

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**SIMULAÇÃO DE ELEVAÇÃO EUSTÁTICA UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS
E FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO SOBRE A ZONA COSTEIRA DO
LITORAL PAULISTA**

Gustavo Giacometti Nunes

Prof.Dr. Lucas Moreira Furlan

Rio Claro (SP)

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

GUSTAVO GIACOMETTI NUNES

SIMULAÇÃO DE ELEVAÇÃO EUSTÁTICA UTILIZANDO
MÉTODOS NUMÉRICOS E FERRAMENTAS DE
GEOPROCESSAMENTO SOBRE A ZONA COSTEIRA DO
LITORAL PAULISTA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Geólogo.

N972s

Nunes, Gustavo Giacometti

Simulação de elevação eustática utilizando métodos numéricos e ferramentas de geoprocessamento sobre a zona costeira do litoral paulista / Gustavo Giacometti Nunes. -- Rio Claro, 2025

61 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Moreira Furlan

1. Mudanças climáticas. 2. Elevação do nível do mar. I. Título.

GUSTAVO GIACOMETTI NUNES

SIMULAÇÃO DE ELEVAÇÃO EUSTÁTICA
UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS E
FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO
SOBRE A ZONA COSTEIRA DO LITORAL
PAULISTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora
Profº Drº Lucas Moreira Furlan (orientador)
Profª Drª Paulina Setti Riedel
Profº Drº Iata Anderson de Souza

Rio Claro, 24 de Novembro de 2025.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha mãe, Vera Lucia Giacometti Nunes, por todos os seus ensinamentos, estes foram a principal motivação de toda dedicação posta a este curso de graduação, assim como o apreço e preocupação para com a ciência e o aprendizado, por todo apoio e compreensão ao longo destes anos, por todo suporte e por ter me proporcionado a oportunidade de tornar-me o que sou hoje.

Agradecimentos

Agradeço a todos que participaram desta longa jornada, em especial minha companheira Paloma Smaniotto Garcia, por toda sua contribuição em minha jornada acadêmica assim como pelo suporte emocional e compreensão, também agradeço a minhas amigas Caroline Azevedo e Thais Arantes pelo apoio ao longo dos anos de graduação e principalmente por sua amizade. Por ultimo, agradeço ao Profº Drº Lucas Moreira Furlan pelo apoio na realização deste trabalho.

CONTRIBUIÇÕES AOS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS-ONU)

A Organização das Nações Unidas (ONU) e seus países-membros, incluindo o Brasil, adotaram a Agenda Pós-2015, que estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Esses objetivos integram um plano de ação global voltado à superação dos principais desafios contemporâneos, com a metas a serem alcançadas até 2030 (brasil.un.org).

O presente trabalho encontra-se alinhado com alguns dos ODSs, sendo eles: ODS 9 – Inovação tecnológica: desenvolvimento de métodos para previsão de impactos do avanço no nível do mar sobre ecossistemas vulneráveis e patrimônio cultural natural do mundo. ODS 15 – Vida terrestre; a construção de modelos de elevação marítima possibilitou evidenciar efeitos sobre ecossistemas costeiros sensíveis ao aumento dos níveis médios globais do mar correlacionada as mudanças climáticas, indicando área de interesse para implementação de políticas públicas e medidas de mitigação afim proteger, restaurar e promover uso sustentável de ecossistemas terrestres, gerir florestas sustentavelmente, impedir a perda de biodiversidade e a degradação da terra.

CONTRIBUTIONS TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOAL (SDG)

The organization of the United Nations (UN) e their country members, including Brazil, have adopted the Agenda Post-2015, which view to accomplish 17 Sustainable Development Goals. These objectives are part of a global action plan aimed at overcoming the main contemporary challenges, with targets to be achieved by 2030 (brasil.un.org).

The present work finds itself aligned with some of these SDGs, between them: SDG 9 – Technological Innovation – development off methods to predict the impacts of rising sea levels over the vulnerable ecosystems. SDG 15 – Life on Land; With the construction of models of for the prediction of rising sea level, it was possible to access its effects over coastal ecosystems vulnerable to rising sea levels corelated to climate change, identifying areas of interest for implementation of public policy in order to protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably mange forests, halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar os impactos ambientais futuros decorrentes de possíveis alterações na linha da costa, associados a subida do nível do mar sobre a porção continental central do litoral paulista. Para isso, foram realizadas previsões numéricas baseadas em dados de altimetria marítima obtidos de satélites, com projeções estimadas para o ano de 2100. A metodologia adotada envolveu a aplicação de testes quantitativos para a previsão dos períodos de elevação do nível do mar, avaliados a partir de coeficientes de precisão e comparados com projeções de instituições internacionais de pesquisa em mudanças climáticas e relatórios específicos. Os resultados permitiram a elaboração de um modelo cartográfico capaz de identificar as áreas mais suscetíveis aos impactos ecológico e socioeconômicos decorrentes da elevação do nível do mar sobre as áreas-alvo que compõe a porção central do litoral paulista além de dois municípios pertencentes a divisão administrativa norte do litoral. Conclui-se que a função de ajuste polinomial é a mais precisa para o tipo de previsão alvo deste trabalho, pela sua capacidade de adequar-se a dados de variações suaves, o método utilizado para composição de um cenário de avanço do mar sobre a costa, proposto pelo presente trabalho, deve servir como subsídio para ações de planejamento e gestão costeira, contribuindo para a proteção ambiental e a conservação de ecossistemas sensíveis a variações eustáticas previstas para as próximas décadas. Efeitos diretos sobre a região de estudo incluem a erosão costeira, possível acúmulo de sedimentos na baía de Santos e efeito direto sobre a infraestrutura portuária local, patrimônio ambiental e antropológico regional.

Palavras-chave: mudança do nível do mar; modelagem numérica; impactos ambientais; tecnologias geoespaciais; cartografia ambiental; variação eustática; planejamento costeiro.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze future environmental impacts resulting from possible changes in the coastline associated with sea-level rise along the central continental portion of the São Paulo coast. To this end, numerical forecasts were carried out based on maritime altimetry data obtained from satellites, with projections estimated for the year 2100. The methodology employed involved the application of quantitative tests for predicting periods of sea-level rise, evaluated using accuracy coefficients and compared with projections from international climate-change research institutions and specific assessment reports. The results enabled the development of a cartographic model capable of identifying the areas most susceptible to ecological and socioeconomic impacts caused by sea-level rise over the target areas that comprise the central portion of the São Paulo coastline, in addition to two municipalities belonging to the northern administrative division of the coast. It is concluded that the polynomial adjustment function is the most accurate for the type of forecasting addressed in this study due to its ability to fit smooth variation data. The method used to construct a scenario of sea-level advance along the coast, as proposed herein, should serve as a basis for coastal planning and management actions, contributing to environmental protection and the conservation of ecosystems sensitive to the eustatic variations projected for the coming decades. Direct effects on the study region include coastal erosion, potential sediment accumulation in the Santos Bay, and direct impacts on local port infrastructure, as well as on the region's environmental and anthropological heritage.

Keywords: sea level change; numerical modeling; environmental impacts; São Paulo coast line; environmental cartography; eustatic variation; coastal management.

Índice de tabelas

Tabela 1: Área, número de habitantes e densidade demográfica dos municípios observados no estudo.....	17
Tabela 2: Valores médios anuais de elevação eustática na zona de estudo obtidos a partir da média anual (1994-2024).....	36
Tabela 3: Cenários previstos pelo relatório do IPCC (2022) através do cenários SSPs de elevação média do nível do mar até 2100.....	42
Tabela 4: Cenários previstos de elevação médio do nível do mar até 2100 pelos métodos utilizados.....	42
Tabela 5: Impactos previstos para aumento no NMRM.....	48
Tabela 6: Identificação dos sítios paleontológicos afetados pela subida eustática projetada.....	49

Índice de figuras

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2: Mapa de recursos minerais e sítios arqueológicos reconhecidos.....	18
Figura 3: Posição geográfica das principais serras da região sudeste do Brasil.....	19
Figura 4: Distribuição das principais feições geológicas da região sudeste do País adjacentes à Bacia de Santos, entre Santa Catarina e o Rio de Janeiro.....	19
Figura 5: O grande promontório da Serra do Juqueriquerê e as principais ilhas costeiras do litoral norte paulista.....	20
Figura 6: Distribuição espacial da cobertura vegetal de manguezais no Litoral Norte do estado de São Paulo no de 2015.....	21
Figura 7: Perfil esquemático do manguezal da região de Itanhaém.....	22
Figura 8: Ilustração geral do manguezal e de seu substrato.....	24
Figura 9: Dados de satélite: 1993-Presente, Gráfico da variação da altura superficial do oceano (mm).....	25
Figura 10: Zona de coleta de dados.....	35
Figura 11: Série temporal de tendência linear da subida do mar.....	36
Figura 12: Gráfico de valores médios do nível do mar (em mm), abrangendo os anos de 1994 à 2024.....	38
Figura 13: Gráfico de tendência de elevação média do nível do mar em milímetros ao ano para caso linear.....	39
Figura 14: Gráfico de elevação média do nível do mar em milímetros ao ano para o caso logarítmico.....	40
Figura 15: Gráfico de tendência da elevação em milímetros do nível do mar ao ano para caso logarítmico.....	41
Figura 16: Mapa Hipsométrico da área de estudo (SRTM).....	44
Figura 17: Mapa de elevação eustática.....	45
Figura 18: Zona de interesse 1.....	47
Figura 19: Mapa de elevação eustática sobre a zona de interesse 2.....	50

Índice de Siglas e Abreviaturas

APP	Áreas de Preservação Permanente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOUSP	Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
NMRM	Aumento do Nível Médio Relativo do Mar
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
SIGMINE	Sistema de Informações Geográficas da Mineração
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TSM	Temperatura Superficial do Mar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	17
4. METODOLOGIA.....	26
4.1 Fundamentação do Método Numérico.....	29
4.1.1 Ajuste Linear.....	30
4.1.2 Ajuste Logarítmico.....	31
4.1.3 Ajuste Polinomial De Segunda Ordem.....	32
4.1.4 Coeficiente De Determinação.....	33
4.2 Aplicação Em Dados Climáticos Históricos.....	33
4.3 Aplicação Do Método.....	35
4.4 Origem Dos Dados.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1 Ajuste Linear.....	39
5.2 Ajuste Logarítmico.....	40
5.3 Ajuste Polinomial de Segunda Ordem.....	41
5.4 Comparação.....	42
5.5 Simulação De Elevação Eustática.....	44
5.5.1 Mapa De Elevação Eustática.....	45
5.5.2 Zonas De Interesse.....	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	53
7. IMPLICAÇÕES FUTURAS.....	54
8. REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o planeta tem enfrentado intensificação nos efeitos das mudanças climáticas, o que pode ser evidenciada pela elevação significativa nos níveis eustáticos além de uma maior frequência a ocorrência de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, tempestades intensas, secas prolongadas e inundações costeiras (IPCC 2022). O seguinte cenário tem sido amplamente monitorado e documentado por diversas entidades científicas internacionais, que utilizam séries históricas aferidas por imagens de satélite e tecnologias de sensoriamento remoto para registrar tais alterações ambientais com cada vez mais precisão.

A Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) observou um aumento médio do nível global do mar de aproximadamente 3,3 mm por ano nas últimas décadas, este valor atribuído principalmente a expansão térmica dos oceanos e ao derretimento de geleiras e mantos de gelo continentais (NOAA, 2023). De forma semelhante, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) alerta para o aumento contínuo da temperatura média global e para os recordes de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, que intensificam o aquecimento global e consequentemente, provocam diversos impactos no ciclo hidrológico assim como no regime de tempestades (OMM, 2023).

No Brasil, o Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) identificou uma elevação de aproximadamente 20 cm no nível do mar no litoral paulista nas últimas décadas, revelando dessa forma, uma tendência local alinhada com os dados globais. Além disso, projeções do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e do Climate Impact Lab incluem as cidades do Rio de Janeiro e Santos entre os centros urbanos com maior risco de inundações até 2050. A partir da análise de imagens de satélite, dados históricos e relatórios climáticos internacionais, é possível observar que apontam o desequilíbrio em parâmetros ecológicos essenciais, intensificado pelo avanço desordenado da urbanização costeira.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas projeta que, até meados deste século, a elevação da temperatura média global poderá ultrapassar os +3 °C em relação aos níveis pré-industriais, intensificando os impactos sobre os ecossistemas e contribuindo para a elevação dos níveis eustáticos globais (IPCC,

2021).

Esse fenômeno representa um risco elevado especialmente para ilhas e faixas litorâneas, onde a invasão marinha compromete biomas costeiros já ameaçados pela urbanização predatória que ocorre no litoral paulista devido a flexibilização das leis de proteção ambiental, sobretudo em Áreas de Preservação Permanente (APPs) como os manguezais e as zonas de Mata Atlântica. Também é possível que a sedimentação proveniente da erosão costeira tenha efeito direto sobre a infraestrutura portuária local, assim como sobre zonas densamente povoadas de urbanização irregular.

O avanço das tecnologias geoespaciais e da modelagem numérica tem possibilitado o monitoramento detalhado de variáveis em características oceânicas, como a Temperatura Superficial do Mar (TSM), salinidade e dinâmica do curso das massas d'água. A integração desses dados permite a formulação de algoritmos preditivos capazes de avaliar padrões de mudança topográfica e simular cenários futuros de erosão e inundação costeira com o recuo da linha de costa. No litoral paulista, tais ferramentas são cruciais para o entendimento das dinâmicas atuais e para a projeção dos impactos da elevação do nível do mar sobre a biodiversidade, a infraestrutura urbana e o arcabouço geológico local.

A ausência de estudos locais sistematizados sobre os efeitos da elevação eustática em determinadas regiões da costa paulista motivou esta pesquisa, que propõe a criação de um modelo cartográfico de suscetibilidade baseado em dados topográficos e oceanográficos em séries temporais. Segundo Leatherman (1986), o avanço do nível do mar representa uma ameaça significativa à estabilidade das regiões costeiras sul-americanas, esse fato é agravado pela remoção da vegetação nativa que atua como barreira natural contra a erosão costeira, que já ocorre devido ao crescimento urbano irregular sobre áreas de proteção ambiental, o presente estudo se propõe a contribuir cientificamente para a compreensão destes efeitos e a gestão dos riscos associados ao avanço do mar sobre a costa. A zona de estudo em questão compete às extensões territoriais municipais de Bertioga, Caraguatatuba, Guarujá, Ilhabela, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos, São Sebastião e São Vicente, cidades que integram o litoral central e norte do Estado de São Paulo com densidade populacional relativamente alta e profundas ligações econômicas, culturais e socioambientais para com a linha de costeira e a rica biodiversidade que a permeia.

Dessa forma, busca-se analisar os impactos da elevação eustática sobre os municípios da faixa costeira central do Estado de São Paulo, com foco nas zonas urbanas, portuárias e nos ecossistemas mais vulneráveis aos efeitos da erosão marítima e de eventos climáticos extremos através de ferramentas de geotecnologias, produzir de produtos cartográficos que evidenciem áreas suscetíveis a elevação no nível do mar, contribuindo com dados essenciais para o planejamento urbano e para a formulação de políticas públicas de proteção ambiental que sejam capazes de conter os danos relacionados ao recuo da linha de costa.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar, por meio de ajustes de função em modelos matemáticos para previsão do aumento no nível do mar e técnicas de geoprocessamento, as áreas dos municípios do litoral central paulista mais suscetíveis a impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes da elevação do nível do mar e do avanço da linha de costa nas próximas décadas.

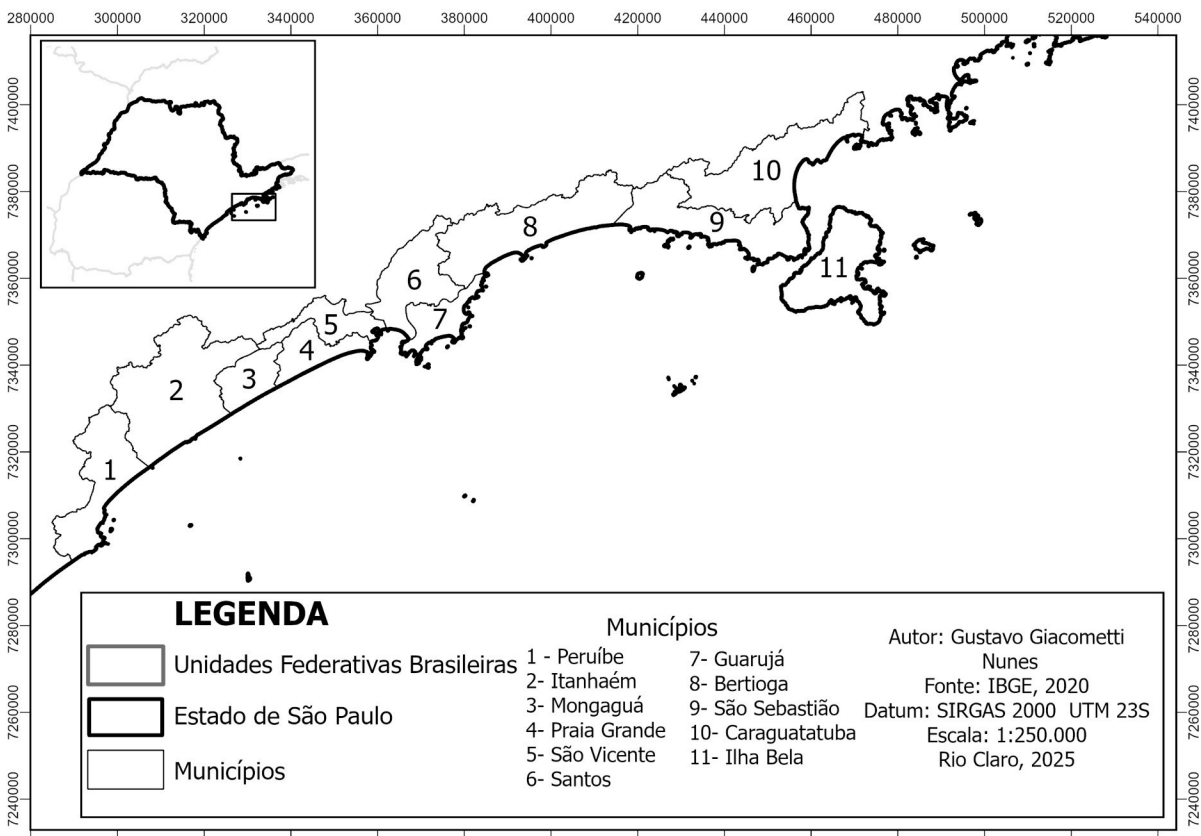
2.2 Objetivos específicos

Identificar e analisar a área perdida decorrentes da projeção da elevação dos níveis eustáticos sobre Áreas de Preservação Permanente (APPs) incluídas territorialmente nos municípios pertencentes à área de estudo, como o parque estadual da Serra do Mar, zona dos bosques de manguezal e conteúdo florestal, bem como nos pontos identificados ao longo da costa pelo IPHAN como sambaquis e ruínas.

Identificar, quantificar e analisar possíveis impactos ambientais às áreas de mangue, Mata Atlântica e patrimônio antropológico e cultural pertencentes à zona territorial dos municípios inclusos na área de estudo, afetados pela projeção da subida dos níveis eustáticos, comparando a situação atual das condições ambientais de equilíbrio ecossistêmico local a possíveis cenários futuros.

3. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

A região de estudo escolhida, exposta na Figura 1, compreende os municípios pertencentes à porção central e norte do litoral do estado de São Paulo, composta por Bertioga, Caraguatatuba, Guarujá, Ilhabela, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande, Santos, São Sebastião e São Vicente. A área total somada desses municípios é de 3.519,59 km², com uma população aproximada de 1.944.457 habitantes, de acordo com Censo do IBGE (2022), utilizados na composição do Quadro 1.



Fonte: Autoral (2025).

