Vegetação com influência marinha próximo ao povoado Baixa Grande.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

A vegetação do PNLM ocupa 453 km², aproximadamente, e quase sua totalidade é predominantemente composta por Restinga (vegetação fisionomicamente sob influência

marinha). Existem também manguezais, matas ciliares e Cerrado, que cobrem uma pequena proporção da área total.

Sua planície de deflação eólica caracteriza-se pela presença de vegetação herbácea (gramíneas) e menor área de ocorrência dessas feições mantiformes (*sand sheets*) (FRYBERGER *et al.*, 1983), devido ao obstáculo natural representado pelo pontal existente na desembocadura do rio Preguiças, responsável pela interrupção no aporte de sedimentos neste setor do parque e, conseqüentemente, pelo acúmulo de sedimentos na margem direita do citado rio.

Na região do bioma do Cerrado está o PNLN, com influência dos biomas amazônico e da Caatinga, sendo encontradas espécies destes três biomas (COSTA *et al.*, 2017). Estes ocupam mais de dois terços da área total da unidade. Podemos observar a presença de vegetação pioneira do cerrado e campo-cerrado identificados nas localidades do povoado de Baixa Grande e Queimada dos Britos (figura 18).

Figura 18: Vegetação característica do cerrado próximo ao povoado Queimada dos Britos.

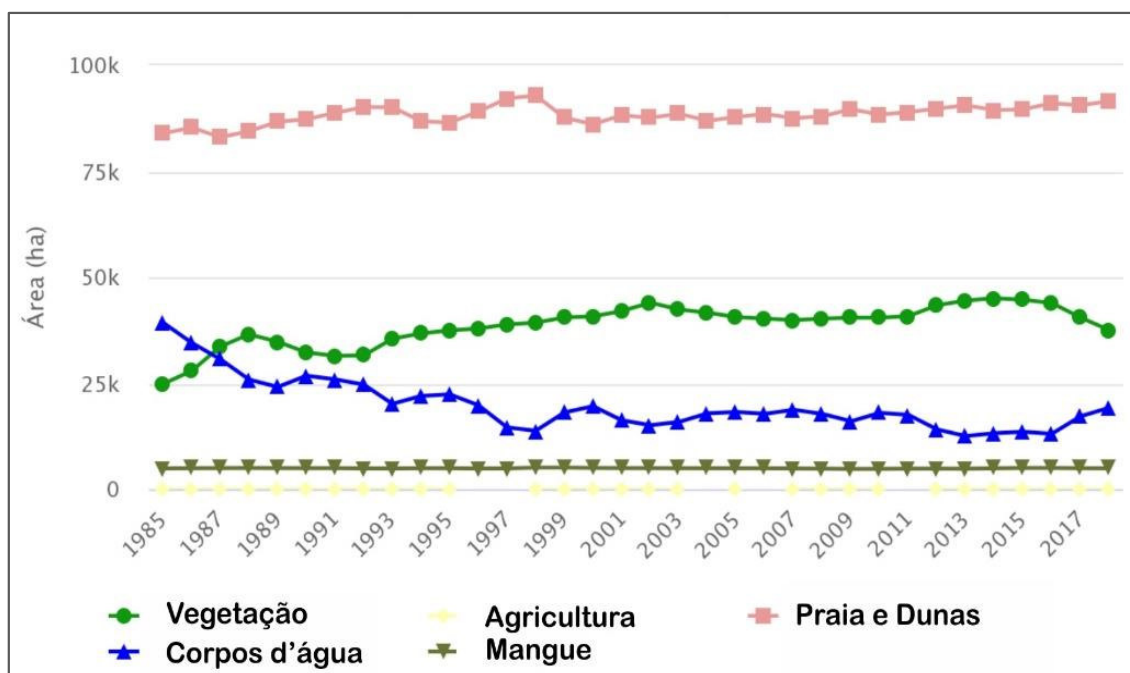


Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

O principal atrativo do Parque são as lagoas interdunares que se formam no período chuvoso da região (totalizando aprox. 25.000 ha), como mostrado, em adaptação, da classificação do Projeto MapBiomas (2019) em uma compilação de 33 anos de cobertura e uso do solo, na figura 19.

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias) é uma iniciativa de monitoramento aberto e colaborativo, criada em 2015, para fornecer informações atualizadas e temporais sobre uso e cobertura da terra. Envolve universidades, ONGs e empresas de tecnologia, que promove o mapeamento anual de cobertura e uso da terra do Brasil nas últimas três décadas.

Figura 19: Série Anual de Cobertura e Uso de Solo do PNLM.



Fonte: adaptado do Projeto MapBiomias, 2019.

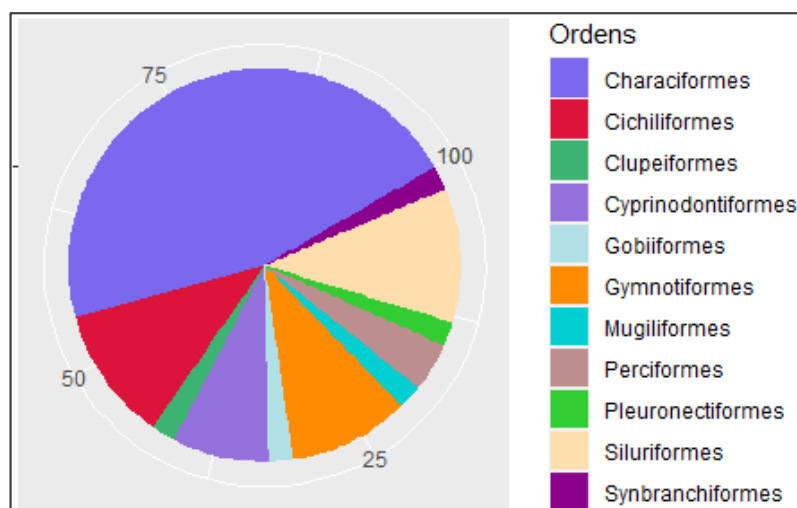
No contexto do projeto, destacou-se a área de vegetação que é inversamente proporcional a área ocupada pelas lagoas. Essa relação se condiciona devido à parte dessa região ficar submersa no período chuvoso, quando as lagoas ficam totalmente cheias. No continente, merece registro a mata ciliar, de modo geral, encontrada confinada à zona das margens dos corpos d'água (rios e áreas inundáveis), enquanto no litoral é observada a presença localizada da vegetação dos mangues, associada à desembocadura do rio Peraiá, a noroeste, e do rio Preguiças, a nordeste.

A fauna do PNLM é caracterizada por uma baixa diversidade na composição das espécies, se comparada a outras áreas do estado (IBAMA, 2003). Contudo, a região dos Lençóis Maranhenses se encontra na rota migratória de aves provenientes da América do Norte como o Maçarico-de-costas-brancas (*Limnodromus griseus*) e Maçarico-de-papo-vermelho ou Seixoeira (*Calidris canutus*), ameaçados de extinção, além de aves aquáticas residentes como o Quero-quero (*Vanellus chilensis*) e batuíras (SOARES, 2008, p. 21-

26). Entre as principais aves costeiras, comumente avistadas, têm-se: gaivotas, sabiás-da-praia, lavadeiras, caburés, dentre outras.

São encontradas algumas espécies de peixes na região como: piaba, pataca e tilápia (ambiente fluvial), piaú, curimatá e piranha (ambiente lacustre), bagre, uritinga, corvina açu e pescada branca/amarela (ambiente marinho). Levantamentos também identificaram espécies tipicamente encontradas em ambientes de água salobra, e quando ocorreram em ambientes de água doce, são restritas principalmente a estuários, ou ocasionalmente, as porções mais baixas dos rios (figura 20). Os peixes dos rios de água doce (incluindo alguns rios) estuários do PNLM com 49 espécies e 25 famílias de peixes de água doce a organismos estuarinos. (SANTOS, 2008; BRITO *et al.*, 2019).

Figura 20: Classificação da riqueza por Ordens observada no PNLM, excluindo espécies de peixes não nativas.



Fonte: Elaborado em SOFTWARE R, Adaptado de BRITO *et al.*, 2019.

Em estudos de ocorrência faunística, registrou-se: 42 espécies de répteis: 24 serpentes, 12 lagartos, duas cobras-cegas, três quelônios e um jacaré (MIRANDA; COSTA; ROCHA, 2012). Destas, cerca de 81 % foram encontrados apenas nos ambientes de restinga.

Na região dos Lençóis Maranhenses existem quatro espécies de mamíferos consideradas ameaçadas de extinção em função da perda e fragmentação do habitat como: *Eudocius ruber* (guará), *Lontra longicaudis* (lontra), *Leopardus tigrinus* (gato do mato) e *Trichechus manatus* (peixe boi marinho) (IBAMA, 2002).

4.8 Características Socioeconômicas

Em contradição às diretrizes da categoria de Proteção Integral conforme preconizam a Lei nº 9985 de 18 de julho de 2000 que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), dentro do parque existem 1160 famílias, totalizando 5572 pessoas em 2010, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010).

A discussão sobre populações humanas, residindo em áreas protegidas, é bastante polêmica e controversa. Aqui supera-se a positivação e do reconhecimento da necessidade de proteção do especial *modus vivendi* (do latim: modo de vida) das populações tradicionais, pois é grande a divergência entre preservacionistas e os socioambientalistas. De acordo com o plano de manejo do PNLM (MMA; IBAMA, 2003), foram consideradas diversas comunidades tradicionais residentes dentre elas os povoados da Baixa Grande, Queimada dos Britos e Travosa visitadas no estudo.

Estas populações desenvolvem práticas agropecuárias de subsistência no PNLM e em sua Zona Primitiva (ZP) com instalação de cultivos intermitentes através da conversão do uso da terra (figura 21), com a retirada da cobertura vegetal nativa, geralmente com uso de fogo (ABAKERLI, 2001).

Figura 21: Comunidades na região da ZP, Baixa Grande.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

A ZP localiza-se na região central da Unidade correspondendo 13,18% do total, 20.426 ha, destinando-se a maior proteção ao curso inferior do Rio Negro e às lagoas desta região proporcionando atividades de pesquisa (MMA, IBAMA, 2003).

Estas famílias são descendentes de populações que colonizaram a área no século XVII, e exercem até hoje atividades tradicionais como instalação de roças de subsistência, criação de animais soltos, caça e pesca na área protegida (IBAMA, 2002). Para Abakerli (2001), a prática agrícola tradicional dos Lençóis Maranhenses é baseada em rodízios as matas secundárias ocorreram na mesma proporção que as atividades antrópicas (cerca 9.000,00 ha cada).

A economia dos municípios relaciona-se: à agricultura, à pesca artesanal (figura 22), ao artesanato e, mais recentemente, ao turismo alavancado pelas empresas. Na agricultura, entre os principais produtos cultivados destacam-se: mandioca, castanha-de-caju, laranja, coco-da-baía, banana, milho, feijão, melancia, arroz, açaí, babaçu e buriti (MMA/IBAMA, 2003; SOUSA, 2015). A microrregião dos Lençóis Maranhenses é a maior produtora de fibra de buriti com destaque para o município de Barreirinhas com larga produção.

Figura 22: Pesca artesanal na região litoral do PNLM.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

Os principais indicadores, disponíveis no site do IBGE, demonstram baixos níveis de qualidade de vida, evidenciado pela carência e/ou inexistência de componentes de infraestrutura e serviços necessários ao atendimento das demandas sociais mínimas da

comunidade, principalmente aos residentes nos povoados dispersos por toda a área municipal. A região dos Lençóis Maranhenses passou por um rápido processo de crescimento e instalação de infraestrutura básica no início do século XXI, acelerando o desenvolvimento econômico dos três municípios maranhenses que abrangem os limites do Parque: Barreirinhas, Santo Amaro e Primeira Cruz.

Em 2002, foi concluída a construção da rodovia BR-420 que liga a cidade de Barreirinhas à capital do estado, São Luís, em via asfáltica, facilitando o acesso de turistas e serviços básicos. Em 2008, a antiga Companhia Energética do Maranhão (CEMAR), atualmente Equatorial Energia Maranhão, iniciou a expansão de linhas de baixa tensão para eletrificação rural de alguns povoados, tendo instalado energia elétrica em parte dos povoados situados dentro do Parque sem anuência do órgão gestor do Parque, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBIO (IBGE, 2010).

Em 2017 o Governo do Estado do Maranhão conclui o asfaltamento da rodovia de acesso a Santo Amaro do Maranhão, que atualmente já apresenta problemas estruturais. Com pouco mais de 30 km, a MA-320 começa na BR-402 até Santo Amaro do Maranhão e foi planejada para estimular o turismo no extremo norte do PNLM concedendo acesso as comunidades locais. A estrada foi inaugurada, porém sem finalizar a construção da ponte, que ficou inacabada até 2019 (figura 23).

Figura 23: Cabeceira da ponte inacabada de acesso ao município de Santo Amaro.



Fonte: Acervo de pesquisa, 21/11/2019.

Usada como principal acesso para chegar ao município, muitos moradores se arriscam em parte do projeto que ficou parado. Sem a ponte, não há transporte e as

crianças são obrigadas a ir a pé todos os dias para a escola e se arriscam ao realizar a travessia pela obra inacabada. A atividade turística sofreu uma alavancagem considerável com a melhoria da infraestrutura a partir de 2010 e, por conseguinte, implantação de inúmeras pousadas e agências de turismo e serviços (figura 24) para o atendimento do número crescente de visitantes, dentre muitos estrangeiros, que escolhem as excepcionais belezas naturais dos Lençóis Maranhenses.

Figura 24: Agências de viagens e serviços em Barreinhas - MA.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

A conversão do uso da terra para produção agrícola tradicional no interior do Parque Nacional, bem como abertura de trilhas na vegetação, afeta ecossistemas e espécies importantes do ponto de vista da conservação. Considerando também a proximidade com populações humanas pode conduzir ao empobrecimento da vegetação nativa pelo uso moderado dos recursos (RIBEIRO *et al.*, 2015, 2016).

Quanto ao manejo e gestão desta UC, deve sempre levar em consideração informações científicas de forma atual, superando o momento em que passamos pelo “negacionismo” sobre a ciência, para que os seus objetivos de criação sejam atingidos e ofereça serviços ambientais relevantes para a sociedade.

Cabe destacar que programa do governo federal de desestatização, que inclui o PNLM, ainda deve ser um amplo aprofundamento no debate sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais da privatização, com os agentes que realmente serão afetados. A proposta do governo é de grande preocupação, pois pretende dar uma destinação econômica para as unidades de conservação do meio ambiente, atualmente controlados pelo ICMBio, sem se preocupar com os impactos ambientais e sociais da região, visto que beneficiaria empresas relacionadas ao turismo, em detrimento da preservação e equilíbrio dos sistemas naturais.

5 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta as estratégias metodológicas que foram utilizadas para investigar a região de lagoas interdunares inseridas no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. Assim, são apresentadas as referências utilizadas para sustentar todas as análises, bem como as classificações realizadas, mensurações e identificação dos diferentes padrões de migração lagunares. Além disso, são detalhados os métodos de sensoriamento remoto e geoprocessamento que foram utilizados.

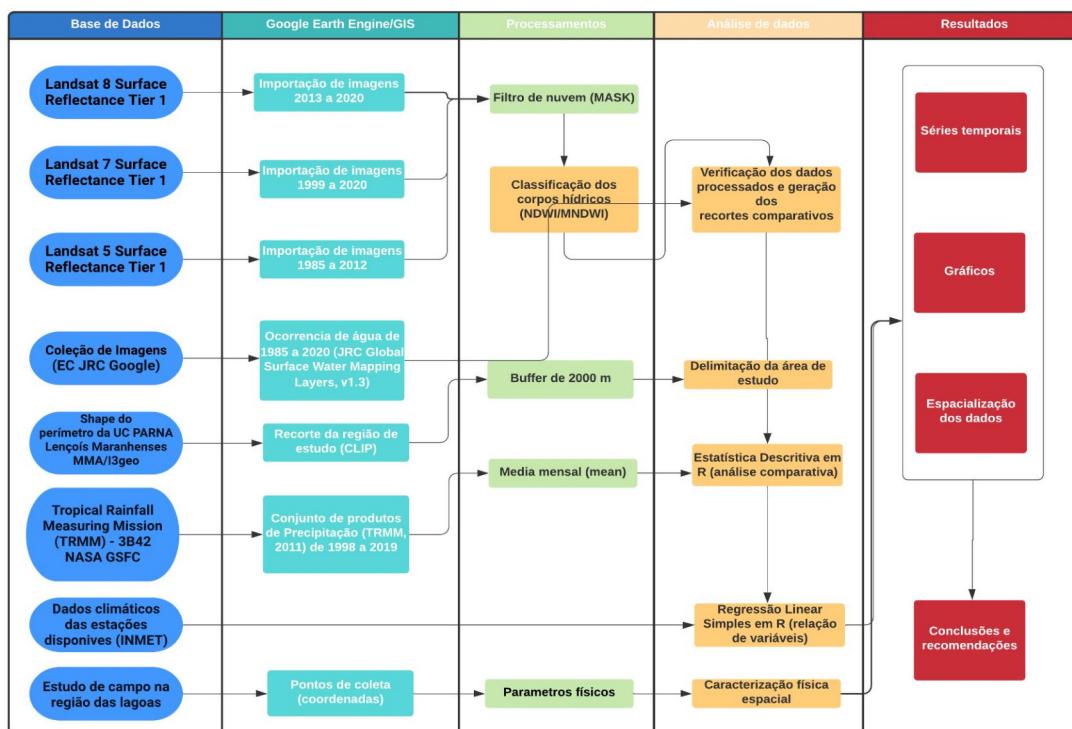
5.1 Procedimentos Metodológicos

Na etapa inicial ocorreu principalmente a aplicação da técnica de pesquisa bibliográfica para a utilização de bases de dados específicas, que se configuram como primeiro passo no entendimento de como pode-se atingir os resultados desejados. Para Marconi e Lakatos (2003, p.183) a primeira dessas técnicas é basicamente um apanhado geral sobre as principais produções realizadas, que tratam de forma direta ou indireta sobre a temática pesquisada, fornecendo dados históricos, atualizados e importantes no estudo do objeto de interesse.

Desta forma, utilizou-se também o sensoriamento remoto que de acordo com Moraes “um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto” (2002, p. 7). Assim, obtém-se diversas alternativas no estudo geográfico, visto que obtemos a identificação de diferentes alvos da superfície terrestre, por meio do comprimento das ondas eletromagnéticas que cada material emite. Essa técnica faz uso de sensores localizados, por exemplo, em plataformas orbitais ou aerotransportadas, que atuam na captação e registro da radiação eletromagnética dos alvos da superfície terrestre.

Para alcançar os objetivos dessa pesquisa foram realizados procedimentos metodológicos, organizados em etapas de investigação organizados em um fluxograma, como mostrado na figura 25.

Figura 25: Fluxograma metodológico de estruturação da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

5.1.1 Base de dados

Com o banco de imagens do *United States Geological Survey* (USGS) / Google, ou Serviço Geológico dos Estados Unidos, na plataforma Google Earth Engine, buscou-se por imagens que contemplassem a área de estudo dentro da maior linha temporal possível, usando Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, levando ainda em consideração a qualidade da imagem e ausência de nuvens, o que poderia dificultar os processamentos realizados.

O conjunto de imagens do Landsat 5 *Surface Reflectance Tier 1* é resultado da correção dos dados de refletância de superfície atmosférica do sensor Landsat 5 ETM (*Enhanced Thematic Mapper*). Essas imagens contêm 4 bandas de infravermelho próximo e visível (NIR) e 2 bandas de infravermelho de onda curta (SWIR) processadas para refletância de superfície ortorretificada e uma banda de infravermelho térmico (TIR) processada para temperatura de brilho ortorretificada.

As bandas NIR e SWIR têm resolução de 30m / pixel. Os dados atmosféricos foram corrigidos usando LEDAPS, um software especializado chamado *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System*, e incluem uma máscara de nuvem, sombra, água e neve produzida usando CFMASK (O algoritmo *C Function of Mask* para processamento de produtos de dados Landsat Nível-1), ou seja, uma máscara de saturação por pixel.

Os dados do Landsat 7 *Surface Reflectance Tier 1* também são resultado da correção dos dados de superfície atmosférica do sensor Landsat 7 ETM + pelo LEDAPS. Essas imagens contêm 4 bandas de infravermelho próximo e visível (NIR) e 2 bandas de infravermelho de onda curta (SWIR) processadas para refletância de superfície ortorretificada e uma banda de infravermelho térmico (TIR) processada para temperatura de brilho ortorretificada. As bandas NIR e SWIR têm resolução de 30m / pixel.

Para o conjunto de dados do Landsat 8 *Surface Reflectance Tier 1*, estes são resultados dos dados de refletância de superfície atmosférica dos sensores Landsat 8 OLI/TIRS (*Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor*) corrigidos a partir de software especializado chamado *Land Surface Reflectance Code* (LaSRC). O algoritmo inclui uma máscara de nuvem, sombra, água e neve produzida usando CFMASK, bem como uma máscara de saturação por pixel (VERMOTE *et al.*, 2016, p. 50).

Este produto do Landsat 8 contém 5 bandas de infravermelho próximo e visível (NIR) e 2 bandas de infravermelho de onda curta (SWIR) processadas para refletância de superfície ortorretificada e duas bandas de infravermelho térmico (TIR) processadas para temperatura de brilho ortorretificada.

