



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA**

Bruno Martiniano Silva Coêlho

**MODELAGEM DA RESPOSTA DO ECOSISTEMA MANGUEZAL AO AVANÇO
DA ÁREA CONSTRUÍDA NO MEIO URBANO NA CIDADE DE SÃO LUÍS,
MARANHÃO**

**SÃO LUÍS-MA
2024**

Bruno Martiniano Silva Coêlho

**MODELAGEM DA RESPOSTA DO ECOSSISTEMA MANGUEZAL AO AVANÇO
DA ÁREA CONSTRUÍDA NO MEIO URBANO NA CIDADE DE SÃO LUÍS,
MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra

SÃO LUÍS-MA

2024

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

Martiniano, Bruno.

Modelagem da Resposta do Ecossistema Manguezal Ao
Avanço da Área Construída No Meio Urbano Na Cidade de São
Luís, Maranhão / Bruno Martiniano. - 2024.

23 f.

Orientador(a): Denilson Bezerra.

Curso de Oceanografia, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2024.

1. Ecossistema. 2. Manguezal. 3. São Luís. 4.
Aterramento. 5. Modelo Estatístico. I. Bezerra,
Denilson. II. Título.

Bruno Martiniano Silva Coêlho

**MODELAGEM DA RESPOSTA DO ECOSISTEMA MANGUEZAL AO AVANÇO
DA ÁREA CONSTRUÍDA NO MEIO URBANO NA CIDADE DE SÃO LUÍS,
MARANHÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Denilson da Silva Bezerra

Aprovado em 12 de Setembro de 2024.

Banca Examinadora

Prof. Dra. Flavia Rebelo Mochel

Prof. Dra. Naila Arraes de Araujo

RESUMO

Os manguezais têm uma importância crucial e diversificada, sendo fundamentais tanto para o meio ambiente quanto para as comunidades humanas que deles dependem. Os manguezais em São Luís são ecossistemas costeiros vitais ao longo da Baía de São Marcos e áreas circundantes, caracterizados por vegetação adaptada a condições de salinidade variável e inundação periódica. Além de servirem como berçários naturais para espécies marinhas e barreiras naturais contra tempestades e erosão costeira, os manguezais sustentam economicamente comunidades locais através da pesca e coleta de mariscos. Culturalmente significativos, esses ecossistemas enfrentam ameaças crescentes devido à urbanização, como desmatamento, supressão e aterramento dos mangues e apicuns, o que tem se tornado cada vez mais frequentes e intensos. O presente estudo tem como objetivo entender e avaliar a evolução do processo de aterramento de manguezais em São Luís, localizada na Ilha do Maranhão. Foram utilizados dados da coleção 5 do MapBiomias de 1985 a 2022 e estes dados foram organizados, tabulados e submetidos ao método estatístico de suavização exponencial projetando a previsão para 20 anos no futuro, com a finalidade de identificar tendências de aumento ou decréscimo de área de manguezais e área urbanizada em projeções futuras. De 1988 a 1998, a área de mangue apresentou um expressivo aumento de sua área, seguido de uma tendência de queda para os anos entre 1998 a 2022. Analisando os valores presentes na série temporal “ano a ano”, é possível constatar um evento de aumento significativo na área de ocorrência dos manguezais entre os anos de 1988 e 1989, posteriormente um declínio abrupto entre os anos de 1990 e 1991, seguido por ciclos de ganho e de perda. Os dados apresentaram um crescimento contínuo da ocorrência de área urbanizada durante toda série temporal. Estatisticamente foram verificadas previsões para perda da área total de apicuns, acréscimo para as áreas de manguezais e área urbanizada, e um padrão de oscilação para o saldo futuro de “ano a ano” para área de manguezais. Os resultados obtidos no estudo realizado apontaram que o desenvolvimento urbano está diretamente relacionado com o declínio da área total de manguezal, reforçando que o contínuo crescimento urbano mantenha a tendência de baixa das áreas de manguezal para os próximos 20 anos.

Palavras-chave: Ecossistema, Manguezal, São Luís, Aterramento, Modelo Estatístico.

ABSTRACT

Mangroves play a crucial and diverse role, being essential for both the environment and the human communities that depend on them. Mangroves in São Luís are vital coastal ecosystems along the São Marcos Bay and surrounding areas, characterized by vegetation adapted to variable salinity and periodic flooding conditions. In addition to serving as natural nurseries for marine species and natural barriers against storms and coastal erosion, mangroves economically sustain local communities through fishing and shellfish harvesting. Culturally significant, these ecosystems face increasing threats from urbanization, such as mangrove deforestation, suppression, and land reclamation, which have become more frequent and intense. This study aims to understand and evaluate the evolution of mangrove land reclamation processes in São Luís, located on Maranhão Island. Data from MapBiomas collection 5 from 1985 to 2022 were used, organized, tabulated, and subjected to the exponential smoothing statistical method to project forecasts for the next 20 years, aiming to identify trends in mangrove area increase or decrease and urbanized area in future projections. From 1988 to 1998, the mangrove area showed a significant increase, followed by a declining trend from 1998 to 2022. Analyzing the values in the year-to-year time series, a significant increase in mangrove occurrence area was observed between 1988 and 1989, followed by a sharp decline between 1990 and 1991, with subsequent cycles of gain and loss. The data showed continuous growth in urbanized area occurrence throughout the time series. Statistically, predictions were verified for total loss of mangrove area, increase in mangrove and urbanized areas, and an oscillation pattern for future year-to-year balance of mangrove area. The results of the study indicated that urban development is directly related to the decline in total mangrove area, reinforcing that continued urban growth will likely lead to further reductions in mangrove areas over the next 20 years.

Keywords: Ecosystem, Mangrove, São Luís, Land Reclamation, Statistical Model.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	OBJETIVO	8
2.1	Geral	8
2.2	Específicos	9
3	JUSTIFICATIVA	9
4	METODOLOGIA	10
4.1	Área de estudo	10
4.2	Modelo conceitual	11
4.3	Dados	12
4.4	Análise das áreas	14
4.5	Método estatístico de Previsão por Séries Temporais: Suavização Exponencial	14
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
6	CONCLUSÃO	20
	REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas de transição entre os ambientes terrestre e marinho que se desenvolvem nas regiões tropicais e subtropicais do mundo entre as latitudes 30°N e 30°S (Giri et al., 2010). Este tipo de vegetação desenvolve-se na zona entre marés dos estuários, de solo instável, salino e lamacento, rico em matéria orgânica e sujeito à inundação periódica, ao qual se associam outros componentes da fauna e flora (Fernandes, 2012).