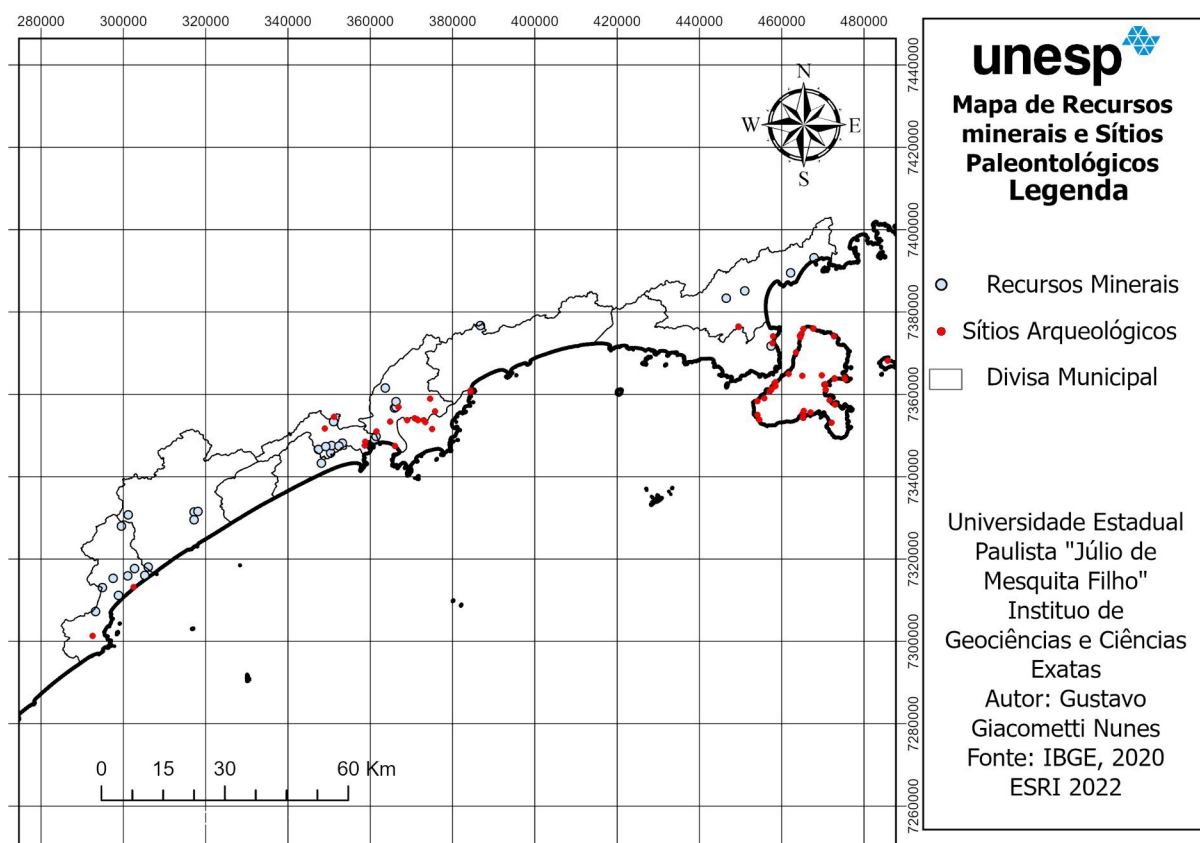
Tabela 1: Área, número de habitantes e densidade demográfica dos municípios observados no estudo.

Municípios	Área (km²)	Habitantes	Densidade demográfica (habitante/km²)
Bertioga	491,546	64.188	130,58
Caraguatatuba	484,947	134.873	278,12
Guarujá	144,794	287.634	1.986,50
Ilhabela	346,389	34.934	100,85
Itanhaém	601,711	112.476	186,93
Mongaguá	143,205	61.951	433,97
Peruíbe	326,216	68.352	209,53
Praia Grande	149,253	349.935	2.338,32
Santos	281,033	418.608	1.489,53
São Sebastião	402,395	81.595	202,77
São Vicente	148,1	329.911	2.226,86

Fonte: IBGE (2022)

A área de estudo está sobreposta sobre a fisiografia construída pela Serra do Mar, sendo fonte de recursos minerais como brita, gnaisses, rochas ornamentais, saibro, granito, areia e argila em cerca de 33 pontos identificados pelo SIGMINE (2025). O conteúdo arqueológico da região é composto por sambaquis, abrigos e diferentes ruínas, totalizando 78 sítios arqueológicos reconhecidos pelo IPHAN (2024).

De acordo com o Inventário Florestal de Vegetação Natural (2005), os municípios analisados estão inseridos na área de Formação Arbórea/ Arbustiva-Herbácea de Terrenos Marinhos Lodosos e Floresta Ombrófila Densa, sendo a primeira zona onde se encontram os ecossistemas de manguezais característico da região, os dados em questão foram recolhidos e expostos por meio de um mapa apresentado na Figura 2.

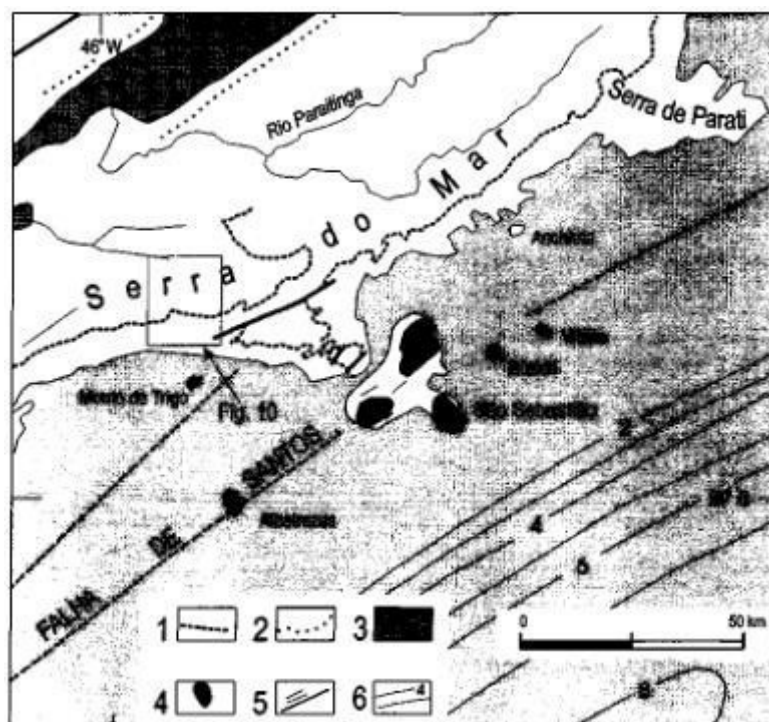


Fonte: Autoral, SIGMINE (2025) e IPHAN (2024)

3.1 Características Fisiográficas

A fisiografia da região é composta principalmente pela Serra do Mar, que circunda toda área de estudo. De acordo com De Almeida & Carneiro (1998), a Serra do Mar é formada por sistemas montanhosos subparalelos estendidos ao longo do litoral paulista e carioca, como ilustrado na Figura 3, em domínios escarpados festonados, terminados no planalto atlântico em trecho voltado para a Bacia de Santos como exposto na Figura 4, com orientação geológica estrutural geral de ENE como observado na Figura 5 a extensão do lineamento sobre o município de Ilha Bela, compondo toda a paisagem da área de estudo. Essa configuração confere à região alta variabilidade altimétrica, de 0 a 1300 m de altitude. De encontro com o planalto atlântico a fisiografia local compõe uma série de terrenos alagados no fundo das encostas, comportando ecossistemas de manguezal em níveis altimétricos mais

cenozóica, 5. Alinhamentos estruturais e falhas, 6. Linhas de contorno estrutural do embasamento, 7. Diques, 8. Corpos alcalinos, 9. Limites topográficos de rifles, 10. Falhas na área submersa.



Fonte: De Almeida (1998).

Convenções: 1. Limite superior de escarpa, 2. Limites topográficos de rifles, 3. Bacias tafrogênicas, 4. Corpos alcalinos, 5. Alinhamentos estruturais e falhas, 6. Linhas de contorno estrutural do embasamento na área submersa.

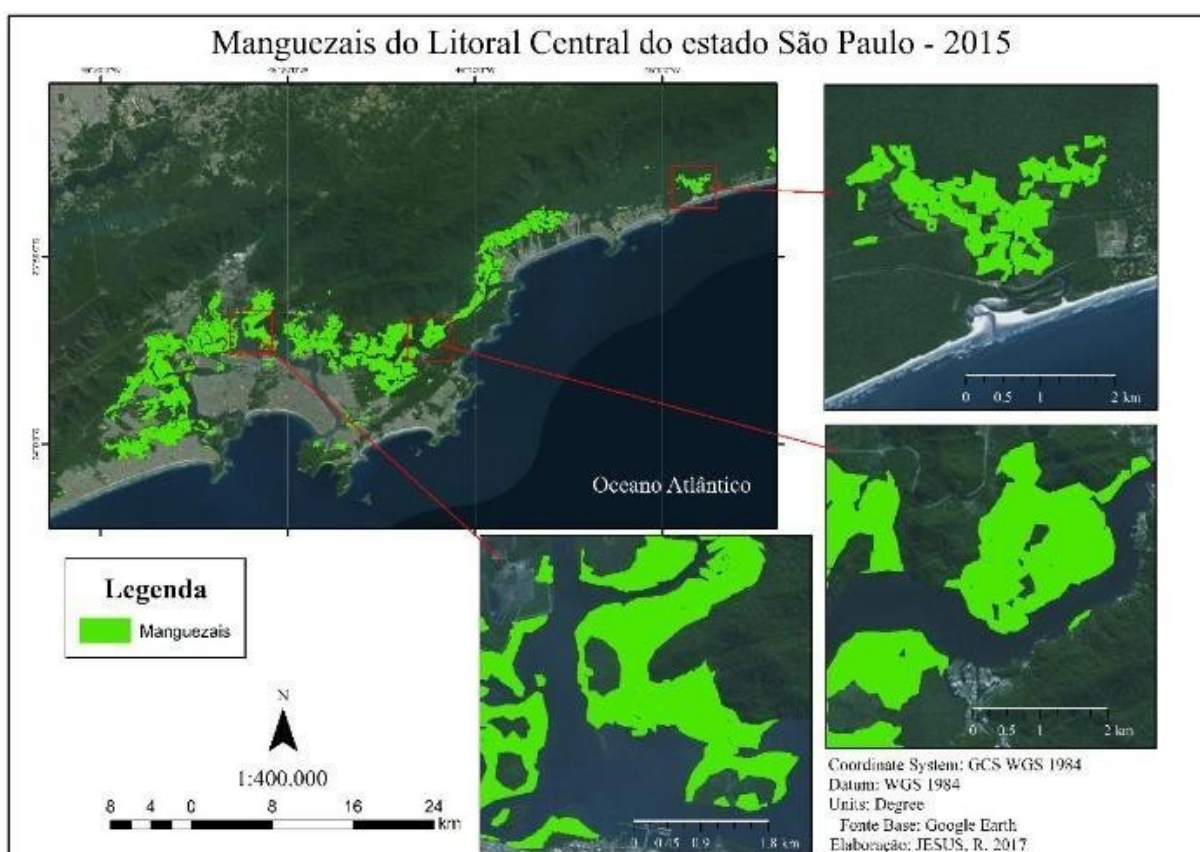
3.2 Características Ecológicas

Os manguezais constituem ecossistemas costeiros singulares situados na interface entre os ambientes terrestre e marinho. Segundo Pannier & Pannier (1980), trata-se de um sistema aberto em relação ao fluxo de energia e matéria, reagindo ostensivamente às mudanças climáticas e influência externa, a partir de pressões antrópicas ou naturais. Estes ambientes se desenvolvem sob condições ecológicas específicas, fortemente influenciadas pelo regime de marés, pela natureza do substrato local e principalmente pela fisiografia regional.