Com a compilação destes conjuntos de dados obteve-se a localização e a distribuição temporal das águas superficiais adquiridas entre 03 de março de 1985 e 24 de dezembro de 2020, além de fornecer estatísticas sobre a extensão e mudanças dessas superfícies. Foi utilizado um total de 1.360 cenas do landsat 5, 7 e 8 para elaboração espacial da ocorrência das lagoas.

Outra coleção de imagens disponível no Google Earth Engine utilizada de forma concomitante foi a *JRC Monthly Water Recurrence - v1.3*, um produto que contém 12 imagens com mensurações mensais da sazonalidade da água com base nos valores de ocorrência detectados naquele mês ao longo de todos os anos. Desenvolvido com base em cada pixel classificado individualmente em água / não água. Os resultados foram agrupados em um histórico mensal para todo o período de tempo e duas épocas (1984-1999, 2000-2020) para detecção de alterações (PEKEL *et al.*, 2016, p.6).

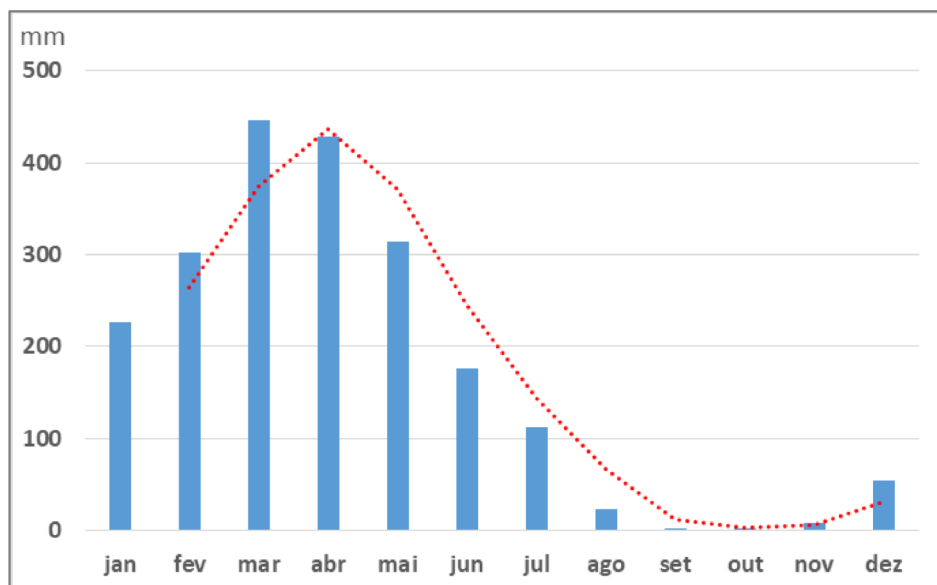
Para obtenção dos dados de precipitação do TRMM foi utilizado a plataforma EarthData da NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>). Este produto foi criado usando a taxa de precipitação de infravermelho de micro-ondas combinada ajustada por TRMM (em mm / h) e estimativas de erro de precipitação de raiz quadrada média (RMS). Ele também fornece uma estimativa aprimorada de precipitação em uma faixa de latitude que cobre 50° N a 50° S. Essa resolução espacial do TRMM está relacionada às fontes de dados globais, ou seja, dados infravermelhos e análises de pluviômetros com células de informação de um mês.

Para validar os dados processados, foram usadas bases de dados oficiais do INMET, obtendo séries históricas de precipitação do CPTEC/INPE, utilizando as Estações disponíveis de precipitação para a região de estudo. A normal climatológica de referência para o estudo foi obtida através do cálculo das médias de precipitação mensal da estação disponível, seguindo os critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

A Estação-82280 de São Luís foi escolhida por estar na ZCIT que atua na região dos Lençóis Maranhenses e assim ter uma melhor representatividade na comparação dos

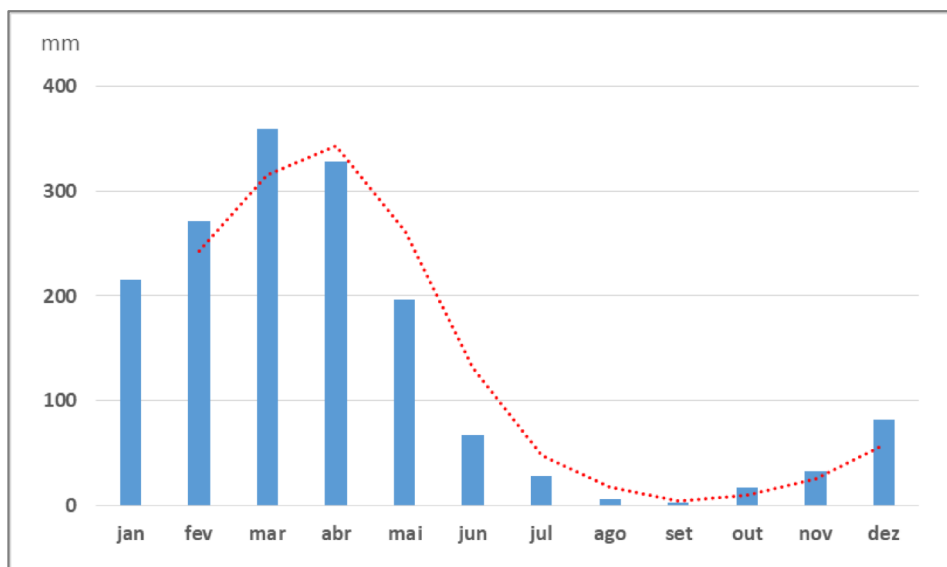
dados do que outras estações (gráfico 01), bem como a Estação-82382 de Chapadinha que também apresenta boa representatividade (gráfico 02). As estações possuem séries históricas completas (1991 a 2019) com poucos dados faltantes.

Gráfico 01: Série histórica de dados de precipitação (mm) de 1991 a 2019 (Estação São Luís).



Fonte: INMET, 2020.

Gráfico 02: Série histórica de dados de precipitação (mm) de 1991 a 2019 (Estação Chapadinha).



Fonte: INMET, 2020.

Diante dos dados colhidos durante as investigações no campo de pesquisa, buscou-se examinar imagens de satélites que pudessem ser utilizadas nos processamentos e mapeamentos que viriam a ser realizados. Para tanto deveriam ter um lapso temporal e

qualidade aceitável, como resolução mínima de 30 m e estar temporalmente o mais próximo da atualidade e dos processos computacionais utilizados no GEE.

5.1.2 Google Earth Engine/GIS

Todo processamento foi realizado online no ambiente de desenvolvimento disponibilizado pela plataforma do GEE (*GEE Code Editor*). Dessa forma, foi possível programar e executar uma rotina a qual permitisse obter coleções de imagens e avaliar de forma multitemporal diferentes alvos a índices de água (NDWI e MNDWI) utilizando a linguagem JavaScript (JS). As classes consideradas no mapeamento de cobertura da terra foram: corpos d'água e vegetação natural.

Para o estudo da ocorrência de água e sua dinâmica, também se utilizou a coleção de imagens do GEE (*JRC Global Surface Water Mapping Layers*, v1.3), que mostra onde as águas superficiais ocorreram entre 1984 e 2019 e fornece informações sobre a dinâmica geral da água em alta resolução espacial. Este produto captura tanto o intra-anual quanto o interanual da variabilidade de mudanças para uma região.

A composição dos mapas e explorações interativas dos dados espaciais resultantes foram trabalhadas com a interface gráfica do software QGIS versão 2.14, um Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto e um editor de planilhas.

5.1.3 Processamento das imagens

Para seleção de imagens dentro da coleção foram utilizados filtros de até 25% de nuvens para cada imagem. Destaca-se a dificuldade de obtenção de imagens para identificação das lagoas em períodos chuvosos. Sendo, assim, foi utilizado um algoritmo (máscara) que seleciona cada pixel e sobrepõem-se a outra coleção de imagens em caso de nuvens para identificação das lagoas, disponível no GEE para cada coleção Landsat.

Na literatura existem vários métodos para classificação de água como o Índice Normalizado de Diferença de Água ("*Normalized Difference Water Index*"- NDWI) e suas variações como o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) (XU, 2006; MCFEETERS, 1996; GAO, 1996). A utilização do primeiro índice permite uma melhor visualização das áreas com alto teor de umidade e corpos de água. Segundo Gao (1996), o NDWI varia quase linearmente com a espessura da lâmina da água.

Dessa maneira, usou-se o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) (equação 1), que foi concebido por McFeeters (1996) com a finalidade de delinear ambientes de águas abertas minimizando o restante dos alvos, automatizando a determinação do limiar entre água e terra (vegetação terrestre e solos).

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR) \quad \text{Eq. 1}$$

Para as variações do Índice Normalizado utilizou-se o MNDWI (Modificação do Índice de Água de Diferença Normalizada) proposto por Xu (2006), para comparações e validações, (equação 2) que consiste em uma razão de expressão modificada do NDWI, para delimitamento de feições relacionadas à água.

$$MNDWI = (Green - SWIR1) / (Green + SWIR1) \quad \text{Eq. 2}$$

O MNDWI foi criado a partir da ideia de que: com os valores (números digitais) para água na banda do infravermelho médio são ainda menores que na banda do infravermelho próximo. Logo, poderia ser mais adequado utilizar na equação do NDWI ao invés do infravermelho próximo (NIR), o infravermelho médio (SWIR), de maneira a maximizar ainda mais a diferença entre as bandas.

5.1.4 Análise de dados

A partir da imagem classificada é possível quantificar os pixels de classe água e não água e assim analisar áreas de cada alvo presente na região de análise. Para a confecção dos mapas da região do PNLN foi determinada a classe água, que incluem todas as classes de água, tais como: rios, riachos, lagoas, entre outros. Após essa determinação, a etapa seguinte foi a de coleta de dados “*in loco*” para treinamento e realização da classificação, como também para o estudo da análise espacial, etapa conjunta com a interpretação visual das imagens.

Para geração de recortes comparativos e elaboração de mapas utilizou-se o *shape* (arquivo *.shp) do perímetro do PNLN, obtido pela plataforma do MMA, adicionando um buffer de 2000m para captura de corpos hídricos de grande extensão que vão além do perímetro contidos na delimitação oficial.

Os dados foram organizados no software Excel (editor de planilhas) e as análises estatísticas no software RStudio, tomando como referência os pontos de controle. Dessa

forma, os cálculos utilizados foram a média aritmética e o desvio padrão dos resíduos, demonstrados respectivamente nas equações 3 e 4, por:

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad \text{Equação 3}$$

e

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta\bar{x})^2 \quad \text{Equação 4}$$

Através do coeficiente de correlação R^2 (equação 5) obtém-se medida de ajustamento de um modelo estatístico indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o R^2 mais explicativo é o modelo, ou seja, melhor ele se ajusta à amostra. O R^2 é calculado por:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2\right)}} \quad \text{Equação 5}$$

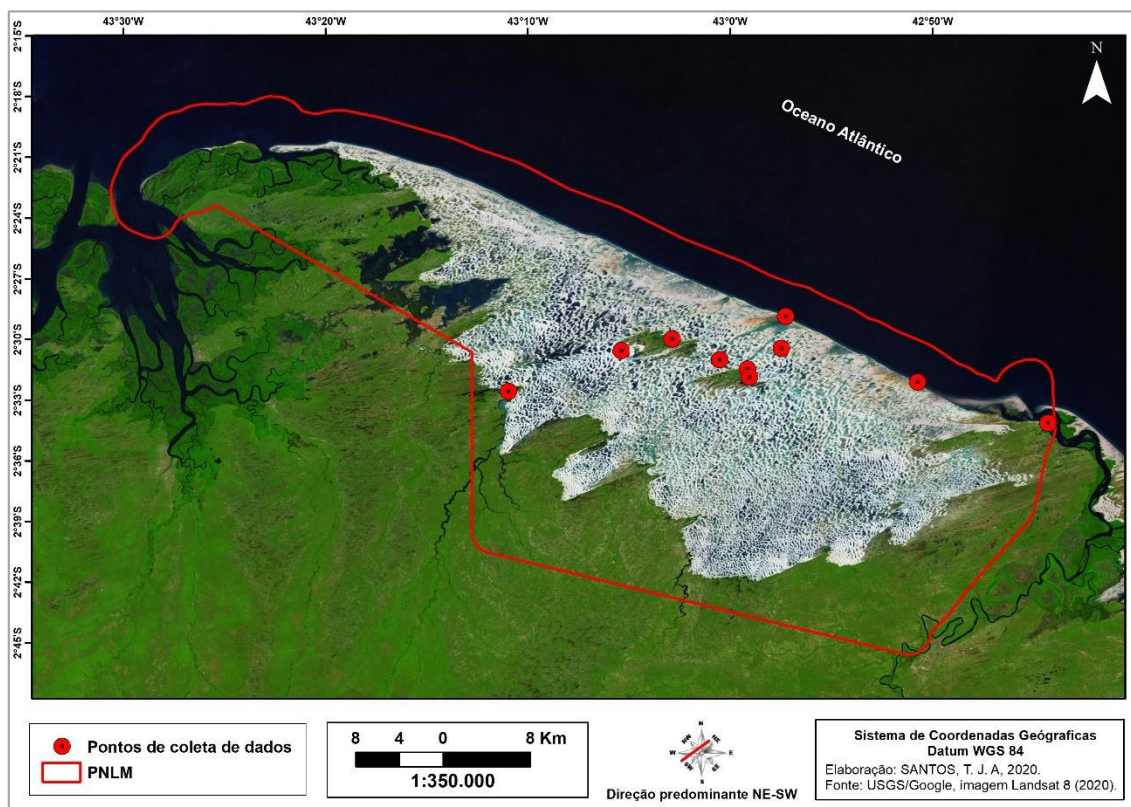
A partir das discrepâncias obtidas foram realizadas estatísticas que permitiram definir correlações na comparação entre os valores medidos nos levantamentos e os valores de referência. O R ainda auxiliou na elaboração dos gráficos com o pacote de dados ggplot2, desenvolvido por Hadley Wickham (2016).

O conjunto de dados possibilitou a elaboração de gráficos em diferentes escalas temporais devido à pouca cobertura de dados completos para a região de análise. Para sintetizar os dados de precipitação e vento, foram utilizados a regressão linear simples com o modelo de ajuste para análise de dispersão dos dados em conjunto com frequência absoluta, além de outros tipos de gráficos para melhor entendimento e visualização.

5.2 Coleta de dados *in loco*

A coleta de dados em Pesquisa de Campo na área de estudo foi realizada no segundo semestre de 2019, servindo de subsídio para a caracterização do meio físico não somente das lagoas, como também da área do entorno das lagoas encontradas em regiões de coleta. As localizações geográficas de cada ponto estão identificadas na figura 26.

Figura 26: Localização dos pontos de coletas de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para a determinação das coordenadas geográficas, usou-se o *Global Position System* (GPS de navegação Garmin) para os pontos de coleta (lagoas), assim obteve-se as informações passíveis de serem coletadas, bem como a caracterização de aspectos ambientais captados em registros fotográficos, salvaguardando o mesmo ponto e ângulo de tomada.

Ao total foram obtidos 51 pontos de coleta de dados entre lagoas cheias, secas e outros corpos hídricos para toda a região dos Lençóis Maranhenses e entorno, mas apenas os pontos inseridos dentro do perímetro do PNLM foram escolhidos para elaboração cartográfica. Para análise completa das características físicas, selecionou-se 10 pontos que correspondem às lagoas cheias (região de maior ocorrência e permanência) para uma análise mais detalhada das variáveis físicas no período visitado.

Durante a pesquisa de campo utilizou-se alguns equipamentos para facilitar o levantamento dos dados *in loco* para a caracterização física da região das lagoas visitadas, esses relacionados abaixo no quadro 03:

Quadro 03: Instrumentos Utilizados em Campo.

| INSTRUMENTOS UTILIZADOS |
|---|
| Termômetro digital infravermelho termal |
| Anemômetro digital |
| Termômetro analógico |
| Termo-higrômetro digital |
| Luxímetro digital |
| GPS de navegação |
| Câmera digital |

Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

O Termômetro Digital Infravermelho Termal (figura 27) é um dispositivo capaz de coletar, detectar e traduzir a radiação infravermelho termal emitida pelos alvos, sob a plataforma na qual está instalado e gerar um dado correspondente. O termômetro digital foi utilizado sob a parte superficial das lagoas visitadas. Dessa forma, o instrumento permitiu mensurar da temperatura superficial com rápido tempo de resposta e precisão de pontos diferenciados, auxiliando em análises da área estudada.

Figura 27: Termômetro Digital Infravermelho Termal.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

O anemômetro é um instrumento que serve para medir a velocidade do vento. A mensuração pode ser obtida de diversas formas, entretanto dependerá da tecnologia proporcionada pelo aparelho para a aferição e do fim para o qual ele será usado. Assim, o anemômetro utilizado foi o modelo AD-250 da marca INSTRUTERM (figura 28), que foi utilizado em cada ponto de coleta nas alturas de 100 a 200 cm, nas quais ocorreram registros das velocidades momentâneas do vento.

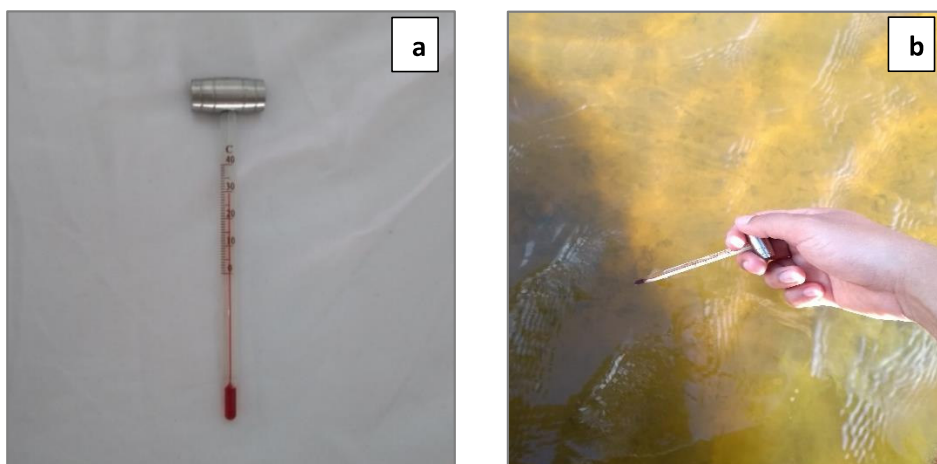
Figura 28: Anemômetro Digital de Rotação.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

O termômetro de mercúrio (figura 29-a), é um instrumento de tubo capilar (fino como cabelo) de vidro, fechado a vácuo, e um bulbo (espécie de bolha arredondada) em uma extremidade contendo mercúrio. O mercúrio, como todos os materiais, dilata-se quando aumenta a temperatura. Dessa maneira, utilizou-se para medir a temperatura da água em diversos pontos de coleta na região de estudo, como mostra a figura 29-b.

Figura 29: Termômetro de mercúrio.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

O termo-higrômetro digital (CENTER 315) usado na pesquisa (figura 30), é um instrumento de pesquisa que tem como função medir a umidade presente nos gases da atmosfera e a temperatura, simultaneamente demonstrando a relação de um com o outro. Nesses pontos foram coletados dados de temperatura do ar e umidade relativa, no mês de novembro, transição do período de estiagem para o chuvoso. As observações, nas regiões

das lagoas visitadas, registraram as características meteorológicas, fundamentais para a compreensão da variabilidade térmica e higrométrica.

Figura 30: Termo-higrômetro digital.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

Outro instrumento utilizado foi o Luxímetro digital (INSTRUTERM, LD-200), demonstrado na figura 31, um equipamento que mede a intensidade da luz que chega a seu sensor. Com isso, pode-se determinar uma grandeza denominada iluminância de um determinado local, com o resultado sendo dado em Lux. Assim, para medir a intensidade luminosa do plano superficial (75 cm da superfície) das lagoas foi utilizado o luxímetro entre os horários de 08:00 às 16:00h.

Figura 31: Luxímetro Digital.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

Considerando a iluminação de referência, as medições são feitas a cinco distâncias diferentes e a média dessas medições é somada ao fator de correção da lâmpada de referência e ao fator de correção da resolução do medidor. Este valor está alinhado com a escala do luxímetro digital.

O sistema GPS, como um todo, é composto por três segmentos: o segmento espacial, composto por satélites artificiais da Terra que emitem sinais eletromagnéticos; o segmento de controle, composto pelas estações terrestres que mantêm os satélites em funcionamento; e o segmento dos usuários, composto pelos receptores, que captam os sinais enviados pelos satélites e, com eles, calculam sua posição. Assim, os sinais enviados pelos satélites são captados pelo receptor GPS modelo Garmin 64S (figura 32), que calcula sua própria posição; as estações de controle garantem o bom funcionamento dos satélites e, eventualmente, modificam sua configuração.

Figura 32: *Global Positioning System – GPS de navegação.*



Fonte: Acervo do autor, 2019.

A velocidade do vento aliado ao clima, umidade e densidade do ar auxiliou a fazer uma análise mais detalhada e precisa na caracterização física do local. Dessa maneira, o trabalho de campo mostrou-se como uma etapa relevante à medida que permitiu a observação dos fenômenos que seriam estudados na realidade que se evidenciam, proporcionando assim, dados para validações e nos mapeamentos realizados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise multitemporal das lagoas do PNLM.