As florestas de mangues formam um ecossistema costeiro intertropical amplamente reconhecido por seu crucial papel ecológico e alta capacidade de produção (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995). Estes ecossistemas apresentam uma divisão em três zonas distintas: a zona de lavado, localizada na parte frontal próxima aos cursos de água; o bosque de mangue, que compreende a cobertura vegetal dominada por espécies lenhosas características; e o apicum, uma área salgada ou planície hipersalina, que, embora não esteja sempre presente, está associada à presença do manguezal. (BRASIL, 2012).

Dessa maneira, os manguezais desempenham uma função vital em toda a região costeira, principalmente devido à sua habilidade em gerar bens e serviços (BEZERRA, 2005). Isso é possível graças às suas propriedades funcionais e estruturais, as quais são influenciadas por um conjunto complexo de condições locais, incluindo temperatura do ar e da água, altura da maré, disponibilidade de água, nutrientes e luz (FERNANDES, 2005).

Este ambiente representa aproximadamente 8% da extensão total das costas globais e abrange 25% da zona tropical, totalizando 181.077 km² (SPALDING, BLASCO & FIELD, 1997). A nível mundial, o Brasil se destaca como o segundo país com maior extensão desse ecossistema, cobrindo 13.400 km², ficando atrás apenas da Indonésia, que possui 42.550 km².

De acordo com KJERFVE et al. (2002), Maranhão, Pará e Amapá juntos detêm a maior área contínua de manguezais do mundo, com cerca de 8.900 km², sendo que o Maranhão sozinho representa aproximadamente 50% dessa extensão. Isso implica que a zona costeira maranhense é uma reserva significativa de valor ecológico, social, econômico e cultural de importância global.

Os manguezais enfrentam diversas formas de pressão antrópica ao longo do litoral brasileiro, incluindo a supressão da vegetação característica, processos de aterro para desenvolvimento urbano, poluição e contaminação por resíduos sólidos e líquidos, entre outros impactos.

A cidade de São Luís tem experimentado um notável aumento da antropização, evidenciado pelo crescente impacto humano sobre o ambiente urbano. O avanço desordenado da urbanização, expansão de áreas residenciais e comerciais, assim como a intensificação do tráfego veicular, têm contribuído para a transformação do cenário urbano. A expansão desenfreada da infraestrutura muitas vezes resulta em perda de áreas verdes, comprometendo ecossistemas locais, gerando desafios ambientais significativos.

Assim, o crescimento populacional desorganizado, aliado a fatores como exclusão socioeconômica e demanda intensa por propriedades, são influências que promovem a ocupação irregular dessas regiões. É importante destacar a ausência de uma política no Brasil para monitorar a perda dessas áreas, contrastando com a abordagem aplicada, por exemplo, na Amazônia. As pesquisas brasileiras sobre a perda de áreas de manguezais são esporádicas, carecendo de um acompanhamento sistemático e de estudos voltados para a antecipação dos impactos nesse ecossistema.

Portanto, estudos como este que são pioneiros em identificar regiões de manguezais propensas à expansão não planejada da urbanização em termos de uso presente e futuro são de extrema importância, destacando as principais atividades humanas que favorecem o processo de aterramento na área em análise. Utilizando técnicas de geoprocessamento e modelagem computacional, serão conduzidas simulações para desenvolver um modelo computacional a fim de compreender e mensurar a dinâmica do processo de aterro de manguezais na cidade de São Luís, na Ilha do Maranhão.

2 OBJETIVO

2.1 Geral

Entender e avaliar a evolução do processo de aterramento de manguezais em São Luís, localizada na Ilha do Maranhão.

2.2 Específicos

- Identificar como o crescimento urbano influencia no aterramento de manguezais na área objeto de estudo;
- Verificar a dinâmica da área de ocorrência de manguezais e malha urbana através de séries anuais de uso e cobertura do solo;
- Utilização de um modelo computacional utilizando método para prever a variação das áreas de manguezais e áreas urbanas.

3 JUSTIFICATIVA

A utilização de modelos computacionais desempenha um papel fundamental na gestão e preservação de áreas de manguezais, proporcionando benefícios significativos em diversos aspectos. Esses modelos permitem prever cenários futuros, considerando diferentes níveis de atividades humanas, o que facilita a antecipação e a tomada de decisões para uma gestão sustentável dessas áreas.

Além disso, a simulação computacional é crucial para avaliar os riscos ambientais associados ao avanço das atividades humanas nos manguezais, identificando potenciais danos e possibilitando a implementação de medidas preventivas eficazes. Esses modelos também são valiosos para analisar as mudanças ambientais resultantes de fatores como aterros, urbanização e poluição, contribuindo para uma compreensão aprofundada dos impactos a longo prazo e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação.

A otimização de intervenções é outra vantagem proporcionada pelos modelos computacionais, permitindo a simulação de diferentes abordagens para conservação e recuperação dos manguezais. Isso facilita a escolha de métodos mais eficazes e econômicos, promovendo uma abordagem mais eficiente na preservação desses ecossistemas.

Os modelos computacionais fornecem ainda dados cientificamente embasados, fundamentais para o desenvolvimento de políticas de conservação eficientes e baseadas em evidências. Essas políticas visam a preservação dos ecossistemas de mangue, contribuindo para a sustentabilidade a longo prazo.

Por fim, ao considerar as dinâmicas complexas dos manguezais, envolvendo variáveis interconectadas como mudanças climáticas, padrões de marés e intervenções humanas, os modelos computacionais desempenham um papel crucial na compreensão desses ecossistemas, fornecendo insights valiosos para a gestão e conservação dessas áreas.