A região de estudo é composta por ambientes de mangue que estão profundamente relacionadas com a altimetria marítima, localizadas principalmente ao fundo dos domínios escarpados com a alta concentração de drenagens em

direção à Baía de Santos, que partem dos altos morros formados pela paisagem atribuída à Serra do Mar.

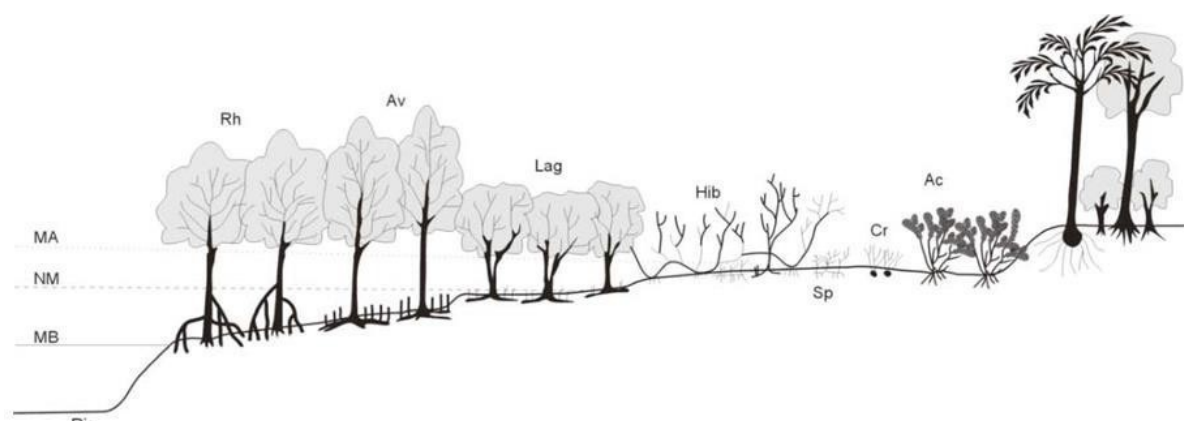
De acordo com o Inventário Florestal de Vegetação Natural (2005), esses ambientes integram a área de Formação Arbórea/Arbustiva-Herbácea de Terrenos Marinheiros Lodosos e Floresta Ombrófila Densa, sendo o primeiro componente principal dos bosques de manguezal estendidos ao longo das margens da hidrografia que conecta diferentes municípios da região de estudo, com afluentes recobertos pela floresta tropical de Mata Atlântica e terminações gerais ocorrendo ao longo de matas de restinga próximas ao ambiente costeiro. A zona de maior concentração de manguezais na área estudada foi observada por Jesus (2017), exposta na Figura 6.



Fonte: Extraído de Jesus (2017).

O regime de marés exerce influência direta sobre a distribuição das espécies vegetais e sobre as feições estruturais do manguezal. A feição denominada lavado

ou intra-maré corresponde às áreas submetidas a uma maior frequência de inundação, enquanto a “*apicum*”, localizada nas zonas marginais, é atingida apenas durante as marés de sizígia, equinociais ou em eventos meteorológicos excepcionais como tempestades e inundações. No que se refere à dependência da flora do regime de marés, segundo Schaeffer-Novelli (1995) ao descrever essas relações identifica a distinção entre dois grupos principais de espécies: as obrigatórias, que vivem sob ação constante das marés e se desenvolvem sobre os solos argilosos lodosos do manguezal e as facultativas, encontradas em zonas apenas ocasionalmente atingidas por marés de grande amplitude, sobre solos predominantemente arenosos, o perfil esquemático exposto na Figura 7, evidência a correlação ambiental entre o regime de marés e espécies nativas da zona de manguezal da região de Itanhaém, que pode refletir o comportamento ecossistêmico geral das áreas de manguezal estudas.



Fonte: Extraído de Amaral (2003), (modificado de Lamberti, 1969).

Convenções: MA: nível atingido pela maré alta; NM: nível médio da maré; MB: nível da maré baixa; Rh: Rhizophora; AV: Avicennia; Lag: Laguncularia; Hib: Hibiscus; Sp: Spartina; Cr: Crinum; Ac: Acrostichum.

A fisiografia dos manguezais está intimamente associada à formação do substrato e a localização abrigada, condições indispensáveis ao estabelecimento e à estabilidade dos bosques de mangue.

Do ponto de vista ecológico, os manguezais são classificados como vegetação de primeira ocupação de caráter edáfico, uma vez que se desenvolvem em terrenos rejuvenescidos pelas sucessivas deposições de aluviões fluviomarinhas

nas embocaduras dos rios, de acordo com Schaeffer-Novelli (1995).

Quanto à natureza do substrato, as áreas dos municípios da zona de estudo caracterizam-se como Formações Arbóreas/Arbustivas-Herbáceas de Terrenos Marinheiros Lodosos como identificado pelo Inventário Florestal (2005), embora manguezais com substrato arenoso também sejam registrados, o que demonstra a plasticidade ecológica desse ecossistema e sua capacidade distributiva ao longo da costa do litoral paulista.

Os solos, em geral, apresentam baixa oxigenação e elevado teor de matéria orgânica, condições que influenciam tanto a fisiologia das espécies vegetais quanto a composição faunística. Ainda de acordo com o livro de Schaeffer-Novelli (1995), manguezais ocorrem preferencialmente em ambientes costeiros abrigados, como baías, estuários e enseadas, onde a energia das ondas é reduzida e há acúmulo de sedimentos finos, que pode ser identificado na zona de estudo competente à baía de Santos e na zona de conexão fluvial entre os municípios de Praia Grande, São Vicente e Santos. A dinâmica sedimentar marcada por processos de erosão e deposição, que está relacionada à atividade econômica principal da zona de estudo, o transporte portuário no Porto de Santos, constitui um fator determinante para a evolução e expansão desses ambientes. Assim, erosão e sedimentação são consideradas Atributos Ecológicos Chave (AECs) no contexto da paisagem costeira de acordo com Oliva (2023).

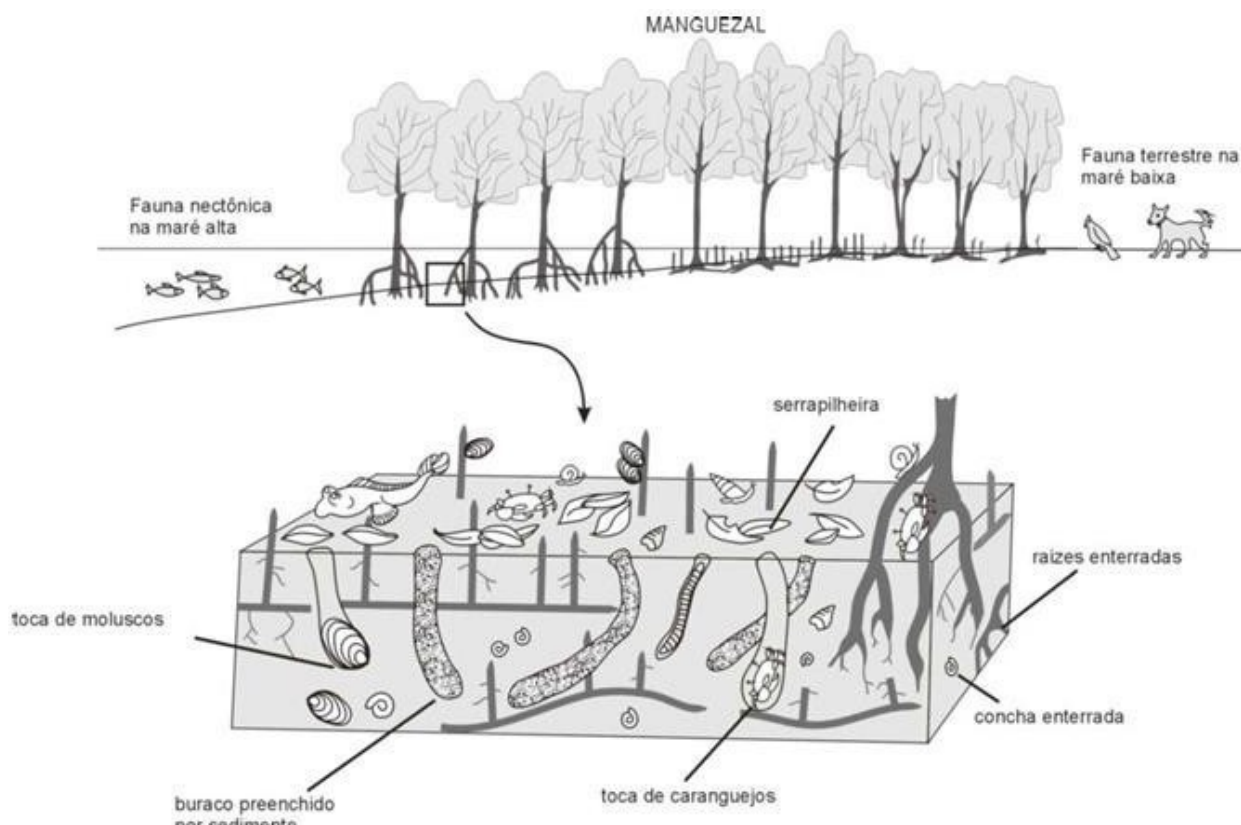
Estudos de monitoramento a longo prazo, baseados em fotografias aéreas e sensoriamento remoto, têm demonstrado que as mudanças na cobertura vegetal dos manguezais estão intimamente relacionadas à dinâmica sedimentar e aos impactos antrópicos como exposto por Araújo (2017).

Em áreas degradadas ou erodidas, destaca-se a necessidade de restabelecimento das condições morfodinâmicas, ou seja, o balanço de sedimentos finos, essencial ao crescimento e regeneração dos mangues. A Serra do Mar exerce influência significativa sobre os manguezais do litoral paulista, tanto por sua proximidade geográfica quanto pela conectividade ecológica com as formações vegetais adjacentes. O Parque Municipal do Piaçabuçu, por exemplo, é reconhecido por proteger um importante corredor de manguezais que se estende entre o Parque Estadual Xixová-Japuí e o Parque Estadual da Serra do Mar segundo Oliva (2003).