Para o processamento de imagens no Google Earth Engine foram realizadas análises e a manipulações de dados de modo a facilitar o entendimento e diferenciação por parte do usuário com a finalidade de obter informações. Nesta pesquisa utilizou-se a extração de corpos de água através de Índices Normalizados específicos utilizando coleções de imagens Landsat.

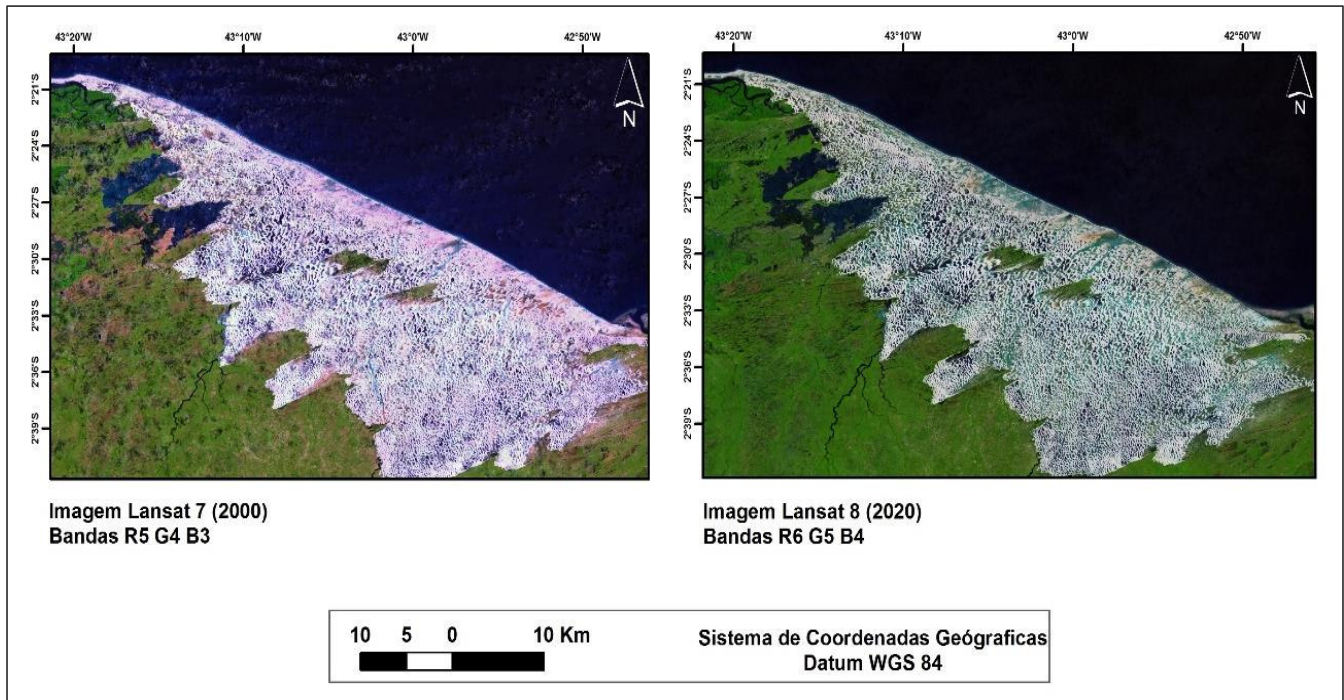
A aquisição das imagens não seguiu uma sazonalidade, o que levaria a uniformização de escolha das datas, pois se utilizou coleções de imagens com menor cobertura de nuvens e máscaras de nuvens no script do GEE, visando a diminuição dos efeitos de diferença de iluminação da cena que podem influenciar na análise das imagens (JENSEN, 2009).

Para identificar lagoas e deslocamentos utilizou-se o método de interpretação visual de imagens, seguindo-se as prerrogativas da análise da morfodinâmica. A lagoas se posicionam conforme o seu contorno morfológico, sendo possível identificar e medir as migrações identificadas temporalmente na imagem de satélite.

As combinações de bandas realçaram a visualização do complexo de lagoas e posteriormente foram aplicadas as composições de Cores Naturais (RGB Landsat 7, 321/Landsat 8, 432) para diferenciar os outros elementos, como a vegetação. Os procedimentos de processamento de imagens digitais dos elementos multiespectrais da família Landsat, foram empregadas eficientemente para evidenciar pequenos contrastes na característica de cada elemento da paisagem.

Dessa maneira, como exemplo temos imagens de sensores distintos para o ano de 2000 com aproximadamente 20% de cobertura de nuvens, e uma imagem 2020 com tratamento de máscara de nuvens utilizada em diversos pontos da pesquisa, conforme pode ser visualizado na figura 33. Pode acontecer que poucas nuvens mascarem importantes porções da área de estudo e, no caso oposto, pode acontecer que mais de 25 % esteja concentrado ou disperso, sem afetar a região de interesse para o estudo em pauta.

Figura 33: Comparação de imagem não tratada da coleção do Landsat 7 e imagem tratada do Landsat 8.



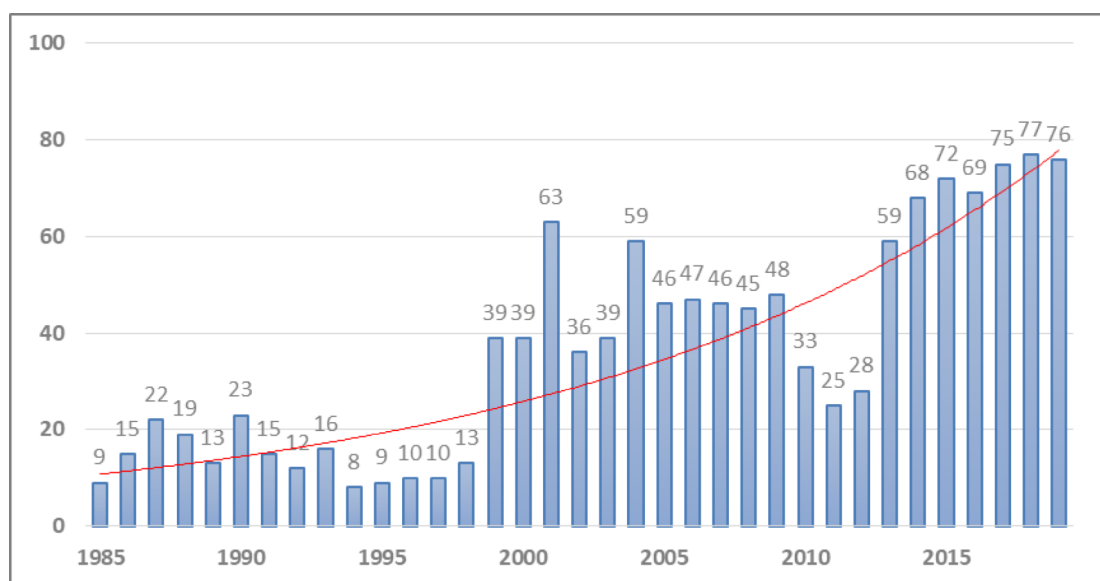
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

6.1.1 Processamento de imagens para cálculos de área

A associação das interpretações das imagens de satélite a um sistema de informações geográficas (SIG), em áreas menores (lagos e lagoas), possibilita a integração de resultados multitemporais em sistemas cartográficos de rápido acesso, o que permite acompanhamento visual e quantitativo das regiões de lagoas. Neste contexto, o uso de imagens de satélite possui grande relevância, em função de permitir a realização de estimativas com maior antecedência e precisão e menor custo.

A partir do banco de dados em nuvem e com o auxílio da plataforma do GEE, obteve-se um conjunto de imagens possibilitando, dessa forma, a identificação dos corpos hídricos do PNLM. A identificação das áreas e a mensuração das lagoas, foi calculada considerando o número de imagens disponíveis e a sua qualidade para o cálculo de área, como mostra a gráfico 03.

Gráfico 03: Número de imagens utilizadas para o cálculo de área por ano.



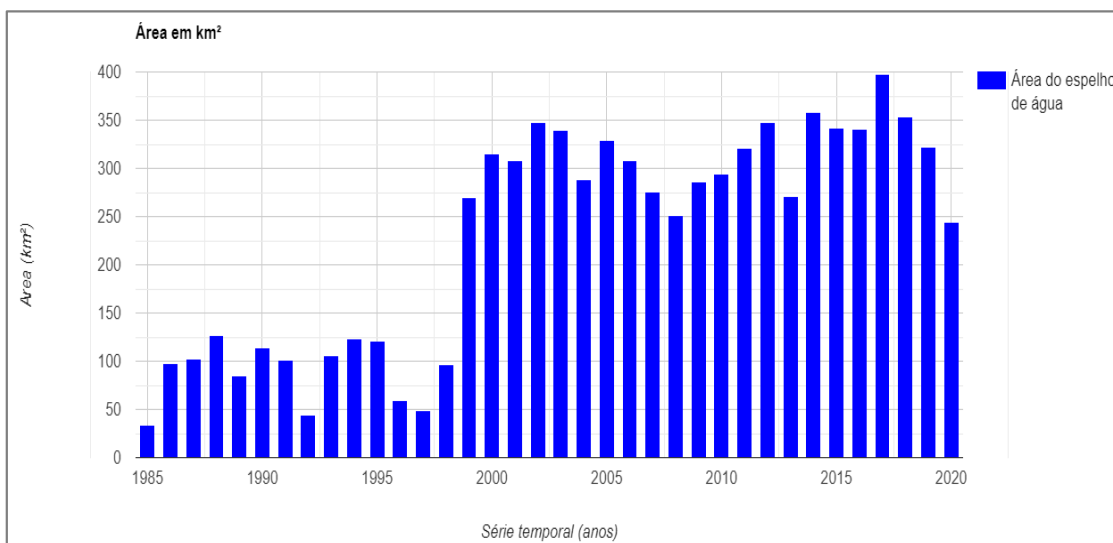
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Comparando os novos índices propostos (NDWI e MNDWI), os resultados mostram que os dois índices possuem características semelhantes na delimitação de corpos d'água para a região do PNLM. No entanto o MNDWI, por utilizar a banda do infravermelho médio e de ondas curtas, captura uma quantidade maior de pixels misturados, ou seja, que possuem resposta de água conjuntamente com outro uso.

Como forma de quantificar as variações do espelho d'água das lagoas classificadas, foi realizada a comparação entre os índices NDWI (gráfico 04) e MNDWI (gráfico 05), fez-se a quantificação da área total (em km²) para cada um dos 35 anos

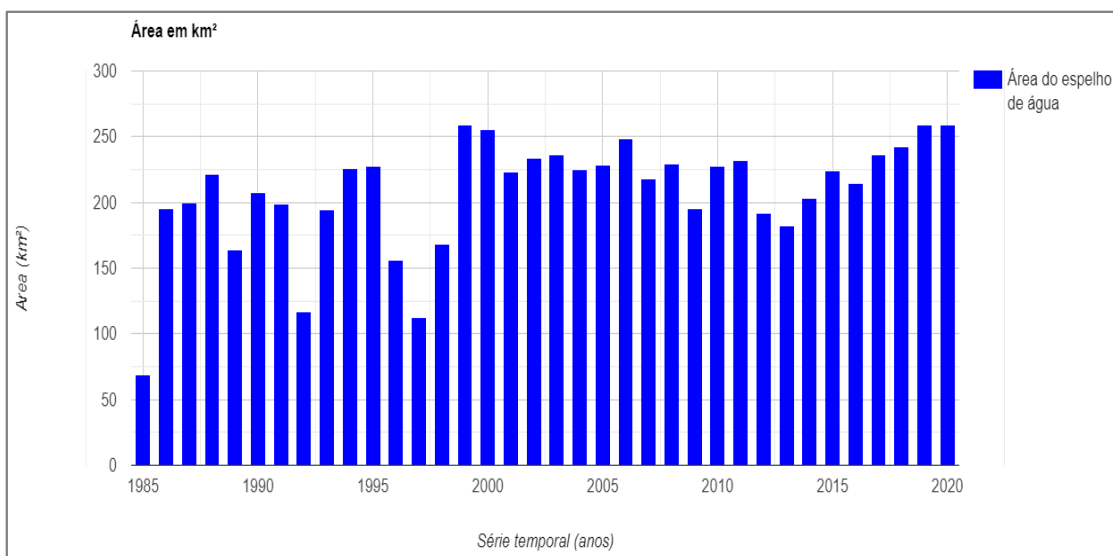
analisados. Os resultados da área das lagoas do PNLM são da área do polígono de referência da UC.

Gráfico 04 - Série temporal de área do espelho d'água das lagoas com o NDWI.



Fonte: Elaborado no GEE pelo autor, 2021.

Gráfico 05: Série temporal de área do espelho d'água das lagoas com o MNDWI.



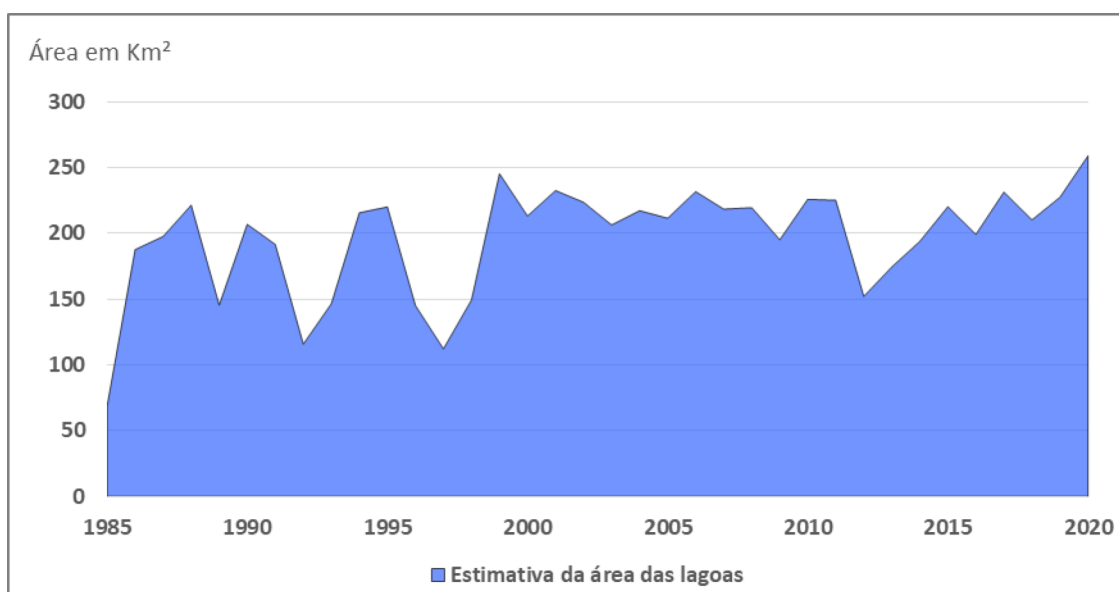
Fonte: Elaborado no GEE pelo autor, 2021.

Podemos perceber uma tendência e uma diferenciação entre os resultados dos índices para os anos iniciais até 1999 (ano de lançamento do Landsat 7). Inicialmente, verifica-se que o NDWI apresentou as áreas de lagoas menores que o MNDWI. Contudo, o Índice Modificado manteve seus valores estáveis para toda a série temporal.

Outra característica do MNDWI em relação ao NDWI, está na apresentação das maiores áreas das lagoas para todos os anos até 1998 voltando a superar apenas em 2011, 2019 e 2020. Essa diferença mostrada pode ser explicada pelo uso das bandas do infravermelho médio e de ondas curtas pelo Índice Modificado, que considera os pixels misturados (água e outro alvo com característica similar) como integrante do corpo hídrico. Nesse contexto, podemos verificar que o NDWI difere por utilizar bandas na região do infravermelho próximo que não considera os pixels com outras características como parte da classe água.

Para estimar a área das lagoas, utilizou-se o MNDWI para cada ano por apresentar melhores resultados. Dessa forma, a área de lagoas que era de aproximadamente 250 km², máxima histórica até 1999, reduziu em 17% a partir de 1999, atingindo a estabilidade de 214 km² (média histórica de 20 anos) de área entre os anos de 2000 a 2020 com tendência estável, como observado no gráfico 06. Podemos destacar ainda o ano de 2012 e 2013 com menor registro de área superficial, chegando a drástica redução de 40% em área de lagoas em relação à média histórica.

Gráfico 06: Estimativa da área das lagoas para 35 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A evolução dos sensores como o OLI, do Landsat 8, trouxe grande vantagem como por exemplo a sua resolução radiométrica, permitindo registrar variações de intensidade de sinal individuais em 16 bits. Isso torna possível detectar variações de energia refletida pelos ambientes aquáticos (caracterizados por baixa intensidade de

sinal), além de obter novas informações e monitoramento de recursos hídricos com uma maior capacidade de revisita.

6.1.2 Caracterização física das lagoas do interdunares do PNLM

A inter-relação entre o modelado das dunas e o significativo conjunto de lagoas interdunares com formas, tamanhos e profundidades variadas, reproduz características únicas na paisagem. Em função desses aspectos, da ação de agentes morfogenéticos (luminosidade, temperatura, vento) e de fatores como ausência de cobertura vegetal e duração do período estiagem, muitas lagoas secam ou têm seu volume de água sensivelmente reduzido devido à intensa e prolongada evaporação.

Com base nas pesquisas de campo foram coletadas informações relevante sobre as características físicas das lagoas no período de transição do período de estiagem para o período chuvoso O estudo físico de dez lagoas dos Lençóis Maranhenses localizadas na região com mais lagoas perenes evidenciou uma pequena amplitude térmica entre o período da manhã e tarde, variando de 27 a 31°C em média.

Foram mensuradas as intensidades luminosas sobre as lagoas entre 980 x 10 a 1700 x 1000 Lux, que influencia diretamente nas variações da quantidade de microalgas nas lagoas (tabela 03).

Tabela 03: Variáveis físicas das lagoas dos Lençóis Maranhenses (L= Lagoas analisadas; ALT= altimetria; T_AR = temperatura do ar; UR = umidade relativa do ar; DIR_V = direção do vento; V = velocidade média do vento; T_A = temperatura da água; T_S = temperatura superficial da água; LUX = densidade luminosa superficial).

| L | X | Y | ALT | T_AR | UR | DIR | V | V | T_A | T_S | LUX | H |
|----|--------|---------|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|------------|-------|
| 1 | 751420 | 9715804 | 0 | 28 | 74 | E | 5,4 | 27 | 27,8 | | 980 X 10 | 8:00 |
| 2 | 739490 | 9719566 | 0 | 28,2 | 74,7 | E | 7,8 | 27 | 26,1 | | 1700 X 100 | 10:55 |
| 3 | 727406 | 9725586 | 1 | 28,1 | 73 | E | 7 | 29 | 30,4 | | 1500 X 100 | 10:00 |
| 4 | 727031 | 9722651 | 13 | 30,1 | 66,5 | E | 9,1 | - | 40,2 | | 1036 X 100 | 11:00 |
| 5 | 723915 | 9720775 | 23 | 30 | 71,3 | E | 5,2 | 29,5 | 30,3 | | 1200 X 100 | 11:55 |
| 6 | 724088 | 9720044 | 3 | 28,8 | 74,3 | E/NE | 4,2 | 27 | 27,3 | | 236 X 100 | - |
| 7 | 721372 | 9721635 | 8 | 27,5 | 75,1 | E/NE | 7 | 25 | 26,1 | | 1415 X 100 | 8:20 |
| 8 | 717020 | 9723543 | 8 | 29,3 | 65,4 | NE | 3,8 | 27 | 35 | | 1432 X 100 | 13:00 |
| 9 | 712375 | 9722483 | 10 | 31,3 | 63,5 | E/NE | 7 | 30 | 36 | | 1160 X 100 | 14:30 |
| 10 | 702023 | 9718797 | 2 | 30,2 | 61,8 | E/NE | 2,2 | 31 | 30,5 | | 600 X 100 | 10:00 |

Fonte: Dados da Pesquisa, 2020.

A análise da luminosidade sobre a superfície é de grande importância, pois está diretamente relacionada ao surgimento de microalgas e ao “esverdeamento” das lagoas. Essas possuem a capacidade de fixar o gás carbônico do ar, utilizando-o como fonte de carbono. As microalgas possuem uma matéria orgânica rica em minerais, vitaminas,

lipídios, pigmentos e proteínas (KHAN *et al.*, 2009). Assim, as causas da tonalidade verde em algumas lagoas, podem estar relacionadas as combinações de uma estação prolongada (mais ou menos intensidade de luz), deposição de nitrogênio e de CO₂.

Os dados de temperatura corroboram com dos dados de Garavello *et al.* (1998) para o mesmo período de coleta novembro-dezembro. A direção predominante do vento indicada é leste/nordeste (E/NE) com velocidade média de 7 m/s, aproximadamente.

Em algumas lagoas os dados de temperatura da água que se manteve estável e atingindo até 15 °C de amplitude em relação à temperatura superficial da água, com aumento da temperatura do ar em 4 °C durante todo o dia, corrobora e com os dados de Moschini-Carlos *et al.* (2008) considerando a amplitude térmica de 4°C para o período da manhã e tarde (9:30h – 15:30h).