4 METODOLOGIA

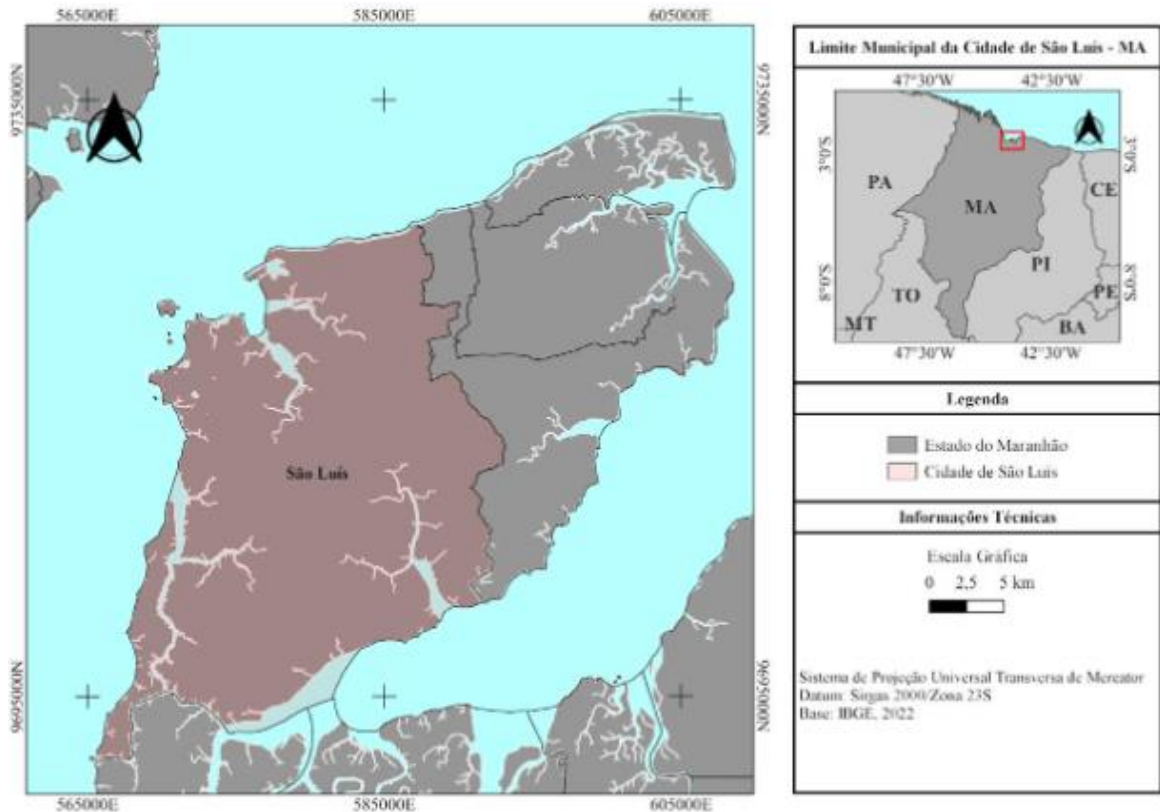
4.1 Área de estudo

Localizada no nordeste do Brasil, São Luís é a capital do estado do Maranhão. Estrategicamente situada na Ilha de Upaon-Açu, cercada pelas águas da Baía de São Marcos, a cidade aproveita sua posição geográfica privilegiada. A localização na Ilha do Maranhão, combinada com os contornos costeiros e a vasta Plataforma Continental do Pará/Maranhão, cria um ambiente marítimo de alta energia. Esse ambiente é predominantemente influenciado por macromarés semidiurnas, com variações de amplitude entre 4 e 6 metros (DHN, 1995).

Segundo a classificação climática de Köppen, a área de estudo possui um clima do tipo AW, tropical com um período de inverno seco. Isso implica uma estação chuvosa durante o verão e um inverno seco (GOLFARI, CASER; MOURA, 1978). A precipitação média anual atinge aproximadamente 1.900 mm, com o período chuvoso ocorrendo de janeiro a junho. As temperaturas médias oscilam entre 26°C e 27°C. O regime hidrológico é notavelmente influenciado pelo ciclo de marés ao longo de cerca de dois terços do curso, uma característica comum nos rios da Ilha do Maranhão (ALMEIDA, 1995).

Conforme mencionado por Silva et al. (2003), os requisitos para que um ecossistema de manguezal se desenvolva incluem uma temperatura média superior a 20 °C, uma temperatura mínima média não inferior a 15 °C, uma variação anual de temperatura menor que 5 °C, uma precipitação pluviométrica superior a 1.500 mm por ano, e a ausência de períodos prolongados de seca. Esses fatores evidenciam o potencial oceanográfico e hidrológico propício para o desenvolvimento de áreas de manguezal em São Luís.

Figura 1 - Limites de terras da cidade de São Luís



Fonte: autoria própria.

4.2 Modelo conceitual

Figura 2 - Modelo conceitual para representar a dinâmica de ocupação das áreas de manguezal, dentro da área de estudo.



Fonte: autoria própria.

O modelo conceitual está dividido em duas perspectivas distintas. Uma delas aborda as pressões socioambientais que incentivam a prática de aterros, enquanto a outra foca nos principais fatores que promovem esse processo.

A distinção entre esses aspectos está na amplitude de sua influência: as pressões socioambientais são associadas a particularidades específicas de grupos sociais, muitas vezes resultando em ações localizadas motivadas pela falta de recursos (como exclusão socioeconômica). Em contrapartida, os fatores determinantes estão diretamente ligados a questões que impactam a comunidade como um todo, como especulação imobiliária e expansão da infraestrutura viária.

4.3 Dados

Os dados sobre a presença de áreas de manguezais, apicuns e malha urbana utilizados no presente estudo, foram obtidos a partir das séries anuais de uso e cobertura da terra disponibilizadas pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas), acessíveis através do link <http://mapbiomas.org>. Esses produtos têm uma resolução espacial de 30 metros e abrangem o período de 1985 a 2022. Para os manguezais, especificamente, essa série representa a mais abrangente e completa temporalmente disponível para todo o litoral brasileiro.

Os dados obtidos pelo MapBiomas foram organizados com as áreas dos ecossistemas mangue, apicum, a soma dos dois ecossistemas recebendo o nome manguezal e a Área Urbanizada.

A Tabela 1 contém os valores das áreas em hectares de mangue, apicum, manguezal e área urbanizada, dos anos de 1985 a 2022. Neste estudo, o termo manguezal será utilizado para englobar a extensão total das florestas de mangue e das planícies de apicuns encontradas na cidade de São Luís, conforme as definições estabelecidas pelo novo código florestal.

Tabela 1. Área de mangue, apicum, manguezal e Área Urbanizada de 1985 a 2022 em hectares.