Nos estuários da região, como o do rio Itanhaém, observa-se que as margens

fluviais são recobertas a montante por floresta tropical da Mata Atlântica, evidenciando uma transição ecológica gradativa entre os ambientes de encosta e os bosques de mangue. A influência da Mata Atlântica de encosta nos manguezais é corroborada por estudos palinológicos que demonstram a presença de gêneros típicos de mata tropical nos registros polínicos nos sedimentos de mangue, indicando o intercâmbio de material biológico entre as duas formações vegetais de acordo com Amaral (2003).

Adicionalmente, pesquisas florísticas comparativas revelaram semelhanças entre as espécies de Marchantiophyta e Bryophyta dos manguezais e as registradas em florestas de encosta do estado de São Paulo (VISNADI, 2008). Tais evidências reforçam a conectividade ecológica e biogeográfica entre os manguezais e a vegetação de montanha, compondo um mosaico de ecossistemas interdependentes que caracteriza a paisagem costeira associada aos mangues do litoral paulista como observado na Figura 8.

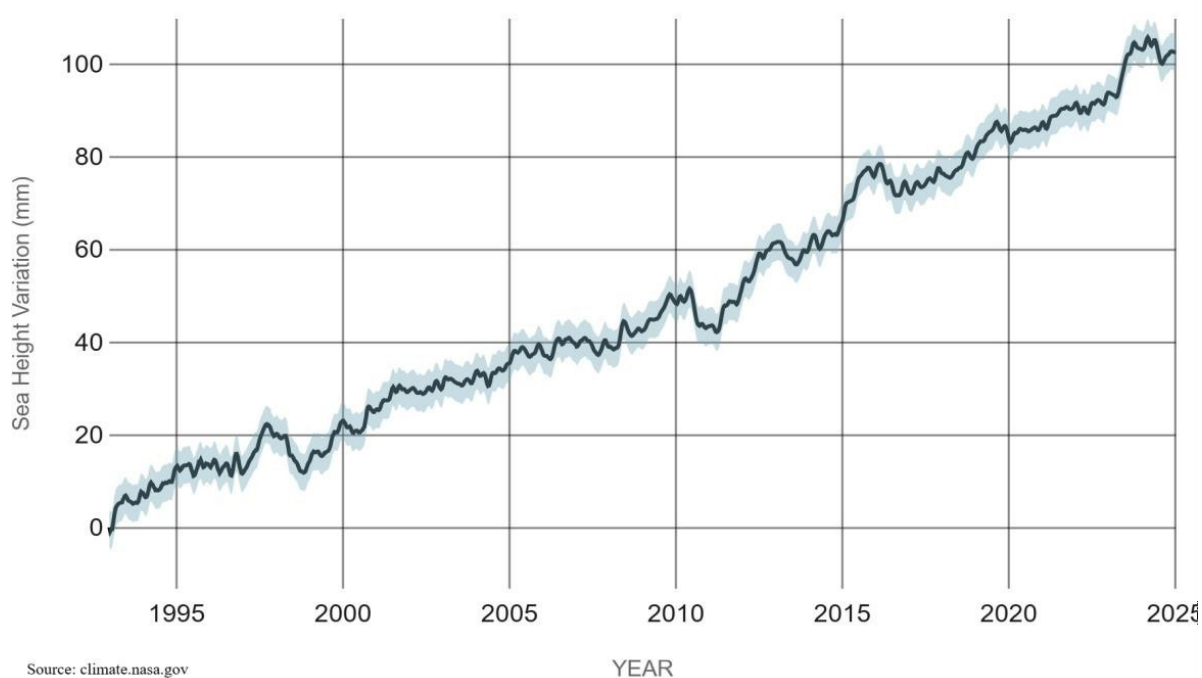


Fonte: Amaral (2003), (modificado de Grinrod, 1988).

4. METODOLOGIA

A presente pesquisa adotou uma abordagem quantitativa, fundamentada na aplicação de métodos numéricos e ferramentas de geoprocessamento para análise espacial e temporal. O delineamento metodológico baseia-se inicialmente no trabalho de Silva (2022), servido como referência analítica dos dados utilizados.

As investigações sobre o avanço do nível do mar foram conduzidas por meio do processamento de séries históricas de dados altimétricos oceânicos como exposto na Figura 9, obtidos a partir de missões espaciais dedicadas à medição precisa da topografia da superfície do mar, incluindo as missões TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e Jason-3. Os conjuntos de dados utilizados são provenientes do *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC, 2025), o qual disponibiliza registros consolidados e validados para análises de variação do nível médio dos oceanos em escala global.



Fonte: NASA (2024).

Para monitorar mudanças no nível eustático global, utilizam-se dados de altimetria de satélites, cuja técnica se baseia na determinação do semieixo maior da órbita por sistemas de rastreamento de alta precisão (erro inferior a 1 cm). A diferença entre esse valor e a altura média global medida pelo

altímetro representa o nível do mar, permitindo identificar tanto derivas instrumentais quanto variações reais no volume oceânico.

A obtenção desses dados é essencial para a modelagem geoespacial de zonas costeiras sob o risco de inundação. As simulações desta pesquisa utilizam projeções do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2021), especialmente do Grupo de trabalho I, baseadas em cinco Cenários Socioeconômicos Compartilhados (SSPs), que variam de emissões reduzidas (SSP1-1.9) a altas emissões (SSP5-8.5). Essas projeções referenciadas ao período 1995-2014, consideram fatores como expansão térmica, dinâmica oceânica, perda de massa de geleiras e mantos de gelo, com incertezas expressas por intervalos de probabilidade $\geq 66\%$, são observados na Tabela 2.

Os dados globais de satélite e modelos climáticos permitem simular cenários futuros de avanço do mar até 2100, considerando aumentos de temperatura média global entre 1,5° e 5 °C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2022).

Através da ferramenta Data Analysis Tool 2.0 do portal *Sea Level Change*, foram observados e extraídos de os dados históricos de altimetria marítima. Os dados foram então tratados em software de planilha digital com o método dos mínimos quadrados, adaptado para a análise de séries temporais, permitindo definir funções de regressão linear, logarítmica e polinomial descritos detalhadamente na sessão 4.1 que melhor representam o comportamento das variáveis ao longo do tempo.

A comparação com previsões de subida eustáticas indicadas pelos SSPs em relação a acurácia das projeções obtidas pelo presente estudo, subsidiou a base numérica para construção dos modelos cartográficos de elevação do nível do mar.

Utilizou-se o software ArcGIS Pro para elaboração modelos cartográficos, visando ilustrar os efeitos da elevação eustática sobre a região de estudo a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Esses modelos foram derivados de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) a partir da construção de um mosaico com as folhas (23S465_ZN, 23S48_ZN), disponibilizados pelo projeto TOPODATA (2008), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que aprimora a resolução espacial dos dados SRTM originais para aplicações ambientais e geográficas no território brasileiro (VALERIANO & ROSSETTI, 2012).

Com a confecção de um Mapa Hipsométrico de precisão de 30 m por pixel baseado nos dados supracitados, foi possível identificar e remover áreas de

altimetria $\leq 0 \text{ m}$ por meio da seleção deste intervalo a partir de funções para o processamento de imagens *Raster* disponíveis no software ArcGIS Pro, a fim de representar toda zona acima da linha do nível do mar.

O *layer* representativo da elevação eustática ao nível previsto, foi confeccionado com base no Mapa Hipsométrico com elevação já adequada, foram selecionadas as células altimétricas que atendessem a condição da previsão, através de funções disponíveis para seleção de um intervalo $\leq 1,02 \text{ m}$.

Com base nesses produtos, é possível observar possíveis impactos do avanço no nível do mar sobre ecossistemas vulneráveis e patrimônio cultural natural. Zonas de interesse foram então delimitadas a partir da identificação destes aspectos, buscando evidenciar a sobreposição da elevação prevista sobre áreas de valor socioeconômico, como a baía do Porto de Santos e áreas de concentração de ecossistemas de manguezal e conteúdo paleontológico, além de zonas urbanas com maior área afetada.

4.1 Fundamentação do Método Numérico

Este estudo adotou o método dos mínimos quadrados, amplamente utilizado em análises estatísticas, como ferramenta principal para projeções do comportamento do nível do mar a partir de séries temporais históricas, o método em questão é aplicado em situações em que a variabilidade dos dados não seguem um padrão que possa ser englobado diretamente em apenas uma função, procurando encontrar um ajuste que seja capaz de observar um índice de tendências, a partir da minimização das somas dos quadrados do erro.

A técnica foi aplicada na forma de ajustes de funções de regressão linear, logarítmica e polinomial de segunda ordem, a fim de que representem o comportamento das variações do nível do mar nas últimas décadas. O objetivo é minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os estimados a partir das funções ajustadas¹ de Silva (2022), com a adição do método polinomial.

De acordo com os modelos de Franco (2006) o método em questão consiste na aproximação de uma função $y = f(x)$, real de variável também real, a partir de uma função $G(x)$ que seja uma combinação linear de funções conhecidas posteriormente, segundo o seguinte exemplo:

$$f(x) \cong a_0 \cdot g_0(x) + a_1 \cdot g_1(x) + \dots + a_n \cdot g_n(x)$$

Dessa forma, a distância entre $f(x)$ e $G(x)$ encontrada será a menor possível, sendo indicada a troca da função $f(x)$ por $G(x)$ quando a função passa a oferecer inconvenientes como os seguintes casos:

a) $f(x)$ é definida através de processos não finitos como integrais, soma de séries e etc.

b) $f(x)$ é conhecida através de pares de pontos obtidos em experimentos e é preferível que seja substituída por uma função de gráfico ajustado aos pontos observados.

¹ As equações das funções aqui explicitadas foram retiradas de Silva (2022).

4.1.1 Ajuste Linear

A função de ajuste linear é vista como a mais simplória, indicada para dados com de caráter já linear, com variabilidades constantes, útil para relações diretamente proporcionais, segue a fórmula do seguinte tipo:

$$G(x) = a(x) + b$$

Onde os coeficientes a e b são determinados por um sistema de equações que minimiza o erro quadrático:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$$

Esse procedimento também pode ser estendido para funções polinomiais de ordem superior, quando necessário para representar padrões não lineares detectados nas séries climáticas (Dubois et al., 2024).