Os resultados para a umidade relativa do ar estavam em entorno de 75%, um pequeno aumento para o período considerando os dados de Floriani *et al.* (2004) que se identificou 68%, destaque também para as lagoas costeiras onde a umidade é normalmente alta e o transporte eólico compete contra o crescimento da vegetação o que causa uma relativa estabilidade para essas lagoas e dunas. Os dados podem auxiliar em estudos futuros da evapotranspiração local e os efeitos da diminuição de precipitação, durante os meses de agosto a novembro, bem como a interação da variabilidade climática regional.

Nas áreas próximas a Baixa Grande e Queimada dos Britos, regiões habitadas por comunidades, podemos identificar alternâncias na direção do vento (E/NE) e retenção dos sedimentos nas lagoas, que resultam na preservação natural de pequenos bosques, (fig. 34-a; 34-b) bem como formações pioneiras de dunas e restingas.

Figura 34: Formações de Dunas e Restinga próximo ao povoado Baixa Grande.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

A partir da precipitação pluviométrica, ocorre a recarga e elevação no nível do lençol freático. Decerto, as lagoas localizadas nos pontos mais baixos apresentam um maior aumento no nível da água, bem como presença de água em períodos mais secos (figura 35-a). Sazonalmente, por intermédio da evaporação, ocorre a diminuição do nível do lençol freático, secando as lagoas localizadas em maiores altitudes como é o caso das

lagoas próximas a Lagoa do Paraíso localizada a aproximadamente 15m a 20m do nível do mar (figura 35-b).

Figura 35: Variação do nível da água em diferentes lagoas no mesmo período.



Fonte: Acervo de pesquisa, 2019.

As lagoas são de água doces e cristalinas, cujos tons podem variar de verde-esmeralda ao azul-turquesa devido a presença de microalgas e minerais. Dessa forma, considerando os poucos pontos de coleta e a grande extensão do PNLM, alguns padrões

de temperatura da água, temperatura superficial e incidência de luz podem ser estendidos para todas as lagoas de dunas da área devido as suas características físicas similares.

6.1.3 Distribuição temporal e mudanças superficiais das lagoas interdunares de 1985 a 2020.

Para análise de distribuição temporal e mudanças superficiais das lagoas foi utilizado o conjunto de dados (disponível na coleção de imagens do GEE “JRC *Monthly Water Recurrence*, v1.3”), que se estende às imagens Landsat 5, 7 e 8 ortorretificadas. São coleções de imagens de 35 anos com o objetivo de mapear os aspectos espaciais e temporais da variabilidade da água superficial, bem como suas mudanças a longo prazo.

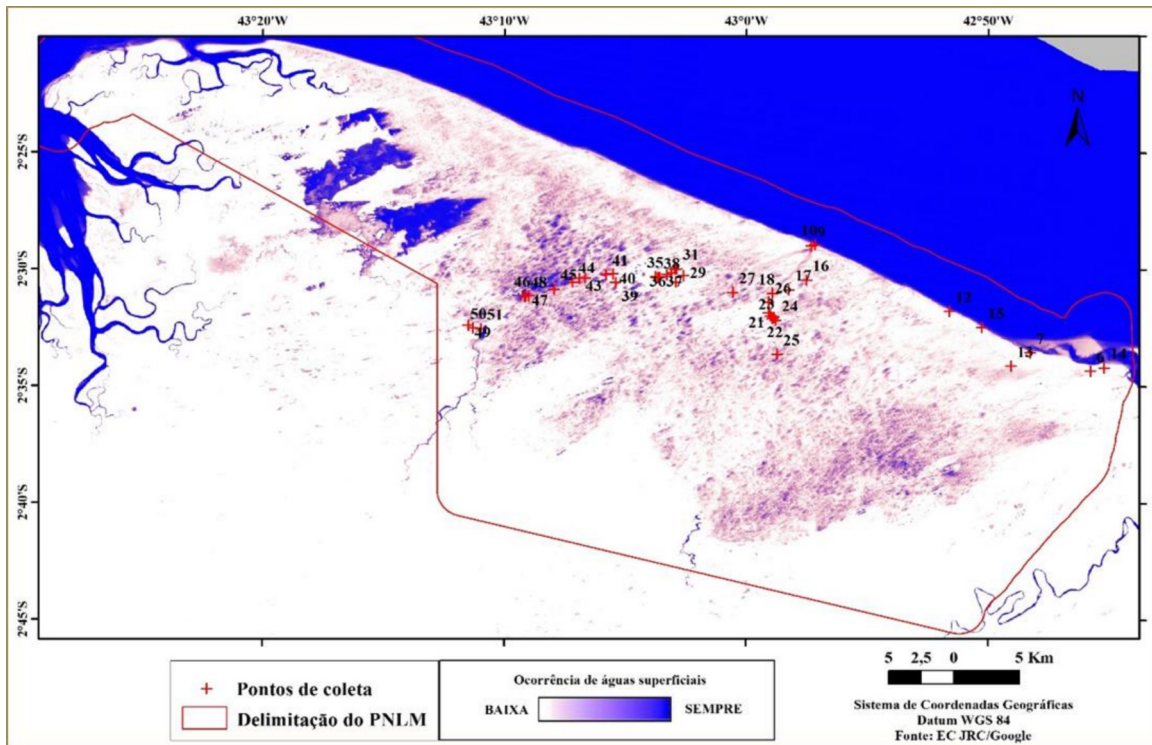
A Figura 36 mostra a ocorrência das lagoas do PNLM (variações de persistência e localização) entre março de 1985 e dezembro de 2020. Neste estudo, também se utilizou pontos de controle, na região de maior ocorrência de lagoas, com análise de campo, em novembro de 2019, para identificação das lagoas e validação dos dados de ocorrências. Classificou-se a permanência das lagoas (ocorrência de 100% para o período) em azul, e para as áreas onde a lâmina de água ocorre às vezes de rosa a roxo. As tonalidades mais claras são áreas em que as lagoas ocorrem com menos frequência.

Para destacar a intensidade de ocorrência com que a lâmina de água aumentou e diminuiu ao longo dos 35 anos, a Figura 37 nos mostra de forma espacial o ganho, perda e estabilidade na persistência na região do PNLM. Classificou-se em vermelho a redução da ocorrência das lagoas, a transição da cor preta para a estabilização ou/e mudanças não significativas e verde para o ganho de massa de água na determinada localização. A intensidade da cor representa o grau de alteração (percentualmente).

As áreas que aparecem em branco nos mapas (fig. 36 e 37), são locais em que há dados insuficientes de corpos hídricos para calcular estatísticas significativas de alterações com bases nas coleções de imagens. A ocorrência de água é um atributo da análise multitemporal que mostra onde as águas superficiais ocorreram e, dessa forma obter informações sobre a dinâmica geral das lagoas na região.

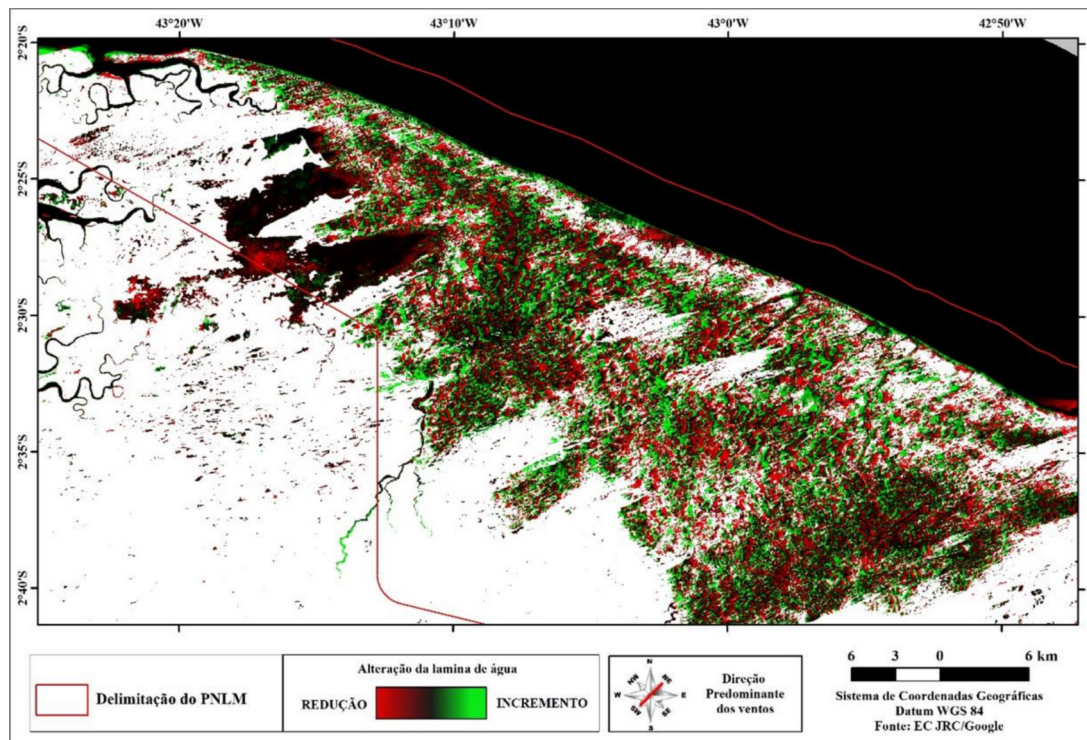
A Intensidade de mudança na ocorrência é um atributo que fornece informações sobre onde a ocorrência de águas superficiais aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma em um intervalo de tempo, obtendo informações sobre a direção da mudança ou migração das lagoas e sua intensidade de mudança. Destaca-se, por fim, que esses dados devem ser utilizados em conjunto com outras variáveis climáticas.

Figura 36: Ocorrência de águas superficiais de 1984-2020.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Figura 37: Intensidade de mudança na ocorrência de águas superficiais de 1984-2020.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

As lagoas interdunares, no período chuvoso, se conectam entre o campo de dunas livres formando pequenos canais de drenagem intermitentes com escoamento predominante em direção a região litorânea. No entorno do campo de dunas livres existem também lagoas permanentes, formadas pela contribuição de pequenos ou pelo represamento de rios, algumas lagoas raras podem ter até 15, 20 e até 30 anos considerando as regiões que sempre possuíram ocorrência de águas superficiais consideradas no mapa de ocorrência.

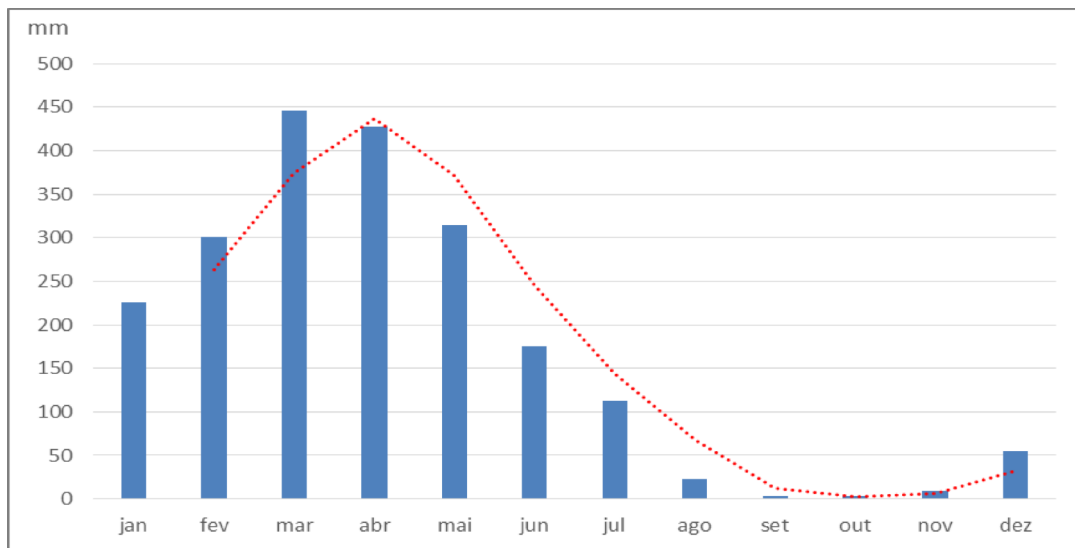
Através da análise do conjunto de mapas gerados foi possível verificar alterações significativas no posicionamento das lagoas dentro do parque. De modo geral, nos pontos monitorados, o processo direcional predominante seguiu a orientação NE-SW na maior parte da área estudada. Destacamos que apesar das imagens Landsat não apresentarem alta resolução, são consideravelmente eficientes em análises multitemporais, bem como na caracterização de processos naturais e de determinação de estimativas evolutivas da paisagem.

6.2 Implicações climáticas na região das lagoas interdunares do PNLN

É de grande importância mensurar a temperatura das lagoas considerando o aumento da temperatura da superfície terrestre. Mudanças climáticas, incluindo aumentos na frequência e intensidade dos extremos, impactou negativamente os ecossistemas terrestres, bem como contribuiu para a desertificação e degradação do solo em muitas regiões. Para a análise das implicações do clima, utilizamos a normal climatológica de referência para a região, que foi obtida através do cálculo das médias de precipitação mensal da estação disponível, seguindo os critérios e recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

A Normal utilizada no gráfico 07 refere-se ao período de 29 anos compreendido entre 1981 a 2010. As climatologias são obtidas a partir de uma média dos 30 anos anteriores para cada período de 10 anos, por exemplo, a primeira climatologia (1861-1890) é utilizada para o período de 1891 até 1900, enquanto a décima sétima e última climatologia (período de 1981-2010) é utilizada para o período atual (2011- presente).

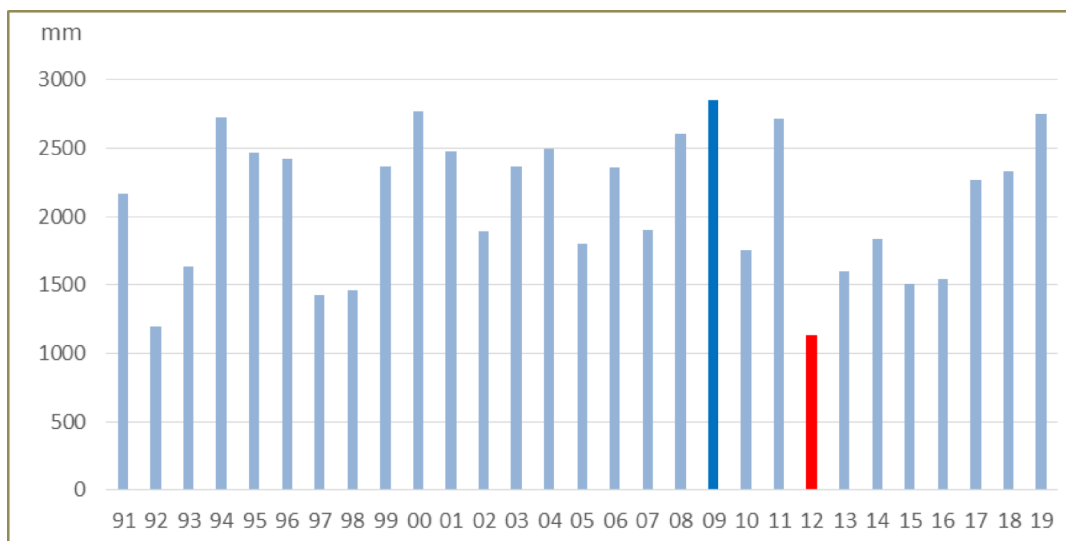
Gráfico 07: Normal climatológica de 1981 a 2010 da precipitação acumulada.



Fonte: INMET, 2020.

O gráfico 08 mostra a série temporal de 1991 a 2019 com a altura pluviométrica total de precipitação com destaque para o ano de 2009 (destaque em azul marinho) e 2012 (destaque em vermelho), com a máxima e mínimas histórica para a região. A variação anual da precipitação para o período de 2009 e 2012 foi de 1714 mm.

Gráfico 08: Altura pluviométrica anual de 1991 a 2019.



Fonte: INMET, 2020.

Observa-se que em 2012 foi o ano que apresentou o menor total pluviométrico, considerada a pior seca dos últimos 40 anos para a região. A mínima histórica na precipitação total, em 2012, ocorreu com influência do fenômeno *El Niño*, com período seco durante todo o ano (tabela 04).

Tabela 04: Ocorrência de *El Niño* e *La Niña*.

| El Niño | Intensidade | La Niña | Intensidade |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 1982-1983 | Forte | 1975-1976 | Moderado |
| 1986-1987 | Moderado | 1988-1989 | Moderado |
| 1987-1988 | Forte | 1998-1999 | Fraco |
| 1991-1992 | Forte | 1999-2000 | Moderado |
| 1992-1993 | Fraco | 2007-2008 | Moderado |
| 1997-1998 | Forte | 2010-2011 | Moderado |
| 2002-2003 | Moderado | 2017-2018 | Moderado |
| 2006-2007 | Moderado | 2020-2021 | Forte |
| 2009-2010 | Moderado | - | - |
| 2011-2012 | Forte | - | - |
| 2015-2016 | Forte | - | - |
| 2018-2019 | Moderado | - | - |

Fonte: CPTEC - INPE, 2020; *Australian Bureau of Meteorology*, 2021.

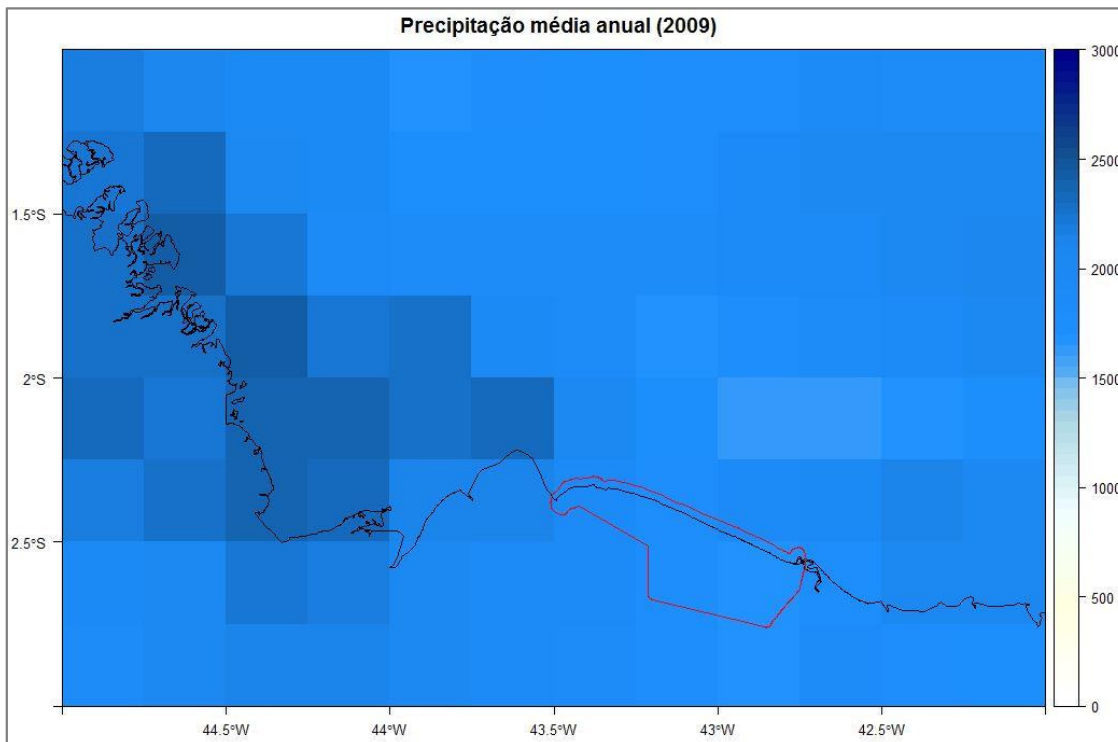
Considerando a influência dos fenômenos climáticos *El Niño* e *La Niña* no controle da precipitação na região do PNLM, os períodos de secas (2010 e 2012) estão associadas à anomalia de aquecimento, enquanto os períodos chuvosos (2009 e 2011) relacionam-se ao resfriamento das águas do Pacífico. Fenômenos que devem ser analisados em conjunto com dados de precipitação pluviométrica, dentro do mesmo intervalo temporal, em virtude da atuação de sistemas meteorológicos de diferente abrangência sobre a região.

Para a região, os limites espaciais selecionados foram: -45W, -3S, -42W, -1S, que obtiveram um subconjunto de dados para o PNLM (destaque em vermelho) usados para elaborar os resultados de visualização. Os anos selecionados foram de 2009 e 2012, para comparações nas mínimas e máximas históricas de precipitação para a região. Com o estabelecimento da precipitação anual e das médias mensais, usando o R, com os dados do TRMM (3B43) para o ano de 2009 e 2012, foi possível construir o mapa da variação espacial de precipitação pluviométrica do PNLM.