Ano	Mangue	Apicum	Manguezal	Área Urbanizada
1985	8.083	149	8.232	5.551
1986	8.058	155	8.213	6.491
1987	7.976	154	8.130	6.862
1988	7.920	160	8.080	7.351
1989	8.008	158	8.166	7.635
1990	8.238	158	8.396	8.050
1991	8.345	158	8.503	8.294
1992	8.351	160	8.511	8.632
1993	8.355	159	8.514	8.840
1994	8.381	160	8.541	8.952
1995	8.437	165	8.602	9.196
1996	8.504	173	8.677	9.850
1997	8.546	170	8.716	10.366
1998	8.540	165	8.705	10.730
1999	8.470	168	8.638	10.989
2000	8.432	174	8.606	11.388
2001	8.396	177	8.573	11.489
2002	8.349	172	8.521	11.686
2003	8.374	171	8.545	11.887
2004	8.391	169	8.560	12.021
2005	8.396	175	8.571	12.231
2006	8.413	171	8.584	12.370
2007	8.459	164	8.623	12.668
2008	8.469	152	8.621	12.925
2009	8.493	151	8.644	13.194
2010	8.440	149	8.589	13.537
2011	8.423	143	8.566	13.857
2012	8.421	136	8.557	14.171
2013	8.421	133	8.554	14.361
2014	8.426	132	8.558	14.641
2015	8.482	132	8.614	14.757
2016	8.508	130	8.638	14.942
2017	8.504	128	8.632	15.131
2018	8.504	125	8.629	15.324
2019	8.531	122	8.653	15.458
2020	8.539	122	8.661	15.558
2021	8.571	123	8.694	15.470
2022	8.616	108	8.724	15.645

Fonte: Coleção 5 do MapBiomias.

4.4 Análise das áreas

As áreas de mangue e apicum foram analisadas anualmente, e um gráfico foi criado para identificar e visualizar os valores de 1985 a 2022. Para a área de manguezal, que seria a soma da área de ocorrência do mangue e do apicum, foi feito a análise do saldo, subtraindo os valores de um ano pelos do ano anterior, a fim de identificar a tendência na variação das áreas ao longo do tempo

4.5 Método estatístico de Previsão por Séries Temporais: Suavização Exponencial

O modelo de previsão proposto utiliza a técnica estatística conhecida como suavização exponencial, uma abordagem essencial para previsão em séries temporais. Essa técnica visa suavizar flutuações aleatórias nos dados e identificar padrões ou tendências subjacentes.

Para isso, atribui pesos que diminuem exponencialmente aos valores passados da série temporal, dando maior ênfase aos dados recentes e menor aos mais antigos. Essa metodologia proporciona uma forma eficaz de capturar tendências e padrões fundamentais com base em observações históricas ponderadas de maneira exponencial.

Esse método estatístico foi aplicado para uma previsão futura de 20 anos, partindo do último ano que possui valor fornecido pelo MapBiomias, projetando valores de 2023 a 2042. O Software escolhido para executar a projeção foi o Power BI, uma plataforma da Microsoft focada em análise de dados que facilita aos usuários a visualização e compartilhamento de descobertas de forma intuitiva e dinâmica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

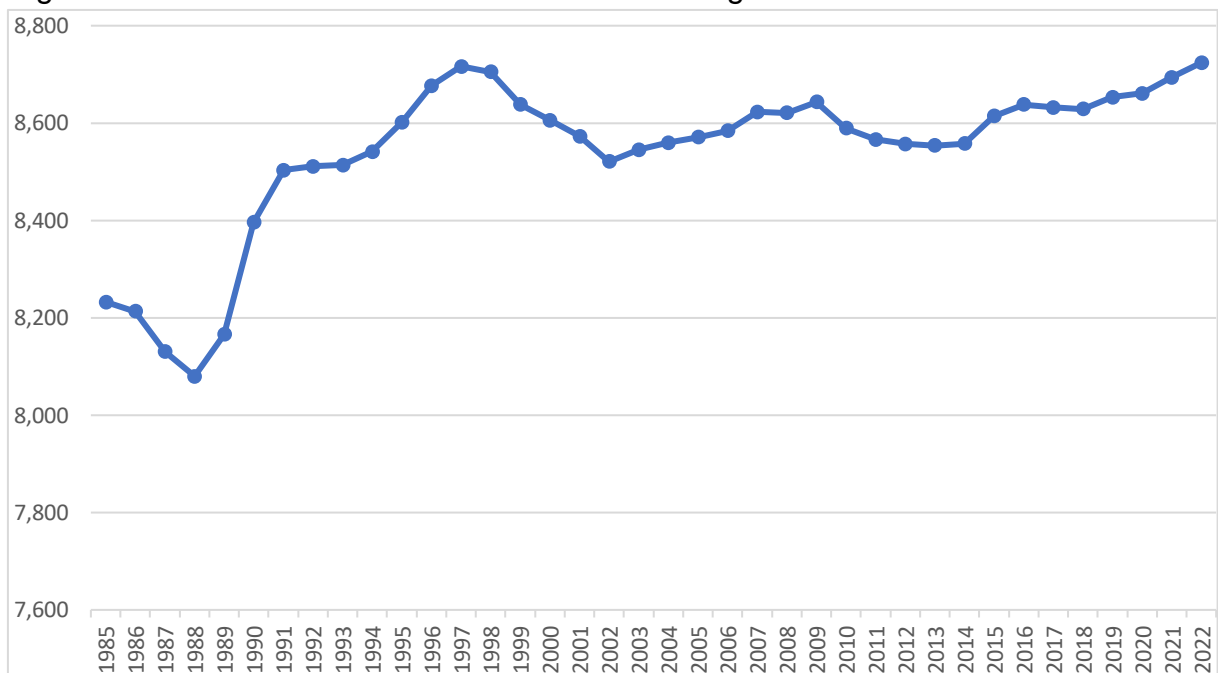
A figura 3 demonstra que para o intervalo temporal adotado no estudo, de 1985 a 2022, houve um acréscimo da sua área total de ocorrência do manguezal em 492 hectares. Entre os anos de 1988 a 1998 foi o período que apresentou o maior crescimento da área de manguezal, saindo do seu valor mínimo histórico de 8.080 hectares para 8.705 hectares. Seguido por uma estagnação no crescimento, oscilando entre períodos de perda e acréscimos de área.

Segundo MEDEIROS, T. C. C. (2005), a perda de área de manguezal entre os anos de 1985 e 1988 se deve a implantação de grandes projetos empresariais entre

as décadas de 70 e 80, como o Projeto Ferro Carajás, Projeto Vale do Rio Doce (atual Vale) e Projeto ALUMAR (Alumínio Maranhão S.A), na ilha de São Luís, provocando a retirada da população dos “povoados” localizados ao Sul da Ilha para dar lugar as instalações desses projetos. Por esse motivo, muitas famílias de baixa renda tiveram que recorrer a ocupações irregulares próximo as margens dos rios, como palafitas ou aterrando ilegalmente o mangue para construção de moradias, corroborando com o resultado encontrado no estudo realizado.