No ponto mínimo, as derivadas parciais do erro mínimo em relação a a e b são nulas, de tal forma que:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \text{ e } \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

Derivando em relação a a , temos a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= \frac{\partial}{\partial a} \sum (y_i - ax_i - b)^2 = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= 2 \sum (y_i - ax_i - b) \cdot (-x_i) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= -2 \sum x_i y_i + 2a \sum x_i^2 + 2b \sum x_i = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= -\sum x_i y_i + a \sum x_i^2 + b \sum x_i = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

Derivando em relação a b , temos a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b} &= \frac{\partial}{\partial b} \sum (y_i - ax_i - b)^2 = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= 2 \sum (y_i - ax_i - b) \cdot (-1) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial a} &= \sum y_i - a \sum x_i - \sum b = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial A} &= \sum y_i + a \sum x_i - nb = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial A} &= a \sum x_i - nb = \sum y_i \quad (2)\end{aligned}$$

Com as seguintes equações é possível formar um sistema linear:

$$\{a \sum x^2 + b \sum x = \sum xy \quad (1) \quad \sum x + nb = \sum y \quad (2)\}$$

Isolando **b** em (2), teremos a seguinte equação:

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) em (1), podemos obter o seguinte valor para **a** utilizando os dados tabelados:

$$\frac{\partial E}{\partial A} = \frac{\partial \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4)$$

Assim, isolando **a** em (2):

$$a = \frac{\sum y - nb}{\sum x} \quad (5)$$

A partir da substituição da equação (5) em (1), obtemos o valor de **b** da equação, utilizando apenas dados tabelados:

$$b = \frac{\sum x \sum xy - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad (6)$$

4.1.2 Ajuste Logarítmico

A função de ajuste logarítmico, é amplamente utilizada em dados de crescimento inicial constante, seguidos por uma desaceleração, indicando uma estabilidade da série analisada, para o ajuste em questão utiliza-se a seguinte fórmula:

$$G(x) = a \cdot \ln(x) + b$$

Por apresentar similaridade a função pertencente ao caso linear, a partir da substituição do x por $LN(x)$, buscando determinar os coeficientes de a e b foi feita a partir de uma pequena adaptação das equações (4) e (6) para chegarmos as respectivas equações:

$$a = n \frac{\sum \ln(x) \cdot y - \sum \ln(x) \sum y}{\sum \ln(x)^2 Z - [\sum \ln(x)]^2 Z}$$

$$b = \frac{n \sum \ln(x) \sum y - \sum \ln(x) \sum y \sum \ln(x) Z}{[\sum \ln(x)]^2 Z - n \sum \ln(x) Z} \quad (8)$$

4.1.3 Ajuste Polinomial De Segunda Ordem

A fim de obter uma representação de padrões não lineares de maior complexidade com variações suaves, o ajuste de função polinomial de 2ª ordem capta curvaturas de menor variabilidade, a aplicabilidade de modelos polinomiais de segunda ordem pode também criar curvaturas artificiais e dificultar a interpretação, a partir da seguinte fórmula:

$$G(x) = a \cdot x^2 Z + b \cdot x + c$$

Neste caso, busca-se minimizar o erro quadrático total definido como:

$$E = \sum (y_i - a \cdot x_i^2 - b \cdot x_i - c)^2 Z$$

As derivadas parciais em relação a a , b e c são anuladas, resultando no seguinte sistema de equações normais:

$$\begin{aligned} a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 &= \sum x_i^2 y_i \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i &= \sum x_i y_i \\ a \sum x_i^2 + b \sum x_i + n \cdot c &= \sum y_i \end{aligned}$$

A resolução do sistema permite estimar os coeficientes a , b e c utilizando os valores obtidos dos somatórios. Esse modelo é particularmente eficiente para séries temporais climáticas que apresentam tendências não lineares de acordo com Dubois

et al (2024).

4.1.4 Coeficiente De Determinação

O coeficiente de determinação será utilizado para mensurar a qualidade apresentada pelo ajuste, a fim de identificar se ele se encontra dentro dos limites aceitáveis de precisão, é necessário fazer a determinação desse coeficiente da seguinte maneira:

$$R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{total}}$$

De maneira que a soma dos quadrados dos desvios relacionados a regressão (SQ_{reg}) é igual à soma dos quadrados dos desvios relacionados a regressão (y') podem ser indicados pelas respectivas equações:

$$SQ_{reg} = \sum (G(x) - y'_2)^2$$

$$SQ_{total} = \sum (y - y')$$

$$y' = \sum_{y \ n}$$

O valor encontrado fica entre os intervalos de $0 \leq R^2 \leq 1$, considerando ajustes ruins aqueles onde R^2 for mais próximo de 0, enquanto ajustes mais próximos de 1 são considerados bons ajustes.

4.2 Aplicação Em Dados Climáticos Históricos

Na seção metodológica do artigo de Dubois et al. (2024), os autores propõem uma abordagem para estender séries temporais curtas de marégrafos, visando melhorar a estimativa de níveis extremos do mar. Eles compararam dois métodos: regressão linear e aprendizado de máquina por meio de *random forest*. Ambos os métodos são aplicados a estações localizadas na Bacia de Kattegat, entre Dinamarca e Suécia.

Os resultados indicam que ambos os métodos fornecem estimativas razoáveis, com o método de aprendizado de máquina apresentando melhor

desempenho na reconstrução de extremos observados. A geração de séries temporais estocásticas, refletindo estimativas de incerteza do modelo de aprendizado de máquina, seguida pela estimativa dos níveis de retorno usando teoria de valores extremos, demonstra que a dispersão nos níveis de retorno está de acordo com resultados obtidos por métodos mais baseados em física.

Essa metodologia é particularmente relevante para regiões costeiras com séries históricas limitadas, como o litoral paulista. A aplicação de técnicas estatísticas para estender registros de marégrafos pode aprimorar a identificação de zonas suscetíveis a inundações nas próximas décadas. Ao utilizar dados de estações vizinhas e métodos como regressão linear e aprendizado de máquina, é possível melhorar a precisão das estimativas de níveis extremos do mar, contribuindo para o planejamento costeiro e a mitigação de riscos associados à elevação do nível do mar, entretanto, devido à baixa disponibilidade de dados de marégrafos regionalmente para melhor representação dos dados relativos a maior área costeira, não foram utilizados dados relacionados a marégrafos na zona competente a este estudo.

O grau de aderência dos modelos será avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), e as projeções serão comparadas às simulações climáticas desenvolvidas pelo IPCC (2021) expostos na Tabela 2.

A partir dos coeficientes de determinação (R^2), será possível avaliar a qualidade dos ajustes realizados e inferir a confiabilidade dos modelos. Este procedimento busca garantir robustez estatística às projeções, assegurando que estas estejam alinhadas com as evidências de modelos climáticos globais.

Para a modelagem espacial da variação do nível do mar e simulação de cenários de avanço eustático na zona costeira do litoral paulista, foram utilizados dados derivados de satélites altimétricos por meio do conjunto *NASA-SSH Simple Gridded Sea Surface Height from Standardized Reference Missions Only – Version 1*, disponibilizado pelo *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC) da NASA/JPL. Este *dataset* fornece mapas bidimensionais das anomalias da altura da superfície do mar (*Sea Surface Height Anomaly – SSHA*), produzidos a partir de observações das principais missões altimétricas de referência, incluindo *TOPEX/Poseidon*, *Jason-1*, *Jason-2*, *Jason-3* e *Sentinel-6*. Os dados têm abrangência global, com resolução de $0,5^\circ$ em latitude e longitude, e periodicidade semanal, cobrindo o intervalo temporal de outubro de 1992 até o presente. Cada

grade espacial é construída a partir da média ponderada (função gaussiana com raio de 100 km) de observações distribuídas ao longo de 10 dias, permitindo interpolação temporal contínua, mesmo com certa sobreposição de dados entre grades consecutivas.

No presente estudo, as grades altimétricas foram recortadas geograficamente para a área costeira do estado de São Paulo, e integradas ao ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) por meio da conversão dos arquivos netCDF-4 para o formato *raster* compatível com plataformas como ArcGIS Pro. As anomalias de nível do mar foram então ajustadas a um datum geoidal comum e aplicadas como camadas de entrada para o MDE obtido via dados topográficos *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), a fim de simular a expansão do mar sob diferentes projeções de elevação média global do nível do mar previstas pelo IPCC até o ano de 2100. Esse procedimento permitiu identificar áreas de baixa altitude com potencial de inundação permanente sob distintos cenários climáticos (ex.: SSP2-4.5 e SSP5-8.5), permitindo avaliar a vulnerabilidade geomorfológica de segmentos costeiros densamente urbanizados e ecologicamente sensíveis.

Para a realização das projeções, foram utilizados os dados de altimetria oceânica, proveniente das missões *TOPEX/Poseidon*, *Jason-1*, *Jason-2* e *Jason-3*, organizados e disponibilizados pelo portal *Sea Level Change* da NASA, por meio da ferramenta *Data Analysis Tool 2.0/NASA* (2024) com a área de aquisição competente a zona costeira dos municípios alvos do estudo. Os dados foram tratados inicialmente no software de tabelas digitais Excel 2020 utilizando regressão linear para modelar a tendência de elevação do nível do mar, e posteriormente validados com base nas projeções do IPCC (2022).

4.3 Aplicação Do Método

No presente estudo foi trabalhado através dos pares de dados obtidos pelos observatórios da NASA, estabelecendo uma função $G(x)$ onde o gráfico se ajusta aos pontos observados utilizando os métodos numéricos de coeficiente linear, logarítmico e polinomial para determinar os valores dos coeficientes das retas e estabelecer as funções de ajuste analisadas a partir de seus coeficientes de determinação. Os cálculos foram executados utilizando o Software Excel 2020, com uma rotina de cálculo padronizada para cada caso. A máquina utilizada nesse