6.2.1 Variação espacial da precipitação para os anos de máxima e mínima histórica

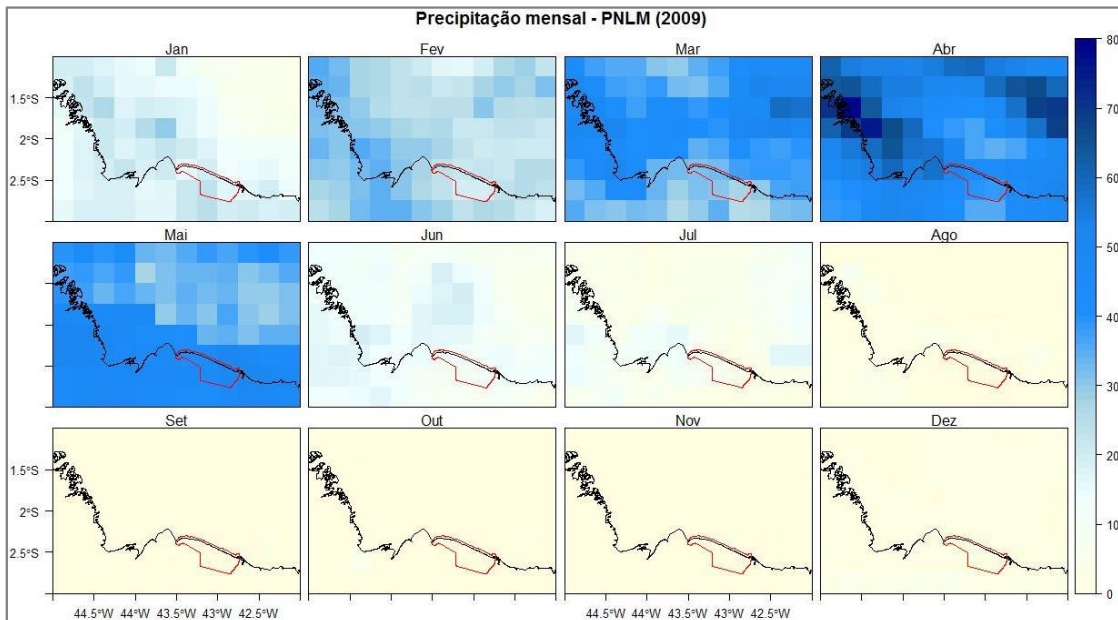
Em 2009 observou-se uma variação entre 600 e 800 mm por ano, que corrobora com os dados oficiais do INMET, correlacionando a grande variabilidade espacial de precipitação mensal existente na área de estudo (figura 38). Assim, é possível notar a anomalia de chuvas na região norte do estado do Maranhão e para o PNLM, entre março, abril e maio de 2009, resultando em diversas inundações na região e em grande parte do Nordeste, com máxima mensal de 500 mm e precipitação acima dos 2000 mm, indicando chuvas acima da média normal (figura 39).

Figura 38: Variação espacial da precipitação (mm) total para o ano de 2009.



Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

Figura 39: Variação espacial da precipitação (mm) média mensal para o ano de 2009.

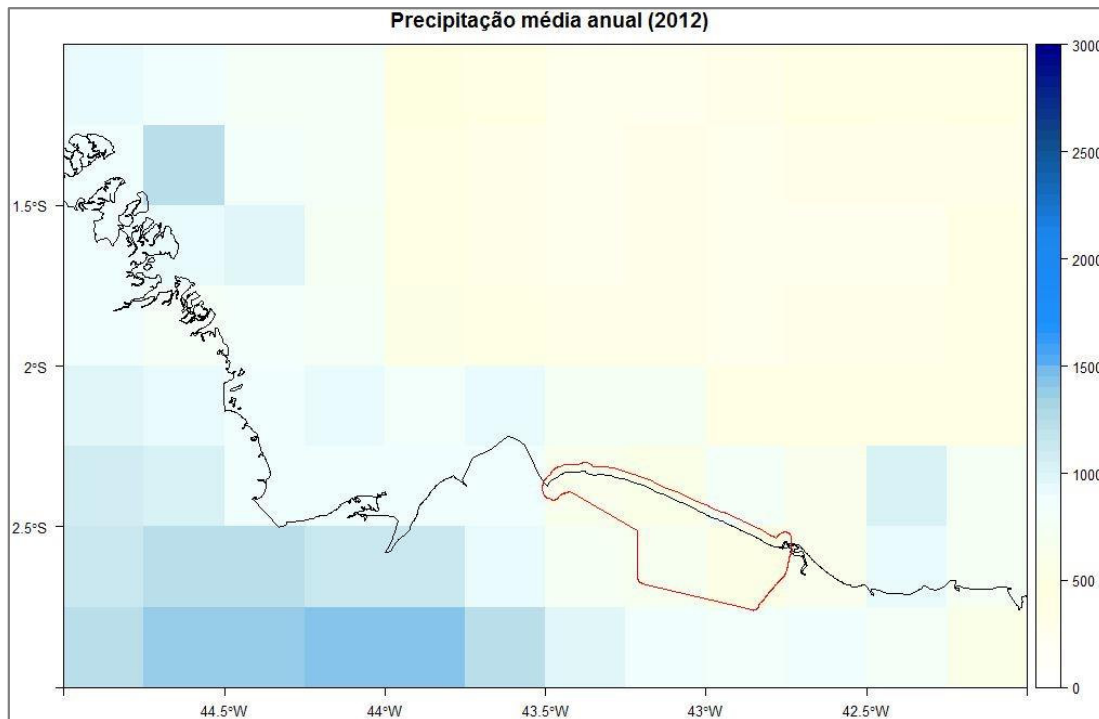


Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

A seca de 2012 foi a pior registrada na série histórica do INMET. Desde quando começou a série histórica no século 19, em 1845, nunca havia acontecido um período com chuvas abaixo da média e estiagem prolongada na região. A partir dos dados do TRMM, extraiu-se a precipitação total do ano de 2012 (figura 40), com a mínima histórica para e

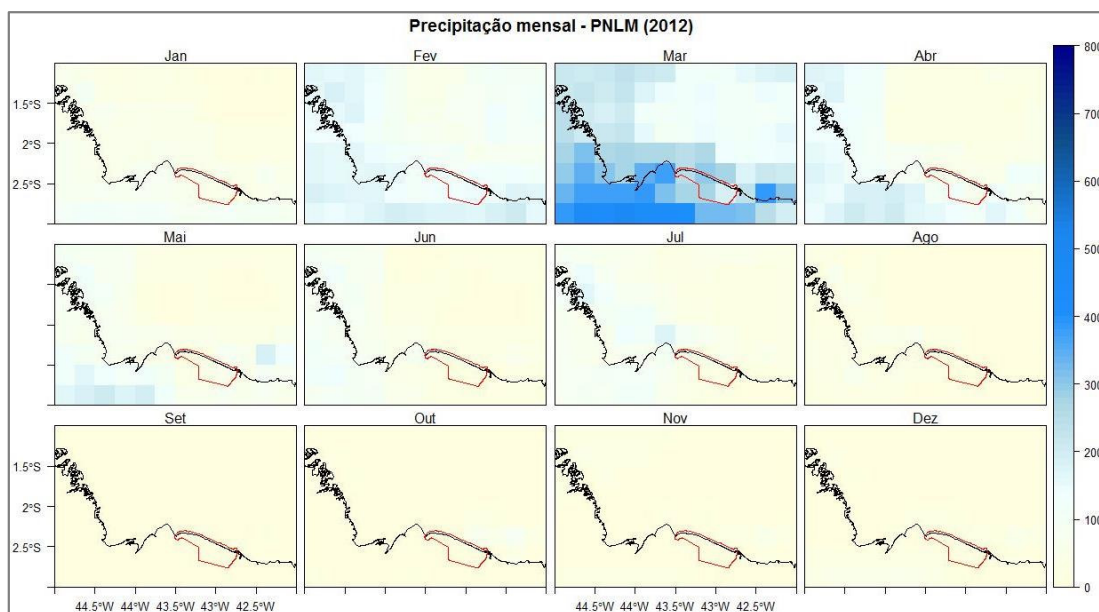
região abaixo dos 1000 mm, a média mensal da precipitação para o ano de 2012 foi abaixo de 100 mm, com valores máximos de 250 mm, aproximadamente, e mínimo de 0,00 mm como mostra a figura 41.

Figura 40: Variação espacial da precipitação (mm) total para o ano de 2012.



Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

Figura 41: Variação espacial da precipitação (mm) média mensal para o ano de 2012.

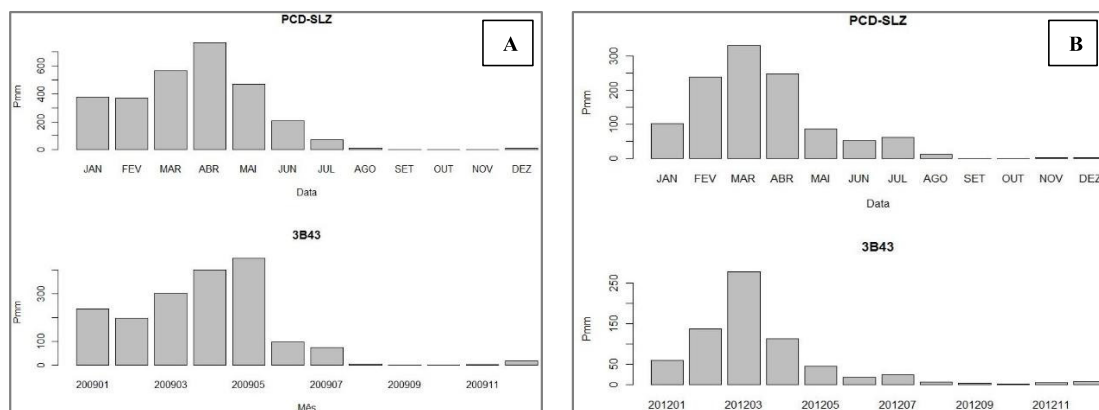


Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

Analisando a variação climática de 2009 para 2012 observou-se que o ano de 2010 foi caracterizado como um ano de *El Niño*, com pouquíssimas chuvas, com uma maior concentração no mês de março. O ano de 2011 foi marcado pelo fenômeno de *La Niña* que definiu bem o ciclo de verão e inverno para a região concentrando chuvas de janeiro a maio e o período seco de agosto a dezembro, semelhantes à normal climatológica. Diferente de 2011, o ano de 2012 alternou períodos de *La Nina* e *El Niño* com reduzidos índices de precipitação colaborando para um dos piores cenários de seca dos últimos 40 anos na região nordeste.

O gráfico 09 traz a comparação dos volumes de precipitação mensurados para o intervalo de monitoramento entre o Posto de Coleta de Dados (São Luís/MA-82280) mais próxima e os dados do Satélite TRMM-3B43. Mostrando, assim, que não houve diferença expressiva nos dois levantamentos para o conjunto de dados para a área limitada. Em concordância, o balanço pluviométrico de 2009 e 2012 mostra o resultado da predominância de intensas chuvas para o ano de 2009 e baixa precipitação durante todo o ano de 2012.

Gráfico 09: Comparação das fontes de dados de 2009 (A) e 2012 (B) do Estação-SLZ (82280) e TRMM-3B43.



Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

Para analisar os efeitos da precipitação nas lagoas, foi realizado uma comparação das lagoas para os anos de 2009 e 2012 com a abordagem multitemporal utilizando coleção de imagens do GEE do mesmo período para classificação dos corpos hídricos. Posteriormente, com lagoas demarcadas em campo extraiu-se as coordenadas para auxiliar na obtenção da análise de estimativa da precipitação pontual para as lagoas.

No limite do PNLM classificou-se as lagoas para os anos de 2009 e 2012. Utilizou-se também algumas lagoas de referência (pontos de controle) para extração

pontual dos dados de precipitação localizados próximo a Lagoa do Paraíso (**P1**), Baixa Grande (**P2**) e Povoado Queimada dos Britos (**P3**), mostrados na tabela 05.

Tabela 05: Coordenadas dos pontos selecionados.

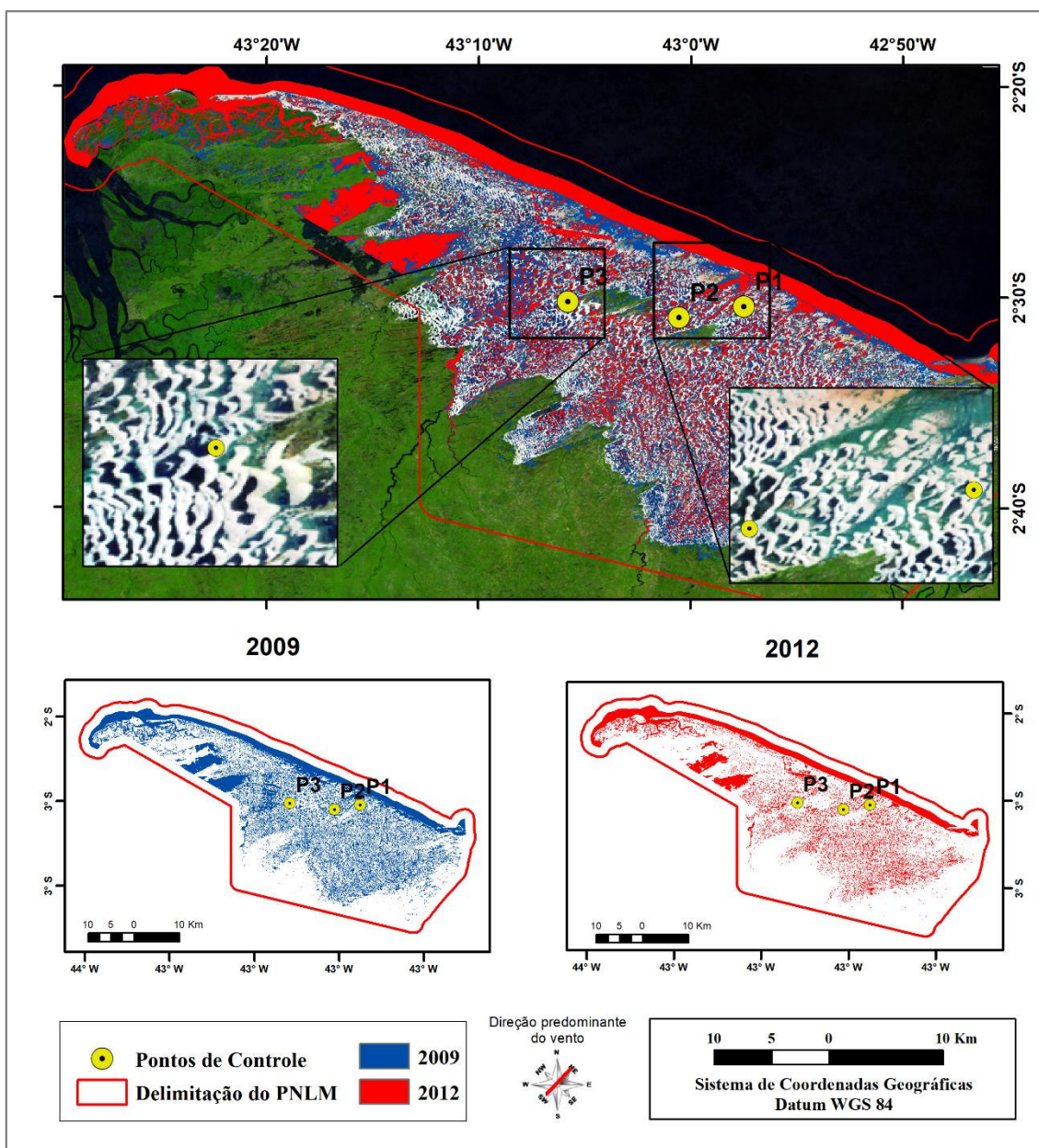
| Ponto | X | Y | Altitude (m) | Lagoas | R² |
|--------------|----------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|
| P1 | 727010 | 9722643 | 13 | Paraíso | 0,93 |
| P2 | 721358 | 9721684 | 6 | Baixa Grande | 0,95 |
| P3 | 711628 | 9723071 | 10 | Queimada dos Britos | 0,95 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

A tabela acima indica os pontos de controle com uma alta correlação com os dados de precipitação da estação de referência, destaque para seu coeficiente de determinação (R^2) explica cerca de 93,0% da variação dos dados com desvio padrão de 0,74.

Dessa maneira, houve grande alteração no padrão e nas formas das dunas que migraram em sentido NE-SW e, conseqüentemente, grande parte das lagoas do PNLN também, como mostra a figura 42.

Figura 42: Comparação das lagoas para os anos de 2009 e 2012 com pontos de controle para análise de estimativa da precipitação pontual.

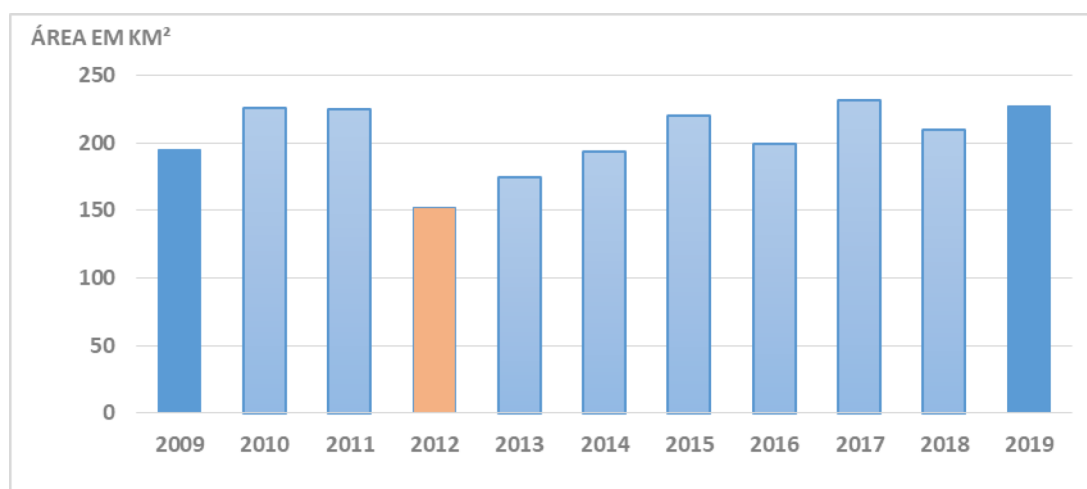


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nas últimas décadas foram registradas a ocorrência de eventos *El Niño* nos anos 2002 a 2007 e no biênio 2009-2010 e 2012 (dados do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil), reconhecida variabilidade temporal da precipitação, que se expressa em diversas escalas. Da mesma forma, ocorre uma substantiva irregularidade espacial das chuvas, dentro do mesmo intervalo temporal, em virtude da atuação de sistemas meteorológicos de diferente abrangência sobre a região.

Explicado por Andreoli e Kayano (2007), quando o dipolo do Atlântico está na fase negativa (presença de anomalias negativa no Atlântico Norte e positiva no Atlântico Sul), há o favorecimento de precipitação acima da média sobre o Nordeste brasileiro, do contrário, em sua fase positiva, há o favorecimento de precipitação abaixo da média. Dessa forma, em 2009, as lagoas perduraram durante quase todo o ano, porém o ano de 2012, ano de estiagem severa (em laranja), apenas as mais profundas permaneceram no local de forma muito reduzida e regionalmente pontual, com redução de 30% em comparação ao ano de 2009 e 67% em comparação a 2019 (em azul escuro) (gráfico 10).

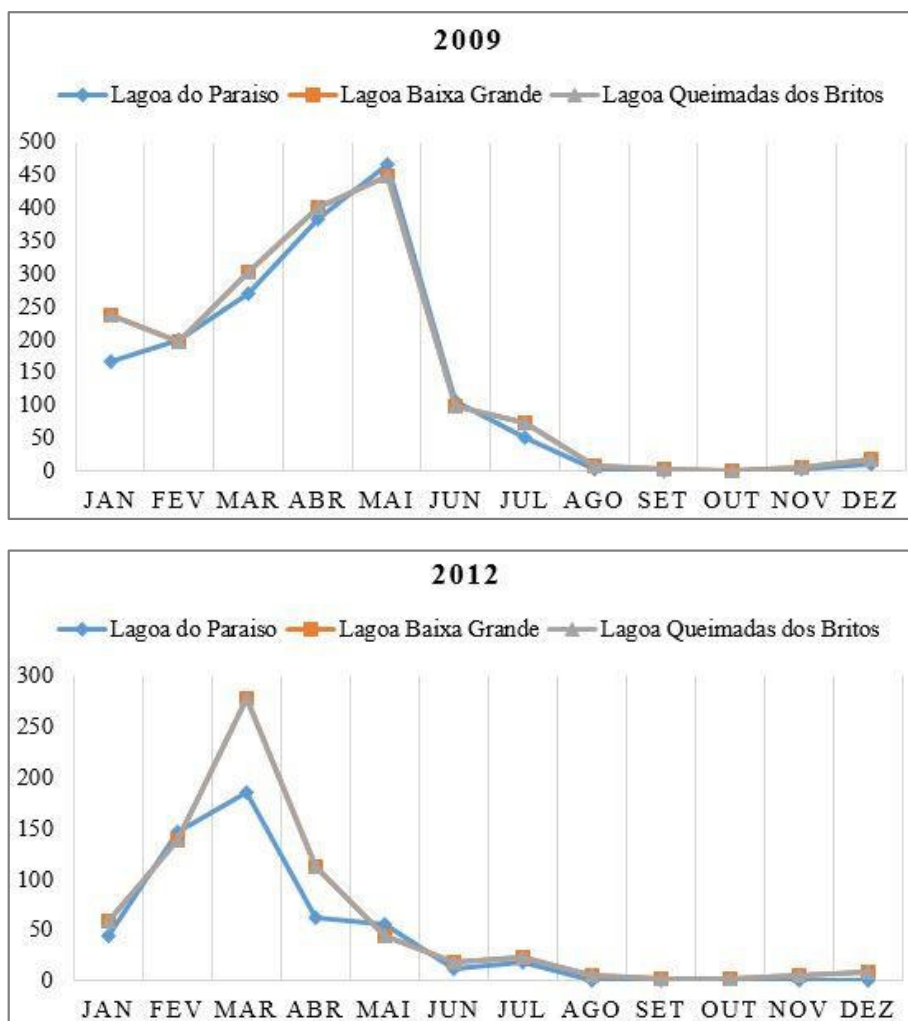
Gráfico 10: Comparação anual de 2009 a 2019 da área superficial das lagoas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O gráfico 11 mostra a comparação pontual da precipitação nos pontos P1, P2 e P3 selecionados para os anos de 2009 e 2012. Dessa forma, podemos observar que apesar da pouca distância entre elas já existe uma diferença na precipitação mensal entre elas e que o ano de 2012 essa diferença foi mais evidente. A precipitação pontual das lagoas corrobora com a mapa de classificação elaborado (fig. 42).