Desde 1988, observa-se um crescimento na área de manguezal, o qual está associado a uma significativa redução na destruição desses ecossistemas pela população. Esse fenômeno pode ser atribuído à conclusão da fase crítica dos grandes projetos industriais na cidade de São Luís, bem como à aplicação efetiva da legislação vigente pelos órgãos competentes.

Figura 3 - Área de ocorrência do ecossistema manguezal em hectares.



Fonte: autoria própria.

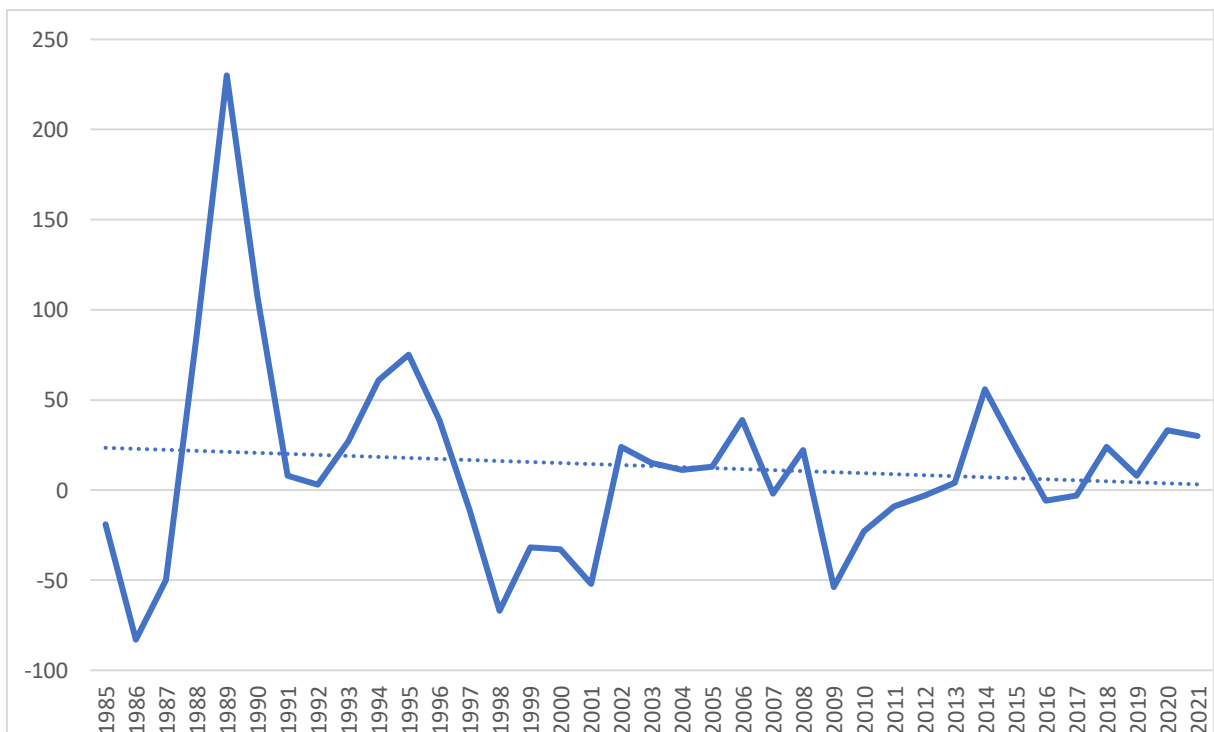
O período de aumento das áreas de mangue entre os anos de 1988 e 1998, evidencia que os manguezais possuem uma notável capacidade natural de se reflorestarem, o que é essencial para sua resiliência e sustentabilidade. Esta capacidade é sustentada por várias características adaptativas únicas desses ecossistemas costeiros. Primeiramente, as árvores de mangue, como o *Rhizophora* e o *Avicennia*, têm propriedades que facilitam a propagação vegetativa a partir de

propágulos (sementes germinadas), rizomas (raízes subterrâneas) e estacas (partes de plantas).

Deve-se destacar também a capacidade oceanográfica favorável de São Luís para o crescimento de manguezais devido a uma combinação de condições ambientais e topográfica adequadas. Manguezais prosperam em áreas costeiras onde há uma interação dinâmica entre água doce e salgada, conhecida como zona de estuário. Este ambiente oferece aos manguezais nutrientes essenciais, proteção contra ondas e correntes fortes, e sedimentos ricos em nutrientes que sustentam o crescimento das plantas

Porém, analisando o saldo dos valores na série temporal “ano a ano” na figura 4, podemos constatar que houve um pico de aumento da área nos anos de 1989 e 1990, com uma atual tendência de redução de área, a partir do ano de 2014 até 2022, demonstra que existe uma relação entre o aumento da área urbanizada com o processo de aterramento de mangue.

Figura 4 - Variação das áreas de manguezais ano a ano em hectares.



Fonte: autoria própria.

Os dados apresentados na figura 4 indicam que, embora os manguezais de São Luís tenham um saldo positivo de área durante o intervalo temporal abordado

nesta pesquisa, é evidente uma tendência de decréscimo observada nas últimas duas décadas.

A diminuição das áreas observada pode estar associada a impactos de origem humana, conforme sugerido pela literatura especializada, como o Atlas dos Manguezais do Brasil, ICMBio 2018. No entanto, é essencial conduzir estudos específicos de acompanhamento, monitoramento e compreensão dos processos de perda de áreas de manguezais em toda a zona costeira da cidade de São Luís. Entre os impactos humanos aos manguezais podem-se destacar:

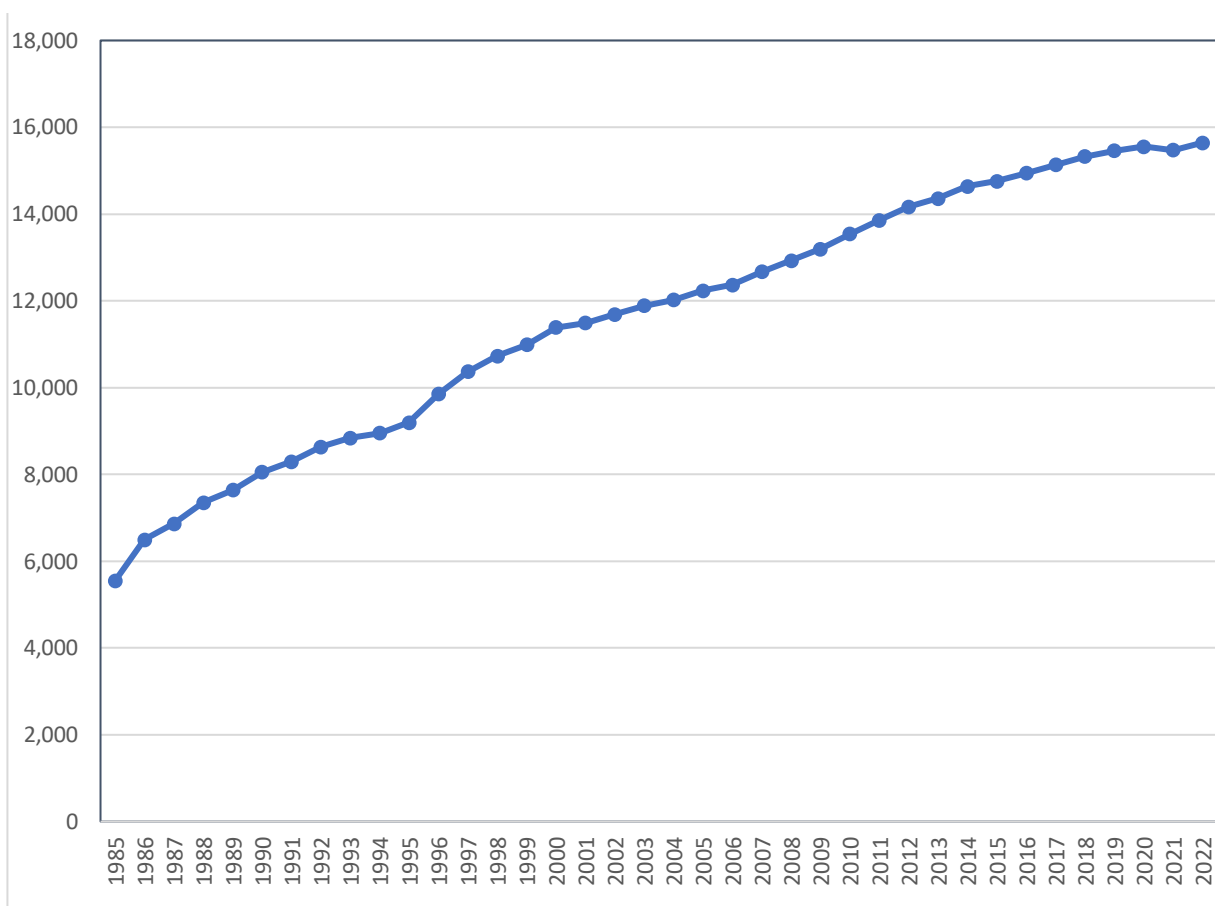
1. **Pressão imobiliária:** Áreas de manguezais localizadas na zona urbana, especialmente em locais de alto valor financeiro e destinados à instalação de grandes empreendimentos, podem estar mais suscetíveis a eventos de supressão ou aterro devido à intensa pressão imobiliária.
2. **Exclusão social:** Grupos sociais marginalizados em grandes centros urbanos frequentemente são direcionados a ocupar submoradias, como palafitas, em áreas de manguezais. Isso pode acarretar consequências negativas tanto para a qualidade de vida dessas pessoas quanto para a saúde ambiental do ecossistema manguezal.

O rio Anil é um dos principais cursos d'água que atravessa a cidade e sua influência se estende significativamente aos manguezais presentes em suas margens. Em um estudo realizado por Alcântara & Amorim (2005), verificou-se que o processo de urbanização em desenvolvimento alcançou 65,2% de toda a superfície do solo disponível desta bacia hidrográfica até o ano de 2005.

Os bairros que se encontram na margem do rio apresentam um grande processo de urbanização na cidade de São Luís por estarem próximos ao centro da capital e próximos aos principais pontos comerciais. Dessa forma, fazem parte dos primeiros registros de uso e ocupação do solo para serem destinados a construções residenciais, comerciais e expansão da malha viária.

A figura 5 representa o crescimento praticamente contínuo da área urbanizada em hectares, conforme os dados obtidos pelo MapBiomas durante o período de 1985 a 2022, evidenciando a expansão imobiliária e malha viária em São Luís.

Figura 5 - Área de ocorrência da área urbanizada em hectares.



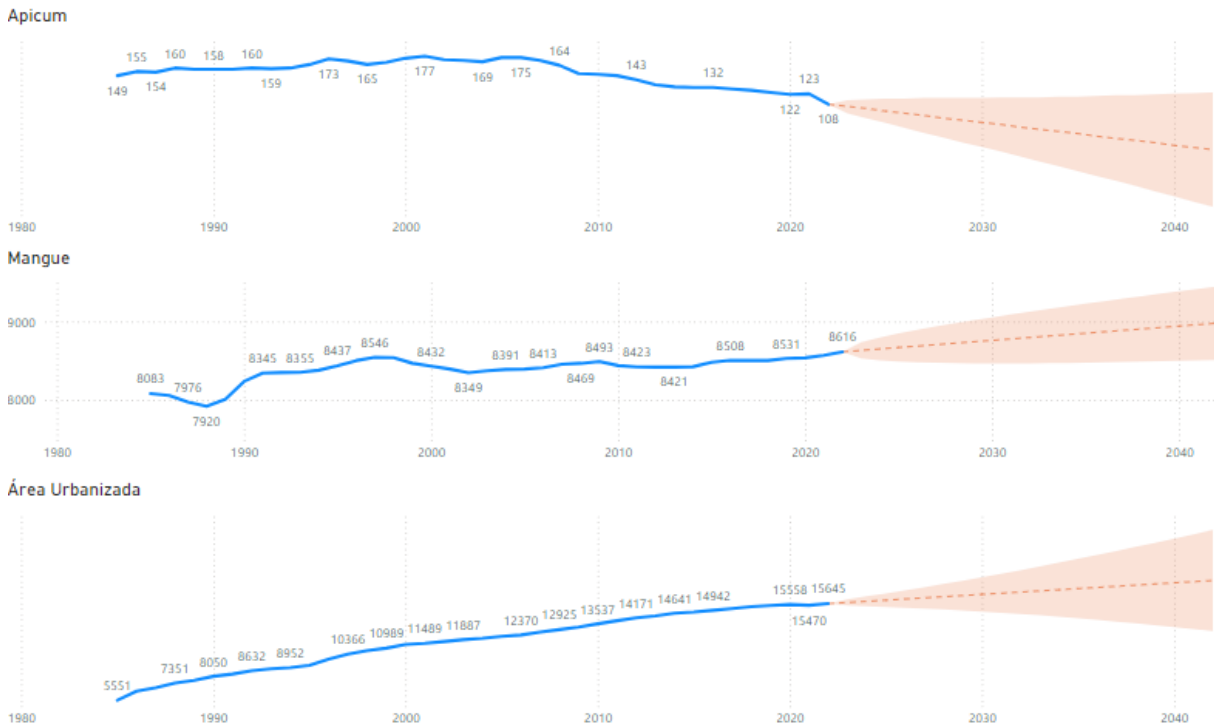
Fonte: autoria própria.