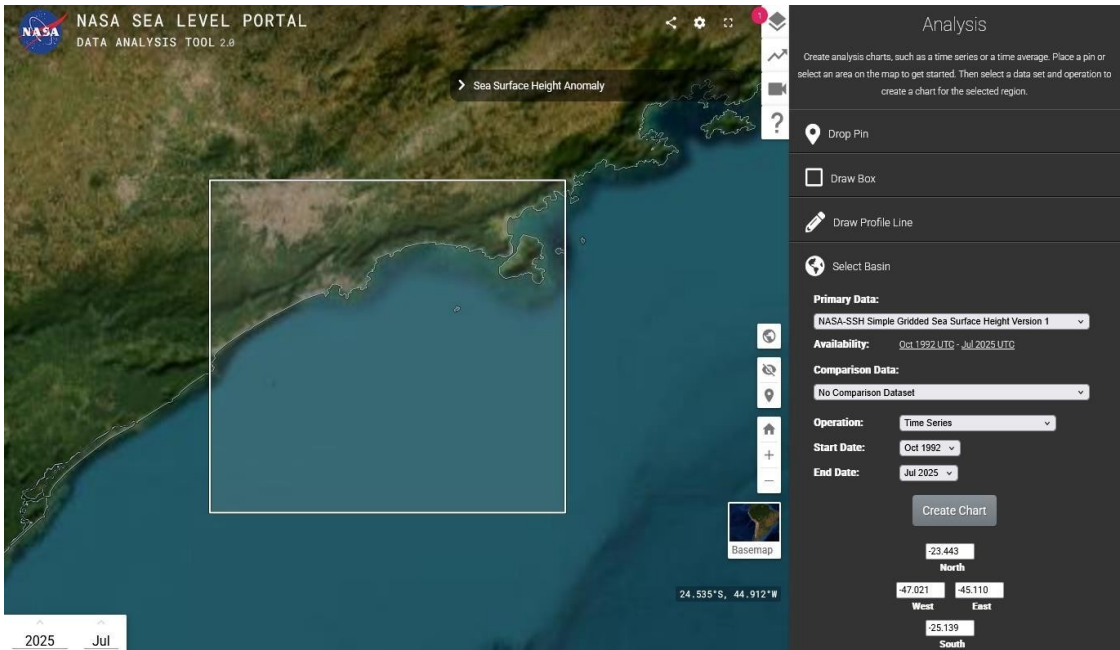
processo foi um Notebook Samsung Essentials 11, com um processador Intel Core i5 e o sistema operacional Windows 10 Pro. Nesse mesmo processo foram feitas as estimativas para os cenários futuros dos próximos 75 anos com o alvo do ano de 2100, utilizando as funções de ajustes encontradas pelos métodos citados anteriormente.

4.4 Origem Dos Dados

O conjunto de dados *NASA-SSH Simple Gridded Sea Surface Height from Standardized Reference Missions Only – Version 1*, disponibilizado pela NASA, fornece mapas bidimensionais de anomalia da altura da superfície do mar (ou nível do mar) com periodicidade de sete dias. Essas grades são derivadas de observações obtidas por altímetros de radar instalados em satélites das missões de referência, incluindo *TOPEX/Poseidon*, a série *Jason* e o *Sentinel-6*. Os registros iniciam-se em outubro de 1992 e permanecem disponíveis até o presente, sendo elaborados a partir do conjunto de dados *NASA-SSH Along-Track Sea Surface Height from Standardized Reference Missions – Version 1*.

Cada grade é composta por aproximadamente dez dias de observações, o que corresponde a um ciclo completo de repetição das missões de referência. Os dados são interpolados em uma malha regular de latitude e longitude com resolução de 0,5°, utilizando uma média espacial ponderada gaussiana com largura de 100 km. Apesar de disponibilizadas em intervalos de sete dias, as grades são construídas a partir de dez dias de dados, o que implica em sobreposição parcial entre passos temporais consecutivos.

A coleta de dados primários, foi feita a partir do conjunto disposto na opção *NASA-SSH (Sea Surface Height) Simple Gridded SSH V.1* do portal *Sea level Change*, com disponibilidade de dados datando de Outubro de 1992 a Julho de 2025. Os pontos relacionados à formação dos vértices da caixa de coleta de dados correspondem à: *North -23.456*, *South -25.209*, *West -46.964*, *East -45.053*, indicado na zona de aquisição da Figura 10, com a média anual obtida pelo processamento dos dados, exposta na Tabela 1.



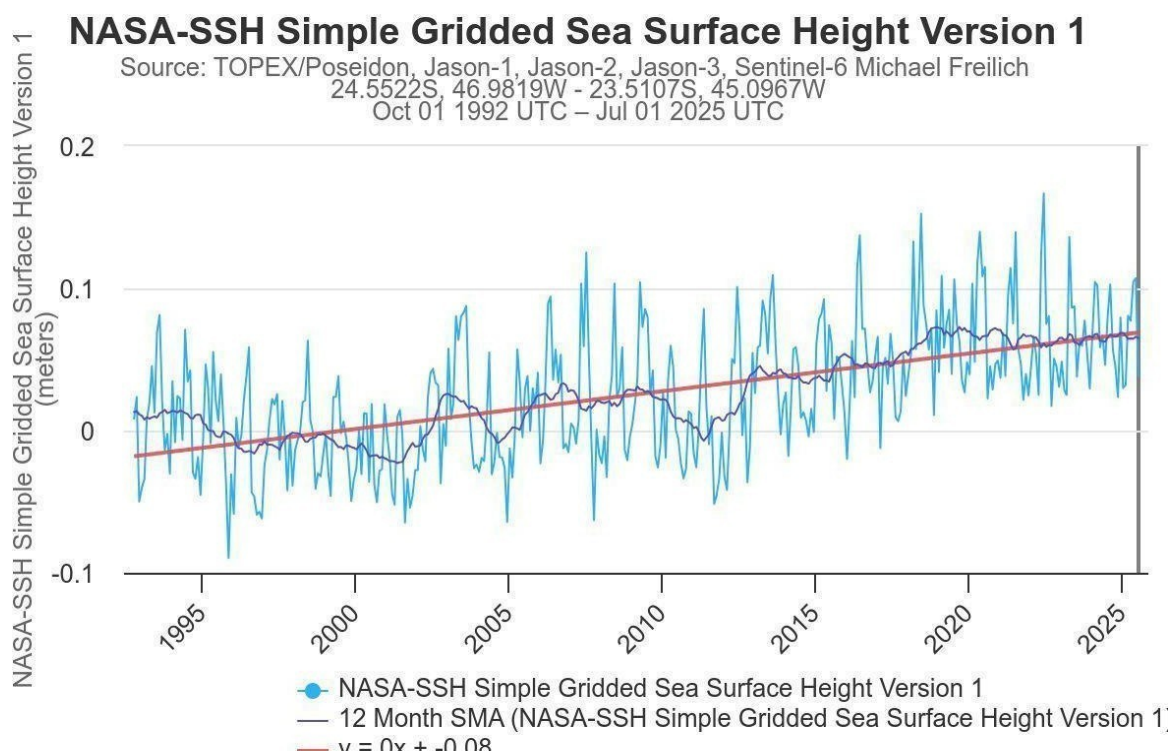
Fonte: *Data Analysis Tool 2.0 (Sea Level Change, Nasa, 2025).*

Foram obtidos através da mesma ferramenta, gráfico representativo dos dados referentes à área selecionada na Figura 11, por meio da função “*create chart*” utilizando as funções que identificam as linhas de tendência, polinomial e linear, e a média mensal, servindo de base para projeções futuras.

Tabela 2: Valores médios anuais de elevação eustática na zona de estudo obtidos a partir da média anual (1994-2024)

Ano	Nível médio do mar (mm)	Ano	Nível médio do mar (mm)	Ano	Nível médio do mar (mm)	Ano	Nível médio do mar (mm)
1993	0,012215464	2001	-0,012215464	2009	0,035265137	2017	0,035017661
1994	0,011051337	2002	0,006904031	2010	0,007386757	2018	0,075839448
1995	0,003890838	2003	0,036728829	2011	-0,000719934	2019	0,064040752
1996	-0,018352836	2004	-0,015130936	2012	0,019171649	2020	0,071510519
1997	-0,002883743	2005	0,016634097	2013	0,0569861	2021	0,063465494
1998	-0,003220729	2006	0,029103485	2014	0,019507341	2022	0,064786304
1999	-0,008057533	2007	0,022942307	2015	0,05347969	2023	0,061051699
2000	-0,013882208	2008	0,015666443	2016	0,053542468	2024	0,70172374

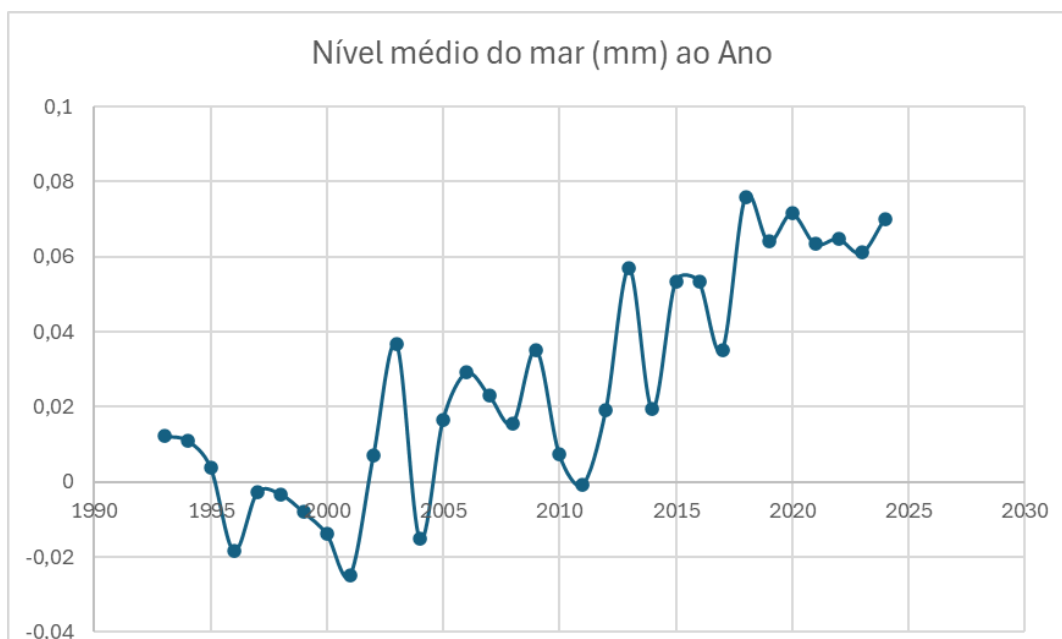
Fonte: Autoral, 2025.



Fonte: *Sea Level Change* (2025)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da coleta de dados de satélite fornecidos pela NASA, os valores da elevação média do mar para o período de 1993 a 2025 foram processados. As observações originais, distribuídas em séries de 36 ou 37 medições anuais, foram condensadas nas médias de cada ano. É importante notar que as observações referentes aos anos de 1992 e 2025 foram descartadas por não completarem o ciclo mínimo de 36 observações. Os dados médios anuais resultantes, utilizados para as simulações e análises subsequentes, estão detalhados no gráfico da Figura 12.