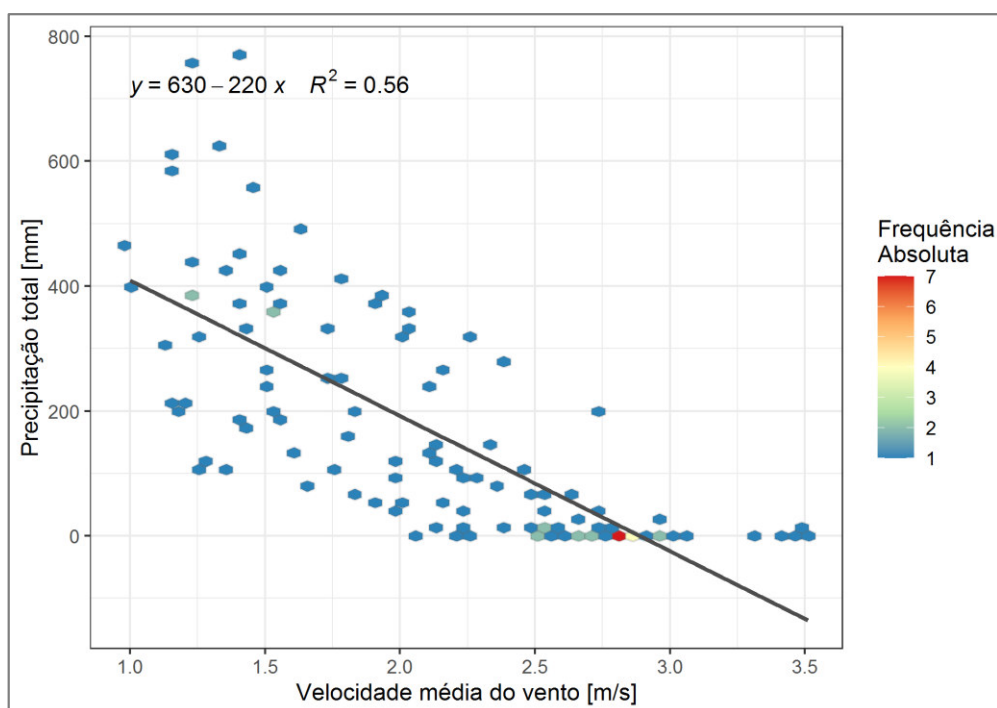
Gráfico 11: Comparação da precipitação pontual das lagoas selecionadas para os anos de 2009 e 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para sintetizar os dados de precipitação e vento usou-se a regressão linear simples com o modelo de ajuste para análise de dispersão dos dados em conjunto com frequência absoluta, visualizado no gráfico 12, dados da Estação-82280. Para o período anual analisado, a precipitação correspondeu por 56% da precisão ($r^2 = 0,56$) da variação dos valores da velocidade do vento. Analisando estas correlações, a cada 10 mm de aumento na precipitação/mês foi estimado uma queda de 2,80 m/s, com uma frequência absoluta maior que 3, no limiar de 2,5 a 3 m/s para a precipitação total que está abaixo de 100 mm para toda a série histórica.

Gráfico 12: Correlação da velocidade do vento com a precipitação diante da frequência absoluta.

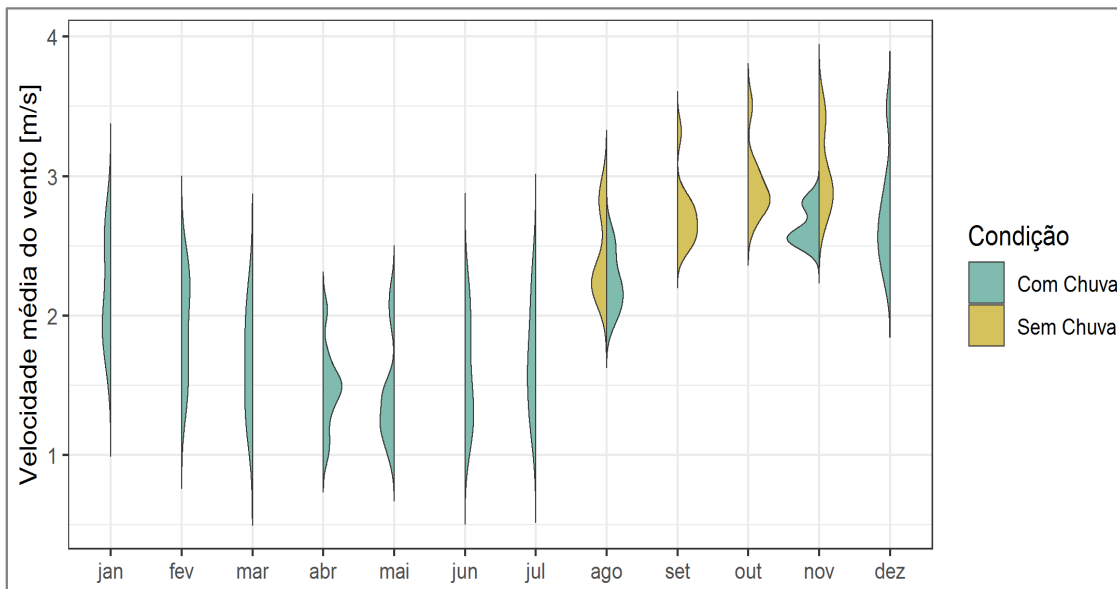


Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

Para interpretar uma medida de concordância entre dois conjuntos de classificações relativas aos dados de velocidade do vento e de precipitação, tendo a possibilidade de ser generalizado para um coeficiente de correlação parcial, ou seja, quanto maior a precipitação menor é velocidade média dos ventos. Entretanto, em relação ao coeficiente de correlação seja positivo ou como no caso do estudo, negativo, não se pode extrair uma certeza imediata de causalidade nos resultados, pois deve ser estudado com outras variáveis climáticas para um resultado mais apurado da série temporal.

Com o objetivo de verificar a distribuição dos dados. O gráfico (box) de dispersão é representado pela amplitude do gráfico onde temos, alguns valores como inferior (percentil de 25%), superior (percentil de 75%) e linha com a mediana. Desta forma, para uma melhor comparação e visualização, utilizou-se a densidade de probabilidade que é a ocorrência de um determinado valor de uma variável aleatória calculada através de uma distribuição normal de probabilidade. A distribuição normal pode assumir infinitas formas e posições a depender do desvio padrão e da média.

Dessa forma, para analisar as características de uma distribuição normal, pode-se plotar a função densidade de probabilidade de forma simples como no gráfico 13.

Gráfico 13: Densidade de probabilidade (vento x ocorrência de chuvas) 2008 – 2017.

Fonte: Elaborado em R pelo autor, 2020.

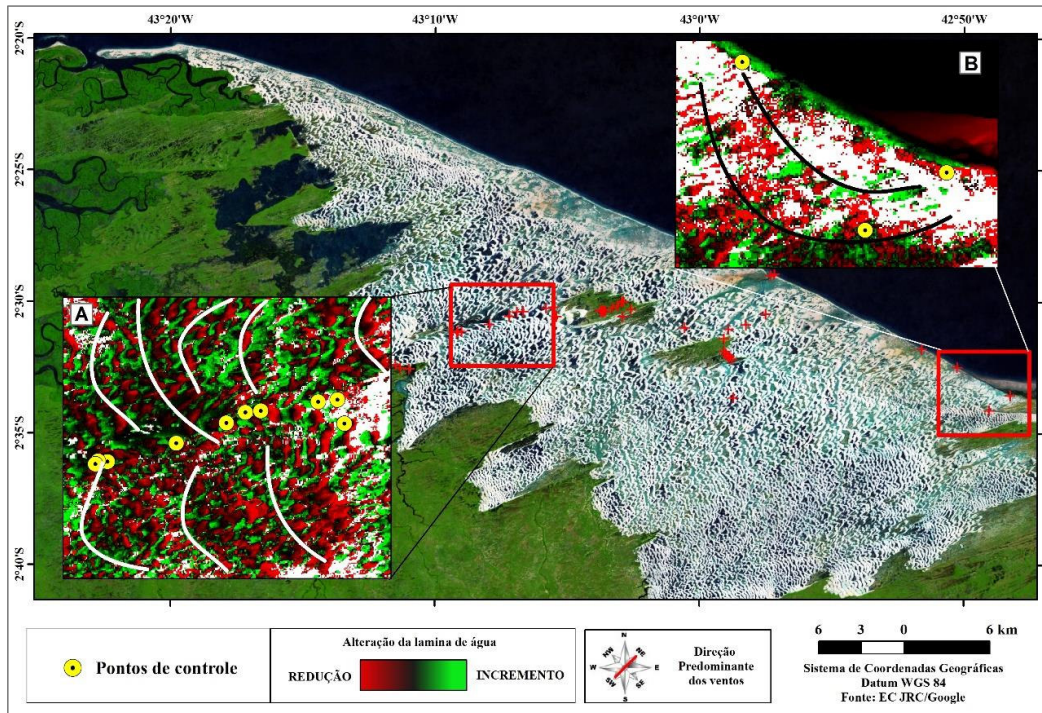
Corroborando com os dados da estação climática o gráfico de densidades de probabilidade do kernel de dados, mostra uma tendência de aumento das máximas de velocidade do vento diante de meses sem chuva. Para o período estudado, as velocidades mínimas e máximas dos ventos, respectivamente, foi de 1 até 4,0 m/s, variando entre NE e E com maiores médias entre agosto e novembro (período de menor ocorrência de precipitação), enquanto as menores velocidades ocorrem entre fevereiro a junho (período de maior ocorrência de precipitação).

Por fim, considerando os dados que, anualmente, durante os meses de agosto a novembro ocorre, na região, alterações mais significativas das lagoas interdunares relacionando a maior intensidade dos ventos (migrações de dunas) e a não ocorrência de precipitação pontual.

6.3 Análise da migração das lagoas através da utilização de imagens de satélite e análise de campo.

Todo o litoral da área de estudo tem como característica principal: processos eólicos altamente dinâmicos. A predominância da migração das lagoas segue a dos ventos apenas em algumas regiões como na região A (figura 43-A) de sentido NE-SW (predominante) e outras de sentido E-W, ou seja, com variações ao longo da área selecionada. Pontualmente, as lagoas da região B possuem migração em direção NE-SW (figura 43-B).

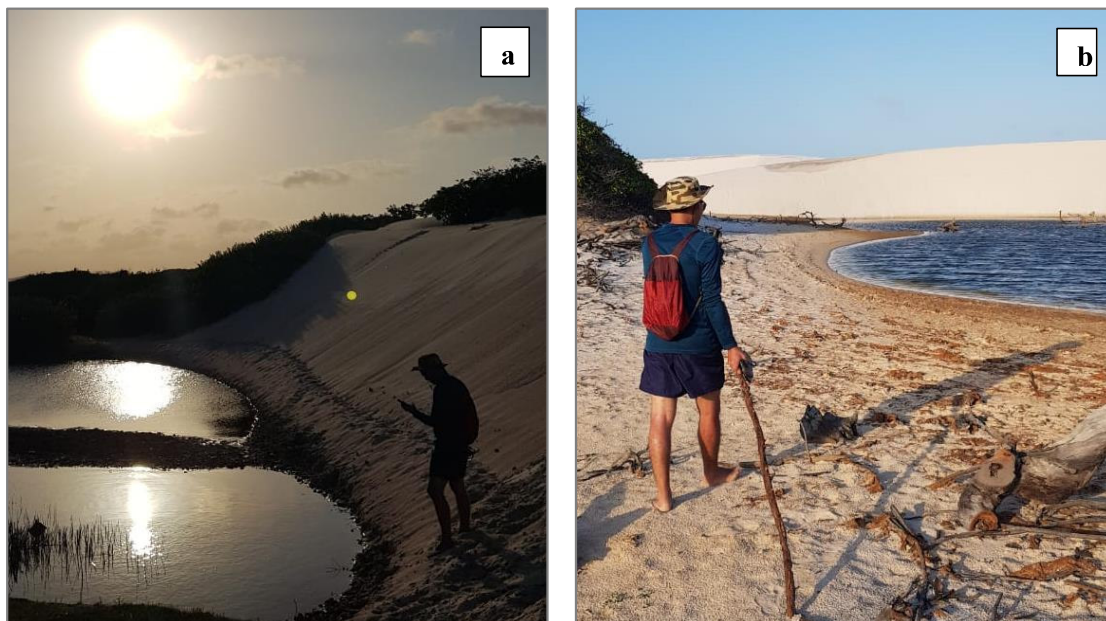
Figura 43: Predominância da direção de ocorrência das lagoas em áreas visitadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Para os pontos de controle coletados em campo, foram selecionados para análise temporal das imagens com base na variação da refletância de superfície, visando identificar o ano da ocorrência de lagoas secas e cheias, auxiliando na visualização das imagens. Para a seleção dos pontos foi considerada a relevância amostral, como lagoas cheias e secas da zona praial até a região da zona primitiva do parque (figura 44).

Figura 44: Exemplo de pontos de controle para identificação das lagoas (A-lagoas cheias, B-seca) próximo ao povoado Queimada dos Britos.

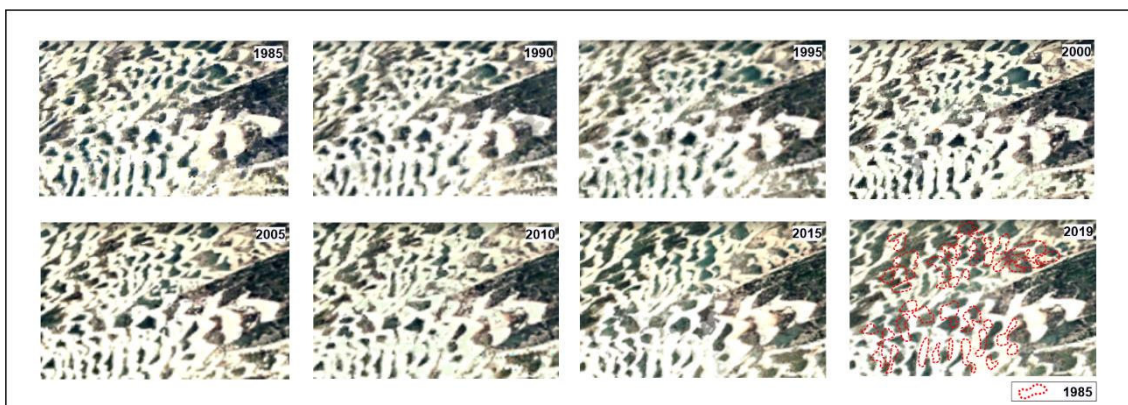


Fonte: Acervo da pesquisa, 2020.

Durante o processo de classificação das imagens Landsat, foram selecionadas as coleções de imagens com base nos pontos de controle visitados em campo para a identificação da migração direcional das lagoas. Através da análise conjunta de imagens Landsat disponíveis obtidas pelo GEE, foi possível verificar alterações significativas no posicionamento das lagoas dentro do parque usando vetorização e sobreposição de imagens.

De modo geral, nos pontos monitorados, o processo direcional predominante seguiu a orientação NE-SW, como corroborado no mapa anterior, na maior parte da área de destaque (Figura 43-a) com uma estimativa de 350 a 700m de variação posicional de migração considerando o ano de 1985 a 2019 para a região selecionada (figura 45).

Figura 45: Estimativa de migração quinzenal das lagoas na região visitada de 1985 a 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

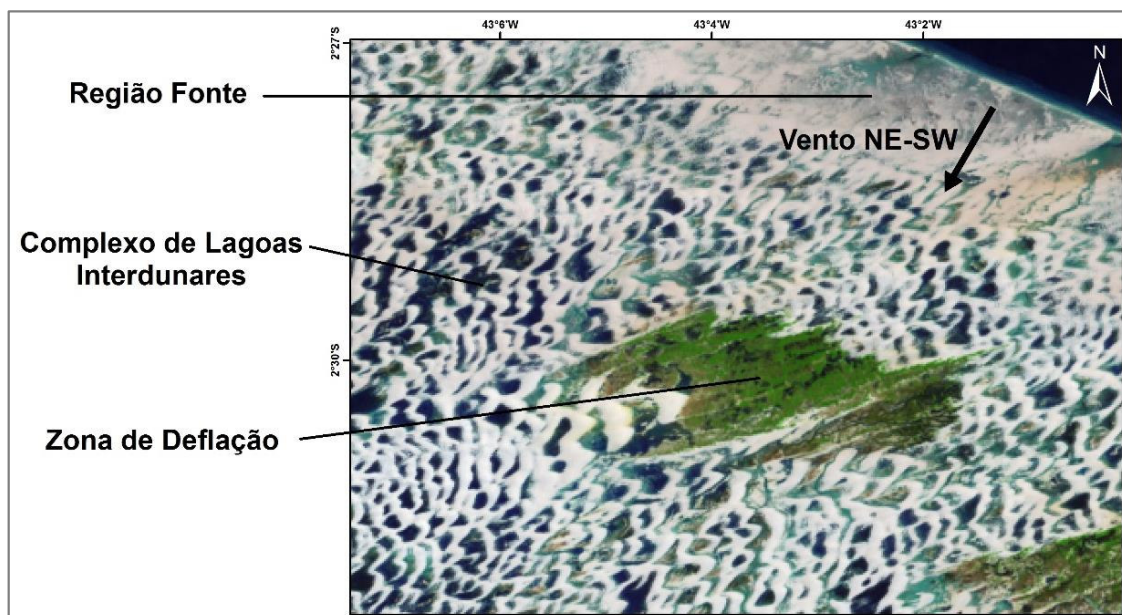
Intervalos menores de tempo no conjunto de imagens não permitiram a observação de mudanças significativas devido a intensa dinâmica da área e a grande concentração de nuvens na série disponível no GEE para a região do estudo com os mesmos dados de reflectância e com os mesmos coeficientes de calibração (CHANDER *et al.*, 2009).

O fato ocorre na região onde predomina a entrada de ventos de **NE**. Estes ventos se formam próximo às praias e se deslocam para o interior, tendo um deslocamento relativamente rápido e consistente. As lagoas interdunares possuem menor taxa de deslocamento anual e são moldadas pela ligação lateral de barcanas em lugares com maior volume de areia disponível.

As alterações de direção nas lagoas de migração na região leste podem estar na proximidade com a zona de deflação próxima que altera o transporte sedimentar na região e cria um novo sistema isostático hídrico, ou seja, uma resposta diferente na acomodação dos corpos hídricos desta área.

Quanto ao sistema eólico local (figura 46) foi identificado uma zona de deflação sujeita a alagamento periódicos e exibem geometria em planta subcordante ao lado barlavento do campo de dunas (MARTINHO *et al.*, 2003). Na região em destaque, foi observada a maior variação nas lagoas monitoradas, com menor avanço do sistema de dunas. Entende-se que a pouca alteração é devido a presença de um conjunto de corpos hídricos volumosos que contribui para a redução da taxa de migração de areia, mostrando que a sedimentação é pouco intensa próxima a corpos hídricos.

Figura 46: Sistema eólico local.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020. Imagem Landsat 8.

O litoral da área de estudo tem como característica principal a presença de feições eólicas altamente dinâmicas. Neste sentido, a análise multitemporal é uma excelente ferramenta para medições indiretas da dinâmica e mobilidade das lagoas interdunares. Sendo possível descrever também a dinâmica do complexo de lagoas e a migração como ocorre (pontual), bem como as interações entre elementos dentro da paisagem e como estes mudam ao longo do tempo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise das imagens e dos dados de satélite selecionados foram possíveis visualizações espaciais e mensuração pluviométrica das lagoas, que apresentaram avanço e diferenças significativas de incidência de precipitação para um mesmo período analisado no Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, entre os anos de 2009 a 2012.

Com a classificação das lagoas do PNLM, na plataforma Google Earth Engine, foi possível obter uma coleção de imagens de 35 anos, e dessa forma, inferir na identificação do sentido de deslocamento das lagoas, que de forma contínua, expandiu-se do litoral em direção NE-SW ao interior do continente seguindo a circulação dos ventos alísios da região com diferenças pontuais de direção em determinadas áreas.

Os dados de precipitação pluviométrica com a variação temporal do TRMM concomitante com dados de vento permitiram identificar, a partir de uma série histórica

de dados, quando ocorreram as maiores alterações no regime hídrico ao longo do tempo em diferentes lagoas de forma muito pontual e precisa no PNLM, validado pela estação disponível, possuindo uma cobertura de dados de mais de 20 anos. Tal relação entre os dados evidenciaram a alternância perfeita entre precipitação e vento para garantir a beleza das lagoas entre dunas do PNLM durante todo ano.