A figura 6 representa as projeções realizadas através do método estatístico de suavização exponencial, para previsão das áreas em hectares de apicum, mangue e área urbanizada. As linhas pontilhadas indicam a previsão em tendência, enquanto o sombreamento representa a margem de erro para mais ou para menos. É possível observar na figura 6 que a partir dos dados históricos, a área de apicum possui uma previsão que segue uma linha de tendência para perda de área em hectares para os próximos 20 anos.

Por outro lado, as projeções apontaram um aumento nas áreas de mangue na cidade de São Luís, sugerindo também uma alta resistência e capacidade de crescimento desse tipo de vegetação em condições oceanográficas ideais.

O crescimento da área urbanizada também é previsto em linha de tendência. Isso se deve à importância histórica e estratégica da cidade de São Luís. O aumento nos níveis de investimento dos últimos anos em infraestrutura, turismo e desenvolvimento econômico resulta em uma urbanização mais intensa, com expansão de bairros residenciais, áreas comerciais e industriais.

Figura 3 - Projeção para as áreas de apicum, mangue e área urbanizada em hectares.



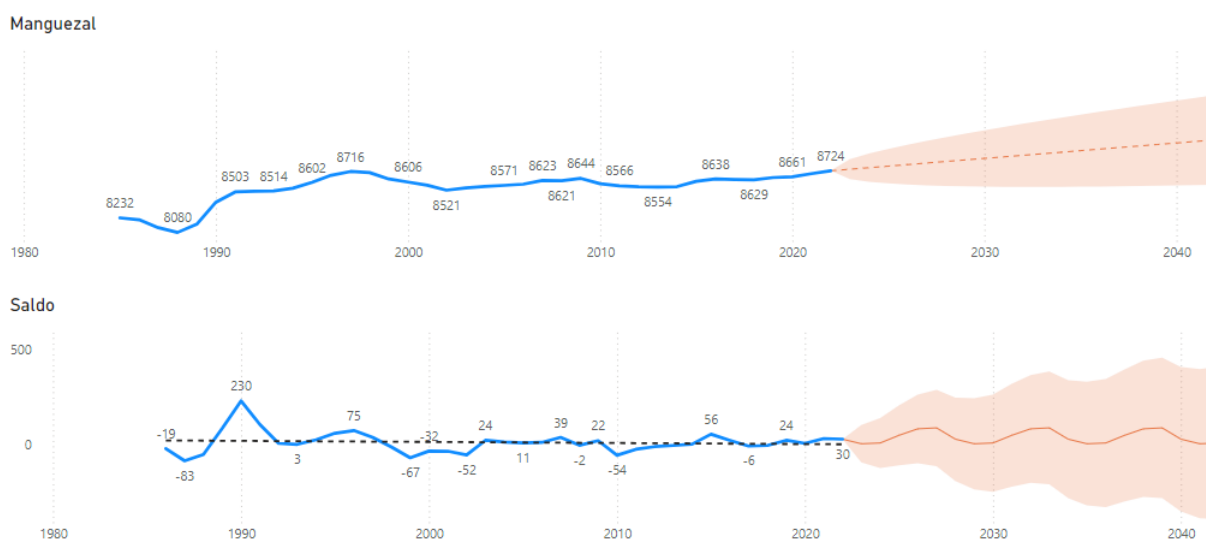
Fonte: autoria própria.

A figura 7 apresenta a projeção da tendência para a área em hectares do manguezal e para o saldo de sua área de ocorrência. Apesar da área de apicum apresentar uma projeção de perda de área, o manguezal permanece em tendência de alta para os próximos anos. Isso se deve a manutenção e resistência das áreas de mangue que permanecem se desenvolvendo.

Quanto ao saldo, é possível verificar uma oscilação entre o ganho e perda de área. Isso se deve ao método estatístico suavizar as variações aleatórias e identificar um padrão recente para tendência. Dessa forma, devemos considerar uma série de variáveis ambientais e antrópicas futuras para a projeção desse cenário.

Através dos dados históricos, o saldo da área de manguezal permanece positivo, porém, em uma notável tendência de baixa, reforçando a necessidade de manutenção e preservação desses ecossistemas. É previsto que a cidade de São Luís receba novos esforços econômicos para os próximos anos destinado ao desenvolvimento e expansão urbana, podendo ser um fator determinante na dinâmica do saldo no futuro.

Figura 4 - Projeção para as áreas de manguezal ano a ano em hectares.



A mudança nas leis de proteção dos manguezais resultou na diminuição de suas áreas na última década. O novo Código Florestal, Lei nº 12.651 de 2012, é menos rigoroso e possui brechas em comparação ao anterior (Lei nº 4.771 de 1965). Essa nova legislação inclui anistia para infrações nas Áreas de Preservação Permanente (APP) e dispensa pequenos proprietários rurais de manterem a Reserva Legal, favorecendo o desenvolvimento econômico em detrimento do meio ambiente.

6 CONCLUSÃO

Os dados desta pesquisa mostram que, no período analisado, as áreas de manguezais no perímetro urbano de São Luís tiveram um saldo positivo. No entanto, nas últimas duas décadas, houve uma clara tendência de redução nas áreas de manguezais, iniciada por volta de 1995 e continuando até 2022.

O crescimento da área urbanizada em São Luís do Maranhão segue uma trajetória de expansão contínua, refletindo um cenário de desenvolvimento urbano acelerado. Com o aumento da população e dos investimentos em infraestrutura, turismo e desenvolvimento econômico, os dados estatísticos apresentados nesse estudo reforça que essa tendência de expansão urbana persista no futuro próximo.