A utilização da Linguagem R para a análise exploratória dos dados foi extremamente importante, pois orientou toda a manipulação de conjuntos de dados de grande extensão, as análises estatísticas e produção de mapas na espacialização dos dados, bem como de documentos e apresentações interativas centradas nos dados obtidos.

A análise multitemporal utilizada nesta pesquisa se mostrou extremamente eficaz e eficiente quanto ao monitoramento das lagoas do PNLM e de qualquer corpo hídrico na região de entorno, contribuindo dessa forma para o planejamento e manejo do PNLM, além de ser aplicável facilmente para diversas outras regiões que necessitam de monitoramento de baixo custo.

REFERÊNCIAS

ABAKERLI, S. *A critique of development and conservation policies in environmentally sensitive regions in Brazil*. Geoforum, v. 32, n. 4, p. 551–565, 2001.

AB’SABER, A. N. Contribuição a Geomorfologia do Estado do Maranhão. *Notícia Geomorfologia*. Campinas: Departamento de Geografia da Unicamp, 3 (5):35-45, abr.1960.

ADAMS, D. K.; SOUZA, E. P. DE; COSTA, A. A. Convecção úmida na Amazônia: implicações para modelagem numérica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, p. 168-178, 2009.

ADLER, R. F.; KUMMEROW, C.; BOLVIN, D.; CURTIS, S.; KIDD, C. *Status of TRMM monthly estimates of tropical precipitation*. In: *Cloud Systems, Hurricanes, and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*. American Meteorological Society, Boston, MA p. 223-234. 2003.

AGNEW, C. ANDERSON, E. *Water resources in the arid realm*. Routledge, 1992.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R; MIZUSAKI, A. M. P. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 3, p. 125-138, 2017.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano Nacional de Recursos Hídricos - Secretaria de Recursos Hídricos. Síntese Executiva. Brasília, MMA, 2006.

ARAÚJO, A. Contribuição ao conhecimento das desmídias de hábito filamentosas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses - MA. In: *Anais do VII Congresso Brasileiro de Limnologia* 274 pp. 1999.

ARAÚJO, D.S.D; SCARANO, F.R.; SÁ, C.F.C.; KURTZ, B.C.; ZALUAR, H.L.T.; MONTEZUMA, R.C.M.; OLIVEIRA, R.C. Comunidades Vegetais do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba. In: Esteves, F.A (ed). *Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé*, NUPEM/UFRJ-RJ. 39-62. 1998.

AUSTRALIAN BUREAU OF METEOROLOGY. *An alert system for the El Niño–Southern Oscillation*. ENSO Outlook archive, 2021. Disponível em: < <http://www.bom.gov.au/climate/enso/outlook/#tabs=ENSO-Outlook-history> >. Acesso em: 31/07/2021.

AZEVEDO, R. P. Interpretação geodinâmica da evolução mesozóica da Bacia de Barreirinhas. In: Congresso Brasileiro De Geologia. v.3. p. 1115-1130. 1986.

BACMEISTER J. T., HANNAY C., MEDEIROS B., GETTELMAN A., NEALE R., FREDRIKSEN H. B., LIPSCOMB W. H., SIMPSON I., BAILEY D. A., HOLLAND M., LINDSAY K., OTTO-BLIESNER B. *CO 2 increase experiments using the Community Earth System Model (CESM): Relationship to climate sensitivity and comparison of CESM1 to CESM2*. Manuscript submitted for publication to Journal of Advances in Modeling Earth Systems, p. 1850-2014, 2020.

BANDEIRA, I. C. N. Geodiversidade do estado do Maranhão. Teresina: CPRM, 2013.

BARBOSA, G. V.; PINTO, M. N. Geomorfologia da folha SA-23 (São Luiz) e parte da folha SA-24 (Fortaleza). Brasil. Projeto RADAM BRASIL. Folha SA-23 (São Luiz) e parte da folha SA-24 (Fortaleza), p. 3-37, 1973.

BERRY, B. JL. *Approaches to regional analysis: a synthesis*. Annals of the Association of American Geographers, v. 54, n. 1, p. 2-11, 1964.

BIMONTE, S., SCHNEIDER, M., MAHBOUBI, H., PINET, F., CHANET, J. P. *Merging spatial data cubes using the GIS overlay operator*. Journal of decision systems, v. 19, n. 3, p. 261-290, 2010.

BIRD, J. *Scale in regional study: illustrated by brief comparisons between the western peninsulas of England and France*. Geography, v. 41, n. 1, p. 25-38, 1956.

BITENCOURT, C. DE C. A. Integração de análise estatística multivariada e geogrocossamento: aplicação para estudos de enquadramento de corpos d'água. 2018. 160 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2018.

BRANDÃO, J. A. S. L. Revisão e atualização estratigráfica das bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão. Rio de Janeiro: Petrobras, 1990.

BRASCH, S.; MCPHERSON, E. G.; LINSEN, L. *Interactive Data Visualisation for Animating Urban Tree Growth*. International Journal of Modelling and Simulation, v. 29, n. 3, p. 306-314, 2009.

BRASIL, 1981. Decreto Federal n_ 86.060, de 02 de junho de 1981. Available at: www.ibama.gov.br.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam Folha Sa. 23 São Luís e parte da folha SA.24 Fortaleza;

geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. 1v (Levantamento de Recursos Naturais, 3). 1973.

BRITO, P.S., GUIMARÃES, E.C., FERREIRA, B.R.A., OTTONI, F.P., PIORSKI N.M. *Freshwater fishes of the Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses and adjacent areas*. Biota Neotropica. 19(3): e20180660. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2018-0660>. Acesso em: 12/04/2020.

BROWN, J. E. *An analysis of the performance of hybrid infrared and microwave satellite precipitation algorithms over India and adjacent regions*. Remote Sensing of Environment, v. 101, n. 1, p. 63-81, 2006.

BRUCK, E. C., FREIRE, A. M. V., DE LIMA, M. F. Unidades de Conservação no Brasil: cadastramento e vegetação 1991-1994. Relatório Síntese. Brasília: IBAMA, 1995.

CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. Fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. Câmara G, Davis C, Monteiro AMV, organizadores. Introdução à ciência da geoinformação.[acessado 2005 Out 19]. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd>, 2001.

_____. Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. Geografia, Rio Claro, v. 28, n. 1, p. 83-96, 2003.

CAMFIELD, F. E.; MORANG, A. *Defining and interpreting shoreline change*. Ocean & Coastal Management, v. 32, n. 3, p. 129-151, 1996.

CARVALHO, M. A. V. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: aspectos observacionais. Revista Brasileira de Meteorologia. v. 28, n. 3, p.305-316, 2013.

CASTRO, I. E. DE. Das dificuldades de pensar a escala numa perspectiva geográfica dos fenômenos. Trabalho apresentado no Colóquio “O discurso geográfico na aurora do século XXI. Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFSC. Florianópolis, 1996.

CHANDER, G; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors*. Remote sensing of environment, v. 113, n. 5, p. 893-903, 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. Edgard Blücher, 1999.

CHU, Z. X., SUN, X. G., ZHAI, S. K., XU, K. H. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. Marine Geology, v. 227, n. 1-2, p. 13-30, 2006.

CLARKE, A. *Principles of thermal ecology: Temperature, energy and life*. Oxford University Press, 2017.

COSTA, J. B. S.; BORGES, M. D. S.; IGREJA, H. L. S.; PINHEIRO, R. V. L. Aspectos da tectônica cenozóica na região do salgado, litoral nordeste do Estado do Pará. III Simpósio de Geologia da Amazônia. Resumos Expandidos. Belém. SBG-Núcleo Norte, p. 156-165, 1991.

COSTA, V. R. M.; DA SILVA BEZERRA, D.; GUTERRES, C. E.; DA CONCEIÇÃO COELHO, A.; DOS SANTOS, A. L. S.; DA SILVA SOUSA, A. Simulação de movimentação de dunas na zona costeira do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, v. 1, p. 5501-5512, 2017.

CPRM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Luís SW/NW, Folhas SA.23-V e SA.23-Y. Estados do Pará e Maranhão. Escala 1:500.000. Organizado por Herbert Georges de Almeida. – Brasília: CPRM, 2000.

CPTEC/INPE. Ocorrência de el niño e la niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 02/02/2020.

DA SILVA-FUZZO, D. F.; ROCHA, J. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo TRMM, para o Estado do Paraná, e sua contribuição ao monitoramento agrometeorológico. *Formação (Online)*, v. 3, n. 23, 2016.

DINSA, T. T.; GEMEDA, D. O. The Role of Wetlands for Climate Change Mitigation and Biodiversity Conservation. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 23, n. 7, p. 1297-1300, 2019.

DOS SANTOS, A. L. S.; BORGES, H. P.; SILVA JÚNIOR, C. H. L.; PIEDADE JUNIOR, R. N.; DA SILVA BEZERRA, D. Modelling Dunes from Lençóis Maranhenses National park (Brazil): Largest dune field in South America. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2019. Disponível em < <https://doi:10.1038/s41598-019-43735-0>>. Acesso em: mai.2021.

DOWNING, J. A., Y. T. PRAIRIE, J. J. COLE, C. M. DUARTE, L. J. TRANVIK, R. G. STRIEGL, W. H. MCDOWELL, P. KORTELAJINEN, N. F. CARACO, J. M. MELACK & J. MIDDELBURG. *The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments*. *Limnology and Oceanography*, 51: 2388-2397. 2006.

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P. Estimativa da erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Juma com base em dados do satélite TRMM. *Caderno de Geografia*, v. 29, n. 52, p. 45-60, 2019.

DU, F.; ZHU, A.-X.; QI, F. *Interactive visual cluster detection in large geospatial datasets based on dynamic density volume visualization*. *Geocarto International*, v. 31, n. 6, p. 597-611, 2016.

EBERT, E. E.; JANOWIAK, J. E.; KIDD, C. *Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, n. 1, p. 47-64, 2007.

EL KENAWY, A. M.; LOPEZ-M, J. I.; MCCABE, M. F.; VICENTE-S, S. M. *Evaluation of the TMPA-3B42 precipitation product using a high-density rain gauge network over complex terrain in northeastern Iberia*. *Glob. Planet. Chang*, 133, p. 188-200. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.013>. Acesso em: 20/03/2020.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento de Conservação de Solos 38(Rio de Janeiro, RJ) Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1v. 1979.

_____. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ) Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado do Maranhão. Rio de Janeiro. EMBRAPA-SNLCS/SUDENE-DRN. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim de Pesquisa, 35), (Brasil. SUDENE-DRN. Série Recursos de Solos, 17). 964p. 1986.

_____. Solos Indiscriminados de Mangue. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica (ageitec), 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7j02wx7ha087apz2c3xd0do.html - Embrapa 2011. Acesso em: 20 jan. 2021.

ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. FINEP/Interciência, 575p. 1988.

_____; ISHII, I. H.; CAMARGO, A. F. M. Pesquisas limnológicas em 14 lagoas do litoral do Estado do Rio de Janeiro. Restingas: Origem, Estrutura e Processo, p. 441-452, 1984.

FARIAS, E. G. G.; MAIA, L. P. Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, v. 10, n. 4, p. 521-544, 2010.

FEIJÓ, F. J. Bacia de Barreirinhas. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 8, n. 1, p. 103-109, 1994.

FEITOSA, A. C. Lençóis Maranhenses: paisagem exótica-deserto na mídia. XI Simpósio. Brasileiro de Geografia Física Aplicada, São Paulo, SBGFA, 2005.

_____. Relevo do Estado do Maranhão: uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA; REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY. p. 1-11. 2006.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação. CA Felgueiras-São José dos Campos: INPE, 1999.

FENG, L.; HU, C.; CHEN, X.; CAI, X.; TIAN, L.; GAN, W. *Assessment of inundation changes of Poyang Lake using MODIS observations between 2000 and 2010*. Remote Sensing of Environment, v. 121, p. 80-92, 2012.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. Revista Brasileira de Climatologia, v.1, p.15-28, 2005.

FERREIRA, M. A. Bacia de Barreirinhas. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e biocombustíveis. Licitações de Petróleo e Gás. Seminário técnico-ambiental, 11^a rodada. 2013. Disponível em: http://filesrodadas.anp.gov.br/arquivos/Seminarios_r11/tec_ambiental/Bacia_de_barreirinhas.pdf. Acesso em: 01/10/2021.

FIGUEIREDO, A. M. DE; CARMINATTI, M.; PEREIRA FILHO, J. A.; TEIXEIRA, L. *Barreirinhas Basin, an Equatorial Atlantic Transform Basin*. AAPG Bulletin, v. 67, n. 3, p. 449-449, 1983.

FLORENZANO, T. G. Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. (org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, p. 31-71. 2008.

FLORIANI, D.C.; FUKUDA, J.C.; PINTO, E.F. *Lençóis Maranhenses National Park: the largest coastal dunes area in South America*. Gerenciamento Costeiro Integrado 2, 62–64. 2004.

FORMAN, R. T. T. *Land Mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press. p. 535, 1995.

FRYBERGER, S. G.; DEAN, G. *Dune forms and wind regime*. In: *A study of global sand seas*. US Government Printing Office Washington. p. 137-169. 1979.

_____; ABDULKADER, AL-SARI; A. M.; CLISHAM, T. J. *Eolian dune, interdune, sand sheet, and siliciclastic sabka sediments of offshore prograding sand sea, Dhahran Area, Saudi Arabia*. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v.67, n.2, p. 280-312, 1983.

FU, B.; POLLINO, C. A.; CUDDY, S. M.; ANDREWS, F. Assessing climate change impacts on wetlands in a flow regulated catchment: A case study in the Macquarie Marshes, Australia. *Journal of environmental management*, v. 157, p. 127-138, 2015.

FUJACO, M. A. G.; LEITE, M. G. P.; MESSIAS, M. C. T. B. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 63, n. 4, p. 695-701, 2010.

GALLO, B. C. Imagens multitemporais do Landsat TM como estratégia no apoio ao levantamento pedológico. 78 f. 2015. Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP. 2015.

GARDNER, R. C.; BARCHIESI, S.; BELTRAME, C.; FINLAYSON, C.; GALEWSKI, T.; HARRISON, I.; PAGANINI, M.; PERENNOU, C.; PRITCHARD, D.; ROSENQVIST, A.; WALPOLE, M. *State of the world's wetlands and their services to people: a compilation of recent analyses*. Ramsar Briefing Note No. 7. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2589447>. Acesso em: 02/03/2020.

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GASTÃO, F.G.C.; MAIA, L.P. O uso de dados da missão SRTM e sedimentológicos nos estudos de geomorfologia e padrões de drenagem na região dos Lençóis Maranhenses. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 62, n. 2, p. 155-168, 2010.

GONÇALVES, R. A. Contribuição ao mapeamento geológico e geomorfológico dos depósitos eólicos da planície costeira do Maranhão: região de Barreirinhas e Rio Novo-Lençóis Maranhenses-MA-Brasil. 1997. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado), Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.

_____; DE OLIVEIRA LEHUGEUR, L. G.; DE ALENCAR CASTRO, J. W.; PEDROTO, Â. E. S. Classificação das Feições Eólicas dos Lençóis Maranhenses-Maranhão-Brasil. *Mercator*, v. 2, n. 3, p. 99-112, 2003.

_____; SANTOS J. H. S; CASTRO J. W. C. O papel da Dinâmica costeira no controle dos campos de dunas eólicas do setor leste da planície costeira do Maranhão-BR-Lençóis Maranhenses. In: X Congresso Brasileiro da ABEQUA. p. 1-6. 2005.

GORELICK, N. Google earth engine. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria: American Geophysical Union. p. 11997. 2013.

GOTTSCHALCK, J.; MENG, J.; RODELL, M.; HOUSER, P. *Analysis of multiple precipitation products and preliminary assessment of their impact on global land data assimilation system land surface states*. Journal of Hydrometeorology, v. 6, n. 5, p. 573-598, 2005.

GOULART, M. D.; CALLISTO, M. Bioindicadores de qualidade de água como ferramenta em estudos de impacto ambiental. Revista da FAPAM, v. 2, n. 1, p. 156-164, 2003.

GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; DIODATO, M. A.; VITAL, H. Análise multitemporal do uso e ocupação do solo, em áreas de atuação da indústria petrolífera, com base em produtos de sensoriamento remoto e Sistema de Informação Geográfica: Município de Guamaré (RN). Geografia, v. 30, n. 1, p. 177-197, 2005.

HARARI, J.; PEREIRA, J.E.R.; ALFREDINI, P. & SOUZA, O.J. Estudo da circulação de maré na sub-área oceânica do canal de acesso de ponta da madeira (MA), através de modelagem numérica. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Depto. Hidráulica e Sanitária. BT/PHD/19. 1995.

HARTSHORNE, R. Propósitos e natureza da Geografia. São Paulo:HUCITEC/EDUSP, 1978 (tradução: The Nature of Geography), 1939.

HARVEY, D. Explanation in Geography. New York, St. Martin's Press, 1969.

HAY, J. D.; LACERDA, L. D. Ciclagem de nutrientes no ecossistema de restinga. Restingas: origem, estrutura, processos. Niterói, CEUFF, p. 159-193, 1984.

HERBERT, R. J.; ROSS, K.; WHETTER, T.; BONE, J. *Maintaining ecological resilience on a regional scale: Coastal saline lagoons in a northern European marine protected area*. In: Marine Protected Areas. Elsevier, p. 631-647. 2020.

HEUVELINK, G. Error Propagation in Environmental Modelling with GIS. London, Taylor and Francis, 1998.

HUANG, C.; CHEN, Y.; WU, J. *Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 26, p. 350-362, 2014.

HUMBOLDT, A. *Aspects of nature, in different lands and different climates; with scientific elucidations*. Lea and Blanchard, 1849.

_____. *Cosmos: A Sketch or a Physical Description of the Universe*. Translated by EC Otté. New York: Harper & Brothers, 1856.

_____. *Cosmos: ensayo de una descripción física del mundo*. 1874.

- IBAMA. Plano de manejo do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses-MA. Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. São Luís, MA. 499p. 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Senso Demográfico Brasileiro 2010. 2020. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em: 12/04/2020.
- _____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha municipal do Estado do Maranhão. Resolução Nº 05 de 10 de outubro de 2002.
- IBRAHIM, M. Z.; HWANG, Y. K.; ISMAIL, M.; ALBANI, A. *Spatial analysis of wind potential for Malaysia*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), v. 5, n. 1, p. 201-209, 2015.
- IEEE. *The Top Programming Languages 2019*. 2020. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/computing/software/the-top-programming-languages-2019>. Acesso em: 17/05/2020.
- IMESC. Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos/Maranhão em Dados 2005 – São Luís: IMESC, 2007.
- JELINSKI, D. E.; GOODCHILD, M.; STEYAERT, L. *Multiple roles for GIS in global change research: towards a research agenda*. Environmental Information Management and Analysis: Ecosystem to Global Scales, p. 41-56, 1994.
- JENSEN, J.R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de José Carlos Neves Epiphanyo (coord.). São José dos Campos, SP: Parêntese, 598 p., 2009.
- JIMENEZ, J. A.; MAIA, L. P.; SERRA, J.; MORAIS, J. *Aeolian dune migration along the Ceara coast, north-eastern Brazil*. Sedimentology, v. 46, n. 4, p. 689-701, 1999.
- JOYCE, CHRIS B.; VINA-HERBON, CRISTINA; METCALFE, DANIEL J. *Biotic variation in coastal water bodies in Sussex, England: implications for saline lagoons*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 65, p. 633-644. 2005.
- KARASEVA, M.; PRAKASH, S; GAIROLA, R. *Validation of high-resolution TRMM-3B43 precipitation product using rain gauge measurements over Kyrgyzstan*. Theoretical and Applied Climatology, vol. 108, n. 1-2, p. 147-157. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0509-6>.
- KARLSEN S. R.; TOLVANEN A.; KUBIN E.; POIKOLAINEN. J.; HØGDA K. A.; JOHANSEN B.; DANKS F. S.; ASPHOLM P.; WIELGOLASKI F. E.; MAKAROVA O. MODIS-NDVI-based mapping of the length of the growing season in northern Fennoscandia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 10, n. 3, p. 253-266, 2008.
- KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. D.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. J. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Kayanoetal.pdf>. Acesso em: 12/05/2020.

_____ ; CAPISTRANO, V.B. *How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall*. International Journal of Climatology, v. n/a, p. n/a-n/a, 2013.

KHAN, S.A.; RASHMI; HUSSAIN, M.Z.; PRASAD, S. & BANERJEE, U.C. *Prospects of biodiesel production from microalgae in India*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Disponível em: doi:10.1016/j.rser.2009.04.005. Acesso em: 02/03/2020.

KJERFVE, B. *Comparative oceanography of coastal lagoons*. Estuarine variability. New York: Academic Press. p. 63-81. 1986.

KLEMES, V. *Conceptualization and scale in hydrology*. Journal of hydrology, v. 65, n. 1-3, p. 1-23, 1983.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. *World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. Meteorol. Z., 15, 259-263. 2006. Disponível em: DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. Acesso em: 12/04/2020.

KRAJEWSKI, W.F.; CIACH, G.J.; MCCOLLUM, J.R.; BACOTIU, C. *Initial validation of global precipitation climatology project monthly rainfall over United States*. Journal of Applied Meteorology 39, 1071–1086. 2000.

KUMMEROW, C; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ...; NAKAMURA, K. *The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit*. Journal of applied meteorology, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LACERDA, L. D.; DE ARAUJO, D. S. D.; MACIEL, N. C. *Dry coastal ecosystems of the tropical Brazilian coast*. Ecosystems of the World, p. 477-477, 1993.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. Fundamentos de Metodologia Científica. São Paulo, SP: Atlas 2003.

LANG, S.; BLASCHKE, T. Análise da paisagem com SIG. Tradução de Hermann Kux. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LATRUBESSE, E. M. *Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: A potential “who’s who” in the geological record*. Earth-Science Reviews, v. 146, p. 1-30, 2015.

LEENTVAAR, P. *Communities of dunes lakes*. In: Ecosystems of the world, 2C. Amsterdam: Elsevier, p. 297-322. 1997.

LEVIN, N.; TSOAR, H.; HERRMANN, H. J.; MAIA, L. P.; CLAUDINO-SALES, V. A. N. D. A. *Modelling the formation of residual dune ridges behind barchan dunes in North-east Brazil*. Sedimentology, v. 56, n. 6, p. 1623-1641, 2009.

LIMA, A. A. C; OLIVEIRA, F. N. S; AQUINO, A. R. L. Solos e aptidão agrícola das terras cultivadas com cajueiro no Estado do Maranhão. Embrapa Agroindústria Tropical, 1999.

LIMA, D. Estrutura das comunidades zooplanctônica e fitoplanctônica do Lago Recreio-Pantanal de Barão de Melgaço-MT. Tese de Doutorado. Centro de Ciências Biológicas da Universidade Federal de São Carlos. 1996.

LIU, H.; YIN, Y.; PIAO, S.; ZHAO, F.; ENGELS, M.; CIAIS, P. *Disappearing lakes in semiarid northern China: drivers and environmental impact*. Environmental science & technology, v. 47, n. 21, p. 12107-12114, 2013.

LONGO M.; CAMARGO R.; SILVA DIAS M. A.F. Análise das características dinâmicas e sinóticas de um evento de friagem durante a estação chuvosa no sudoeste da Amazônia. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 19, n. 1, p. 59-72, 2004.

LUNA, M. CM. M.; PARTELI, E. JR; HERRMANN, H. J. *Model for a dune field with an exposed water table*. Geomorphology, v. 159, p. 169-177, 2012.

MAHMUD, M. R. Space based observations: *A state of the art solution for spatial monitoring tropical forested watershed productivity at regional scale in developing countries*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. p. 012191. 2014.

_____; NUMATA, S.; MATSUYAMA, H.; HOSAKA, T.; HASHIM, M. *Assessment of Effective Seasonal Downscaling of TRMM Precipitation Data in Peninsular Malaysia*. Remote Sens, 7, 4092-4111. 2015.

MAIA FILHO, B. P. USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA AVALIAR O PLANEJAMENTO MUNICIPAL DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE. Revista Desenvolvimento Social, v. 24, n. 2, p. 79-91, 2018.

MAIA, L. P.; GASTÃO, F. G.; TATUMI, S. H.; LACERDA, L. D. A utilização do método de luminescência opticamente estimulada para a datação de sedimentos de dunas costeiras do nordeste setentrional do Brasil. Revista Virtual de Química, v. 3, n. 2, p. 103-115, 2011.

MARANHÃO. Atlas do Estado do Maranhão. Rio de Janeiro: IBGE, 1984.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. Estudos avançados, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARGALEF, R. Limnologia. Barcelona. Omega, v. 1, n. 010, 1983.

MARTINHO, C. T; GIANNINI, P. C. F; SAWAKUCHI, A. O. Fácies morfológicas e fácies deposicionais de campos de dunas transgressivos ativos da região de Jaguaruna-Imbituba, SC. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO. 2003.

MAPBIOMAS. *MapBiomas General "Handbook" - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. p. 42, 2019. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>. Acesso em: 03/07/2020.

MCCOLLUM, J. R.; KRAJEWSKI, W. F.; FERRARO, R. R.; BA, M. B. *Evaluation of biases of satellite rainfall estimation algorithms over the continental United States*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 41, n. 11, p. 1065-1080, 2002.

MCFEETERS, S. K. *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. International journal of remote sensing. 17(7), 1425-1432. 1996.

MCKEE, E. D. *A study of global sand seas*. US Government Printing Office, 1979.

- MEI, A.; MANZO, C.; FONTINOVO, G.; BASSANI, C.; ALLEGRINI, A.; PETRACCHINI, F. *Assessment of land cover changes in Lampedusa Island (Italy) using Landsat TM and OLI data*. Journal of African Earth Sciences, v. 122, p. 15-24, 2016.
- MESQUITA JUNIOR, H. N. Análise temporal com sensor orbital de unidades fisionômicas de cerrado na Gleba Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga - SP). 1998. 118f. Dissertação (Mestrado em Ecologia dos Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- MEES, A. Qualidade de água em reservatórios. Unidade II. Brasília: ANA, 2016.
- MILANI, E. J.; RANGEL, H. D.; BUENO, G. V.; STICA, J. M.; WINTER, W. R.; CAIXETA, J. M.; NETO, O. P. J. Bacias sedimentares brasileiras: cartas estratigráficas. Anexo ao Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 1, p. 183-205, 2007.
- MILEWSKI, A.; ELKADIRI, R.; DURHAM, M. Assessment and Comparison of TMPA Satellite Precipitation Products in Varying Climatic and Topographic Regimes in Morocco. Remote Sens, 7, 5697-5717. 2015.
- MIRANDA, J. P.; COSTA, J. C. L.; ROCHA, C. F. D. *Reptiles from Lençóis Maranhenses National Park, Maranhão, northeastern Brazil*. ZooKeys, n. 246, p. 51, 2012.
- MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa Nacional de Meio Ambiente. Macrodiagnóstico da zona costeira do Brasil na escala da união. Brasil: UFRJ, FUJB, LAGET, Brasília, p. 200. 1996.
- MMA. Macrodiagnóstico da Zona Costeira do Brasil na Escala da União Brasília: UFRJ/ FUJB / LAGET: Programa Nacional do Meio Ambiente. 280p. 1996.
- MORAES, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos, INPE, 2002.
- MOORE, A. Repensar a escala como uma categoria geográfica: da análise para a prática. GEOgraphia, v. 20, n. 42, p. 3-24, 2018.
- MOREIRA, J. C. Patrimônio geológico em unidades de conservação: atividades interpretativas, educativas e geoturísticas. 2008. 428 f. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4. ed. Viçosa: Ed. UFV. 2011.
- MOSCHINI-CARLOS, V.; PEREIRA, D.; WISNIEWSKI, M. J. S.; POMPÊO, M. L. M. *The planktonic community in tropical interdunal ponds (Lençóis Maranhenses National Park, Maranhão state, Brazil)*. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 20, n. 2, p. 99-110, 2008.
- _____; POMPÊO, M. L. M. Dinâmica do fitoplâncton de uma lagoa de duna (Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, MA, Brasil). Acta Limnologica Brasiliensia, v. 13, n. 2, p. 53-68, 2001.
- MUTANGA, O; KUMAR, L. *Google earth engine applications*. 2019. Acesso em: 10/03/2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11050591>.

NASA GES DISC. TRMM_3B43: TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7. Disponível em: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B43_7/summary. Acesso em: 20/06/2020.

NASCIMENTO, J. L. A. DO. Uso de geotecnologia no monitoramento de unidades de conservação: ocupações peri urbanas na Apa margem esquerda do Rio Negro, Manaus. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009

NOGUTI, I.; SANTOS J.F. Zoneamento preliminar por foraminíferos planctônicos do Aptiano ao Mioceno na plataforma continental do Brasil. Boletim Técnico da Petrobras. v. 15, n. 3, p. 265-283. 1972.

OLIVEIRA, P. F.; GUERRA, S; MCDONNELL, R. Ciência de Dados com R – Introdução. Brasília: Editora IBPAD, 2018.

OLIVEIRA, R. R. Fluxos de CO₂ na interface oceano-atmosfera no Oceano Atlântico Sul subtropical. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

PAIN, R.; BARKE, M.; FULLER, D.; GOUGH, J.; MACFARLANE, R.; MOWL, G. *Introducing social geographies*. Routledge, 2014.

PALMA, J. J. C. Geomorfologia da plataforma continental norte brasileira, In: *Projeto REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. PETROBRÁS/CENPES/DINTEP, Série Projeto REMAC, 7, Rio de Janeiro, p. 25-51. 1979.

PAMPLONA, H. R. P. Litoestratigrafia da Bacia Cretácea de Barreirinhas. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 12, n. 3, p. 261-290, jul/set. 1969.

PAMPLONA, H. R. P; PORTO, R; LIMA, E.C. Evolução Geológica do Grupo Canárias, Bacia de Barreirinhas. In: XXVI Congresso Brasileiro de Geologia, S.B.G: Sociedade Brasileira de Geologia, Belém, Pará, v. 3, p. 93-106, out. 1972.

PARANHOS FILHO, A. C. Análise geo-ambiental multitemporal: o estudo de caso da região de Coxim e da bacia do Taquarizinho (MS - Brasil). 2000.213f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

PARTELI, E. J. R.; SCHWAEMMLE, V.; MONTEIRO, L.H.U.; MAIA, L. P. *Profile measurement and simulation of a transverse dune field in the Lençóis Maranhenses*. *Geomorphology*, v. 81, n. 1–2, p. 29–42, 2006.

PATEL, N. N.; ANGIULI, E.; GAMBA, P.; GAUGHAN, A.; LISINI, G.; STEVENS, F. R.; TATEM A. J.; TRIANNI, G. *Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 35, p. 199-208, 2015.

PEKEL, J. F.; COTTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, v. 540, n. 7633, p. 418-422, 2016.

PEREIRA, D. F. Caracterização física e química das lagoas dos Lençóis Maranhenses, Brasil. Monografia de graduação-UFMA, 1999.

- PEREIRA, E. D. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do solo e aquífero do reservatório batatã-São Luís (MA). 2006.
- PEREIRA, L. E.; AMORIM, G.; GRIGIO, A. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. Anuário do Instituto de Geociências, v. 41, n. 2, p. 654-662, 2019.
- PIMENTEL, N. A Paisagem. Revista de Ciência Elementar, v. 7, n. 2, 2019.
- PINAGÉ, E. R.; GENOVEZ, P. C.; OSAKO, L. S.; DOS SANTOS, A. H. H.; RIBEIRO, R. C.; NEVES, R. V.; BRASILEIRO-SFB, S. F. Análise multi-temporal do antropismo na Floresta Nacional do Crepori (PA) a partir da imagem Lansat 5 TM. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.6341. 2011.
- PNRH. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Caderno da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos Brasília: MMA, 128p. 2006.
- POMPÊO, M. L. M; MOSCHINI-CARLOS, V. Características gerais da região do Parque Nacional dos Lenções Maranhenses, Maranhão, Brasil. USP-IB, Departamento de Ecologia, 2009. Disponível em:
<http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=71&Itemid=410>. Acesso em: 02/02/2020.
- _____. Qualidade da água em região alterada pela mineração de carvão na microbacia do rio Fiorita (Siderópolis, Estado de Santa Catarina, Brasil. Acta Scientiarum. Biological Sciences, v. 26, n. 2, p. 125-136, 2004.
- POPOV, S. *Large-scale data visualization with missing values*. Technological and Economic Development of Economy, v. 12, n. 1, p. 44-49, 2006. Projeto MapBiomas – Coleção v.4.1 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. 2006. acessado em 14/06/2020 através do link:
<https://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>.
- RAWAT, J. S.; KUMAR, M. *Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India*. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, v. 18, n. 1, p. 77-84, 2015.
- RAYMOND, F.; ULLMANN, A.; CAMBERLIN, P.; DROBINSKI, P.; SMITH, C. C. *Extreme dry spell detection and climatology over the Mediterranean Basin during the wet season*. Geophysical Research Letters, v. 43, n. 13, p. 7196-7204, 2016.
- RÊGO, M.; ALBUQUERQUE, P. Redescoberta de Melipona subnitida Ducke (Hymenoptera: Apidae) nas Restingas do Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, Barreirinhas, MA. Neotropical entomology, v. 35, n. 3, p. 416-417, 2006.
- RIBEIRO, E. M.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; SANTOS, B. A.; TABARELLI, M.; LEAL, I. R. *Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation*. Journal of Applied Ecology, v. 52, n. 3, p. 611-620, 2015.

- _____. *Phylogenetic impoverishment of plant communities following chronic human disturbances in the Brazilian Caatinga*. Ecology, v. 97, n. 6, p. 1583-1592, 2016.
- RICHARDS J. A. *Remote Sensing Digital Image Analyses: an introduction*. 2. nd. Berlin: Springer-Verlag 340p. 1993.
- RITTER, K. *Comparative geography*. Tradução William L. Gage. Filadélfia: J. B. Lippincott & CO, 1865.
- ROCHA, C. H. B. *Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar*. Juiz de Fora, MG: Ed. do Autor. 220p. 2000.
- RODRIGUES, T. L. N.; FAVILA, C. A. C.; CANIZZATO, E.; VERÍSSIMO, L. S. Programa de levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. Folha SB-23-XA (BACABAL). CPRM, 1994.
- RODRIGUES, M. L.; MOTA, N. F. D. O.; VIANA, P. L.; KOCH, A. K.; SECCO, R. D. S. *Vascular flora of Lençóis Maranhenses National Park, Maranhão State, Brazil: checklist, floristic affinities and phytophysognomies of restingas in the municipality of Barreirinhas*. Acta Botanica Brasilica, v. 33, n. 3, p. 498-516, 2019.
- ROSSER, N. J. *The geomorphology of coarse clastic surfaces in arid environments*. Tese de Doutorado. Durham University. 2002. Disponível em: <http://etheses.dur.ac.uk/3745>. Acesso em: 03/02/2020.
- RYTKÖNEN, M. J. P. *Not all maps are equal: GIS and spatial analysis in epidemiology*. International journal of circumpolar health, v. 63, n. 1, p. 9-24, 2004.
- SANCHEZ-MORENO, J. F.; MANNAERTS, C. M.; JETTEN, V. *Applicability of satellite rainfall estimates for erosion studies in small offshore areas: A case study in Cape Verde Islands*. Catena, v. 121, p. 365-374, 2014.
- SANTOS, A. L. S. Monitoramento da morfologia costeira em setores da bacia potiguar sob influência da indústria petrolífera utilizando geodésia de alta precisão e laser escâner terrestre. 163 f. 2014. Tese (doutorado) UFRN. Programa de Pós-graduação em Ciências e engenharia e petróleo. Natal-RN. 2014.
- SANTOS, J. H. S. Lençóis Maranhenses atuais e pretéritos: um tratamento espacial. 2008. Tese de Doutorado. (Tese de Doutorado) - Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.
- SANTOS, M. Por uma geografia nova: da crítica da geografia a uma geografia crítica. 1996.
- SCHIER, R. A. Trajetórias do conceito de paisagem na geografia. Raega-O Espaço Geográfico em Análise, v. 7, 2003.
- SEIBOLD, E.; BERGER, W. *The sea floor: an introduction to marine geology*. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-51412-3_6.
- SILVA, C. H. S; LIMA, I. M. M. F. Falésia da Baronesa, Alcântara-Maranhão: formação e evolução recente. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento, v. 1, p. 2758-2769, 2017.

SILVA, M. L. A dinâmica de expansão e retração de cerrados e caatingas no período quaternário: uma análise segundo a perspectiva da teoria dos refúgios e redutos florestais. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Recife: UFPE. p. 057-073. 2011.

SILVA, O.; REGO, M.; ALBUQUERQUE, P.; RAMOS, M. C. Abelhas Euglossina (Hymenoptera: Apidae) em área de restinga do nordeste do Maranhão. *Neotropical Entomology*, v. 38, n. 2, p. 186-196, 2009.

SILVA, S. M.; BRITZ, R. M. A vegetação da planície costeira. *História Natural e Conservação da Ilha do Mel*. Curitiba: Ed. UFPR, p. 49-84, 2005.

SMITH, T.R.; PEUQUET, D.J.; MENON, S.; AGARWAL, P. *KBGIS-II: a knowledge-based geographic information system*. *International Journal of Geographic Information Systems*, v. 1, n. 2, p. 149-172, 1987.

SOARES JUNIOR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da margem atlântica equatorial do Brasil: três fases distensivas. *Geociências (São Paulo)*, v. 27, p. 427-437, 2008.

_____. *Paleografia e evolução da paisagem do nordeste do Estado do Pará e noroeste do Maranhão: Cretáceo ao Holoceno*. 2002. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

SOARES, R. K. P. Distribuição Espacial e Temporal da Avifauna Aquática no Lago de Santo Amaro, Parque Nacional dos Lençóis Maranhenses, Maranhão, Brasil. 2008. 37 f. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação). São Luís-MA. Universidade Federal do Maranhão. 2008.

SOUSA, K. R. Economia Extrativa da Fibra de Buriti (*Mauritia Flexuosa*) para o Desenvolvimento Sustentável da Microrregião dos Lençóis Maranhenses, MA Na Atualidade. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Socioeconômico) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.

SOWA, J. F. *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*. Pacific Grove, CA, Brooks Cole, 2000.

SUGUÍO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C.; DOMINGUEZ, J. M.; FLEXOR, J. M.; DE AZEVEDO, A. E. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, n. 4, p. 273-286, 2018.

TREBOSSON, H.; DEFFONTAINES, B.; CLASSEAU, N.; KOUAME, J.; RUDANT, J. P. Monitoring coastal evolution and associated littoral hazards of French Guiana shoreline with radar images. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 337, n. 13, p. 1140-1153, 2005.

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

TRICART, J.; KILLIAN, J. *Lécorographie e t' aménagement du milieu naturel*. Paris, François Maspero. 326p. 1979.

TROLL, C. *Der Nanga Parbat als Ziel deutscher Forschung*. Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, 1938.

UEMA. Centro de Ciências Agrárias. Núcleo Geoambiental. Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão / Universidade Estadual do Maranhão. - São Luís 165 p.

2016. Disponível em:

<<https://www.nugeo.uema.br/upnugeo/publicacoes/Bacias%20Hidrogr%C3%A1ficas%20e%20Climatologia%20-%20MA>>. Acesso em: 12/04/2020.

UVO, C.B. A zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região norte do nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado. INPE. São José dos Campos. p. 99, 1989.

VOLPATO, M. M. L.; VIEIRA, T. G. C.; ALVES, H. M. R.; SANTOS, W. J. R. D. Imagens do sensor modis para monitoramento agrometeorológico de áreas cafeeiras. *Coffee Science* - v.08, n.2, 2013. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/7964>.

VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. B. *Global water resources: vulnerability from climate change and population growth*. *science*, v. 289, n. 5477, p. 284-288, 2000.

WICKHAM, H. *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. springer, 2016.

_____ ; GROLEMUND, G. R for data science: import, tidy, transform, visualize, and model data. “O’Reilly Media, Inc.”, 2016.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). *The future of jobs: Employment, skills and workforce strategy for the fourth industrial revolution*. Global Challenge Insight Report, 2016.

YAMAZAKI, D; TRIGG, M. A.; IKESHIMA, Da. *Development of a global~ 90 m water body map using multi-temporal Landsat images*. *Remote Sensing of Environment*, v. 171, p. 337-351, 2015.

YOUSEFI, M.; KREUZER, O. P.; NYKÄNEN, V.; HRONSKY, J. M. *Exploration information systems-a proposal for the future use of GIS in mineral exploration targeting*. *Ore Geology Reviews*, p. 103005, 2019.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, v. 185, p. 46-56, 2016.

VERPOORTER, C.; KUTSER, T.; SEEKELL, D. A.; TRANVIK, L. J. *A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery*. *Geophysical Research Letters*, v. 41, n. 18, p. 6396-6402, 2014.

VITTE, A. C. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na geografia física. *Mercator-Revista de Geografia da UFC*, v. 6, n. 11, p. 71-78, 2007.

XU, H. *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. *International journal of remote sensing*, 27(14). p 3025-3033. 2006.

ZALÁN, P V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 595-613, 2004.

ZHANG, B; SCHWARTZ, F. W.; LIU, G. Systematics in the size structure of prairie pothole lakes through drought and deluge. *Water Resources Research*, v. 45, n. 4, 2009.

ZHAO, H.; YANG, B.; YANG, S.; HUANG, Y.; DONG, G.; BAI, J.; WANG, Z. Systematical estimation of GPM-based global satellite mapping of precipitation products over China. *Atmospheric Research*, v. 201, p. 206-217, 2018.

ZHAO, J.; ZHANG, M.; XIAO, W.; WANG, W.; ZHANG, Z.; YU, Z.; XIAO, Q; CAO, Z.; XU, J.; ZHANG, X.; LIU, S.; LEE, X. An evaluation of the flux-gradient and the eddy covariance method to measure CH₄, CO₂, and H₂O fluxes from small ponds. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 275, p. 255-264, 2019.

ZONNEVELD, I. S. The Land Unit: A Fundamental Concept in Landscape Ecology, and Its Applications. *Landscape Ecology* v.3, p.67-86, 1989.