Foi possível identificar que o desenvolvimento industrial e urbano entre os anos de 1970 e 1980 foram cruciais no processo de redução da área de manguezais até 1988. A urbanização descontrolada e a crescente pressão por desenvolvimento

urbano levaram ao processo de aterramento de manguezais para dar lugar a projetos imobiliários, portuários e industriais, reduzindo a extensão dos manguezais.

A análise estatística com base nos dados históricos aponta para um padrão de variação contínua no saldo da área de manguezais. Como discutido anteriormente, o crescimento da urbanização tem exercido uma influência significativa no processo de aterro de manguezais, indicando que a pressão imobiliária e o desenvolvimento de infraestrutura viária continuarão a impulsionar uma tendência de queda no saldo da área de mangue. Esta tendência está se aproximando de um cenário em que poderemos observar perdas mais significativas de área, ou seja, um saldo negativo.

Dado o valor ecológico dos manguezais para São Luís, é imprescindível que haja investimento na sua recuperação e preservação. Isso inclui a realocação de palafitas, o desenvolvimento de moradias acessíveis para a população de baixa renda e a implementação de infraestrutura de saneamento básico nessas áreas. Essas medidas são essenciais para proteger não apenas os ecossistemas manguezais, mas também para promover o bem-estar social e ambiental das comunidades locais.

Nos estudos realizados, também foi observado que os manguezais demonstram uma notável resiliência. Eles conseguem tolerar amplas variações nos parâmetros físico-químicos do ambiente e têm a capacidade de se regenerar após grandes perturbações. Portanto, é crucial evitar perturbações sempre que possível, permitindo que esses ecossistemas se recuperem naturalmente ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E. H.; AMORIM A. J. Análise morfométrica de uma bacia hidrográfica costeira: um estudo de caso. *Caminhos de Geografia*. V. 7, n. 14, p. 70-77. 2005

Alongi, D. M. (2008). *Mangrove ecosystems: Function and resilience*. *Annual Review of Marine Science*, 1, 177-200.

Alongi, D. M. (2015). The impact of climate change on mangrove forests. *Current Climate Change Reports*, 1(1), 30-39.

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193.

Bezerra, D.S. et al. Simulating Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem adjacent to Anthropic Areas: the case of Maranhão Island, Brazilian Northeast. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* 9 (3): 188-198, 2014.

Diele, K., & Simith, D. J. B. (2010). *Biodiversidade e serviços ecossistêmicos dos manguezais no Brasil*. *Revista Brasileira de Ecologia*, 2(1), 45-58.

Friess, D. A., Krauss, K. W., Horstman, E. M., Balke, T., Bouma, T. J., Galli, D., ... & Webb, E. L. (2012). Are all intertidal wetlands naturally created equal? Bottlenecks, thresholds and knowledge gaps to mangrove and saltmarsh ecosystems. *Biological Reviews*, 87(2), 346-366.

Gualberto, G. L. F., Sousa, K. R. S., Bezerra, D. S. (2023). Análise temporal de alterações nas áreas de manguezais e apicuns do Brasil entre 1985 a 2019. *Revista Uniaraguaia (online)*, Goiânia, v. 18, n. 1, p. 48.

INPE. *TerraView Software copyright © 2001-2011 INPE*. Tecgraf PUC-Rio and FUNCATE. 2011.

KJERFVE, B., PERILLO, G. M., GARDNER, L. R., RINE, J. M., DIAS, G. T. M. & MOCHEL, F. R. 2002. *Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America In: Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Functions*. 1 ed. Amsterdam. Elsevier Science.

Lee, S. Y., Hamilton, S., Barbier, E., Primavera, J., Lewis, III, R. R., & Pfitzner, J. (2019). Better restoration policies are needed to conserve mangrove ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 3(6), 870-872.

Lima, F. S., & Santos, M. A. (2018). Aplicações de Modelagem Computacional em Sistemas Ambientais Brasileiros. *Anais do Congresso Brasileiro de Ciência da Computação*, 15, 432-445.

MEDEIROS, T. C. C. A Degradação do Manguezal o Igarapé do Jaracati,... *Interface*. Porto Nacional/TO, v.2, n.2, p. 166-173, maio 2005.

Mendes, C. A. B., Costa, M. F., & Abuchahla, G. M. M. (2017). Análise da dinâmica espaço-temporal do manguezal na Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(6), 1800-1814.

Oliveira, A. M., & Silva, R. C. (2019). Modelos Computacionais na Previsão de Desastres Naturais: Uma Revisão da Literatura. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 7(2), 85-102.

Pereira, C. R., & Costa, P. A. (2016). Simulação de Agentes na Gestão de Tráfego Urbano: Um Estudo de Caso em Metrôpoles Brasileiras. *Revista de Tecnologia e Informação*, 5(1), 56-73.

Sampaio, E. V., & Mendonça, T. E. G. (2009). Biogeografia do bioma manguezal no Brasil. In: Costa, R. C. da, Henriques, L. M. P., & Barbari, L. (Eds.) *O Bioma Manguezal e as Populações Humanas da Zona Costeira do Brasil*. Editora da Universidade Federal da Paraíba.

Santos, L. M., & Oliveira, H. A. (2020). O Uso de Redes Complexas como Modelo Computacional na Análise de Sistemas Sociais Brasileiros. *Journal of Computational Social Science*, 18(4), 321-338.

Schaeffer-Novelli, Y., & Cintrón, G. (2010). O manguezal brasileiro. In: Cintrón G, Schaeffer-Novelli Y (Eds) *Manejo e conservação de áreas úmidas no Brasil* (pp. 87-98). São Paulo: Holos Editora.

SCHAFFER-NOVELLI Y. *Manguezal: Ecosistema entre a terra e o mar*, [S.l]: Caribe Ecological Research, 1995. 64 p.

Souza, C. C., & Lima, R. L. P. (2015). Vulnerabilidade ambiental do manguezal no estuário do Rio Paraíba do Sul, Brasil. *Boletim de Geografia*, 33(1), 171-186.

Souza, J. B., & Almeida, R. S. (2017). Modelagem Computacional Aplicada à Saúde: Desafios e Perspectivas para a Realidade Brasileira. *Revista Brasileira de Informática em Saúde*, 12(3), 120-135.

SPALDING, M. D., BLASCO, F. & FIELD, C.D. (eds) 1997. *World mangrove atlas*. *International Society for Mangrove Ecosystems*, Okinawa 903-01, Japan. 178 pp.
WOLFRAM, S. 1983. *Statistical mechanics of cellular automata*. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 55, No. 3: 602-644.