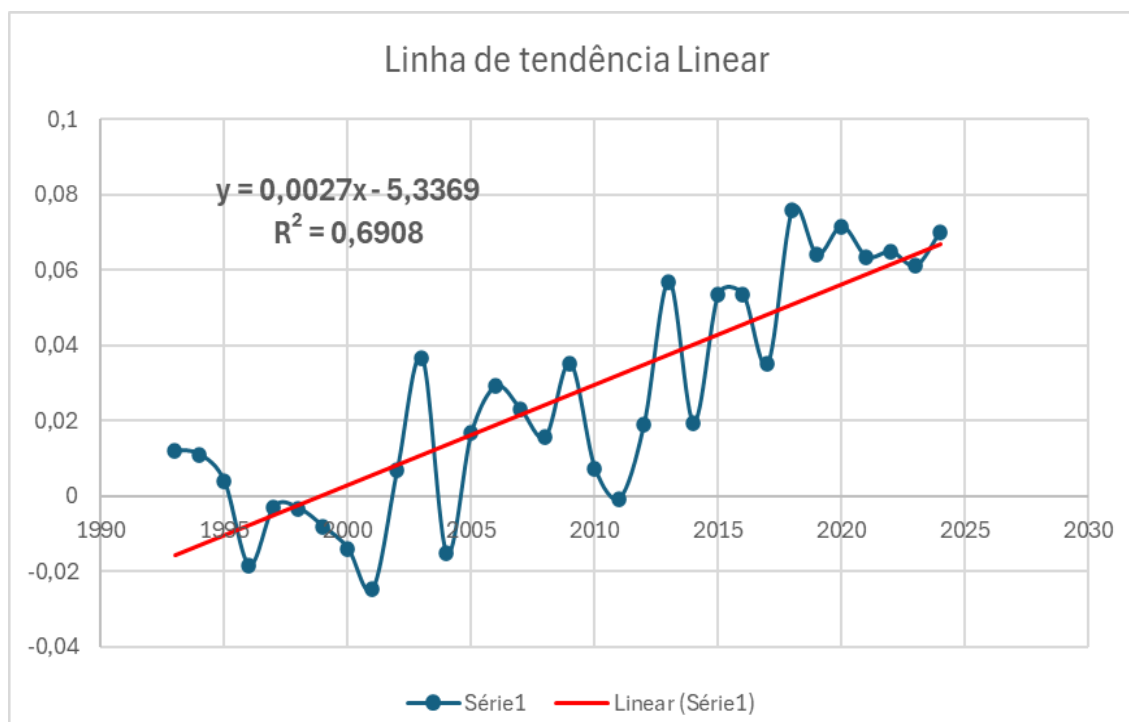
Fonte: Autoral, 2025.

5.1 Ajuste Linear

A função de ajuste encontrada para o caso linear foi:

$$G(x) = 0,0027X - 5,3369.$$

Apresentando coeficiente de determinação de $R^2=0,6908$, representativo de um ajuste de precisão moderada. Os resultados obtidos para as previsões de elevação eustática para o ano de 2100 a partir deste método foram de cerca de 0,26m, indicados no gráfico da Figura 13.



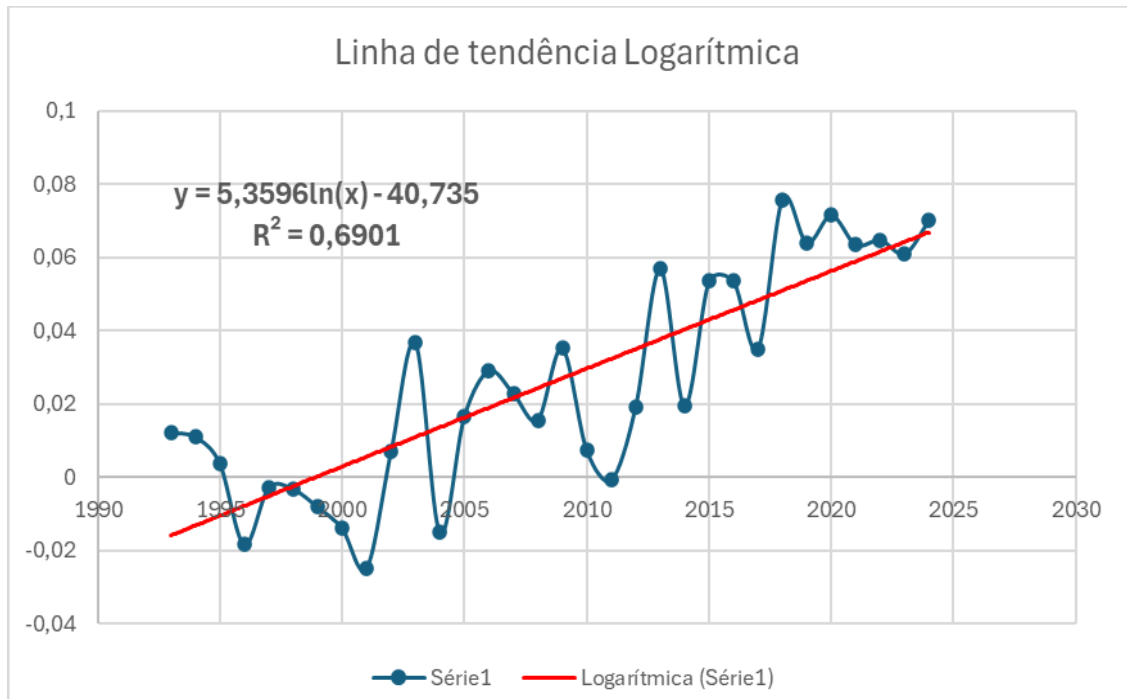
Fonte: Autoral, 2025

5.2 Ajuste Logarítmico

A função de ajuste encontrada para o caso linear foi:

$$G(x) = 5,3596 \ln(x) - 40,735$$

Apresentando coeficiente de determinação de $R^2=0,6908$ representativo de um ajuste de precisão moderada. Previsões feitas a partir desta função de ajuste indicam uma elevação eustática com cerca de 0,255m até o ano de 2100, conforme o gráfico da Figura 14.



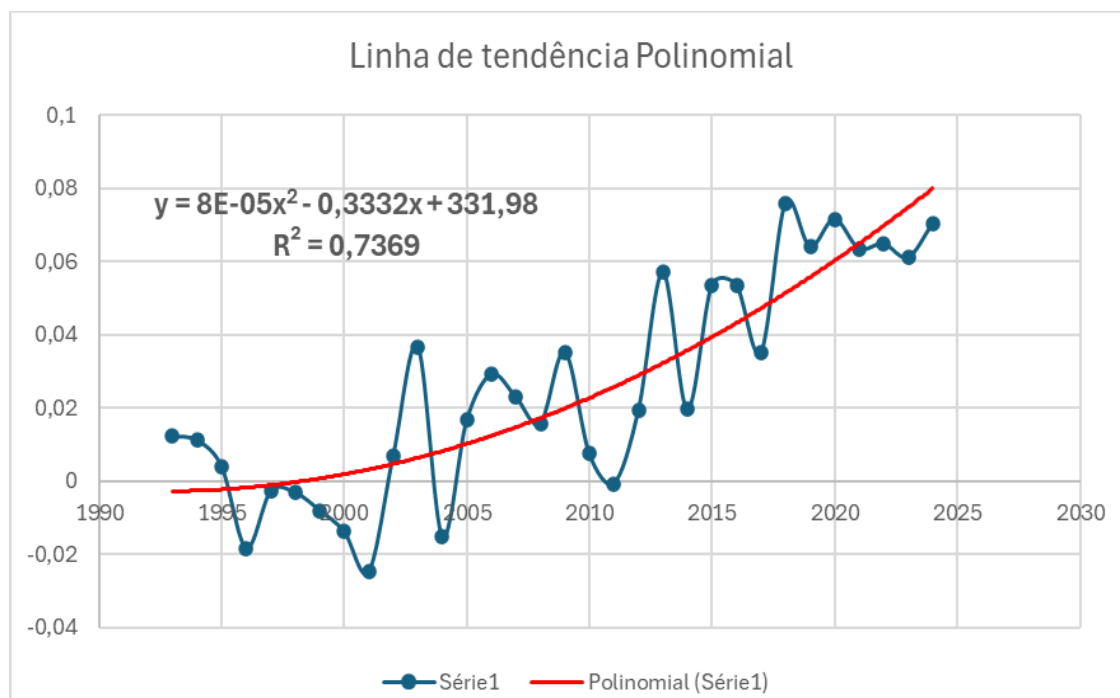
Fonte: Autoral, 2025.

5.3 Ajuste Polinomial de Segunda Ordem

A função de ajuste encontrada para o caso linear foi:

$$G(x) = 8E - 05x^2 - 0,3332x + 331,98$$

Apresentando coeficiente de determinação de $R^2 = 0,7369$ representativo de um ajuste de precisão moderada. Previsões feitas a partir desta função de ajuste indicam uma elevação eustática com cerca de 0,98 metro até o ano de 2100, apresentadas no gráfico da Figura 15.



Fonte: Autoral, 2025.

5.4 Comparação

Para uma melhor análise das estimativas, foram feitas comparações com as estimativas do IPCC (2022) Capítulo 3 - Oceanos e Ecossistemas Costeiros e Seus Serviços. Essas estimativas são baseadas em cenários otimistas e pessimistas que consideram a adequação da sociedade global moderna a práticas de redução de emissões de carbono e consequente efeito sobre a dinâmica climática global, os modelos simulam os sistemas climáticos em dois cenários; de alta emissão (SSP3-7,0 e SSP5-8,5), um cenário de emissões intermediárias (SSP2-4,5) e dois cenários de baixa emissão (SSP1-1,9 e SSP1-2,6) e possível elevação do nível do mar até 2100 para os respectivos cenários dispostos na Tabela 2.

Os resultados obtidos pelos métodos linear, logarítmico e polinomial, pertinentes a este estudo expostos na Tabela 3, para comparação entre os dados em questão.

Tabela 3: Cenários previstos pelo relatório do IPCC (2022) através do cenários SSPs de elevação média do nível do mar até 2100.

Cenário	Aumento Médio Global do Nível do Mar até 2100 (em m)
SSP1-1,9 0,28	0,55
SSP1-2,6 0,33	0,61
SSP2-4,5 0,44	0,76
SSP3-7,0 0,55	0,90
SSP5-8,5 0,63	1,02

Fonte: IPCC (2022) Capítulo 3 - Oceanos e Ecossistemas Costeiros e Seus Serviços.

Tabela 4: Cenários previstos de elevação médio do nível do mar até 2100 pelos métodos utilizados.

Método de previsão	Elevação Prevista até 2100 (em m)	Coeficiente de Precisão (R²)
Linear	0,265	0,6908
Logarítmico	0,255	0,6901
Polinomial	0,985	0,7369

Fonte: Autoral, 2025.

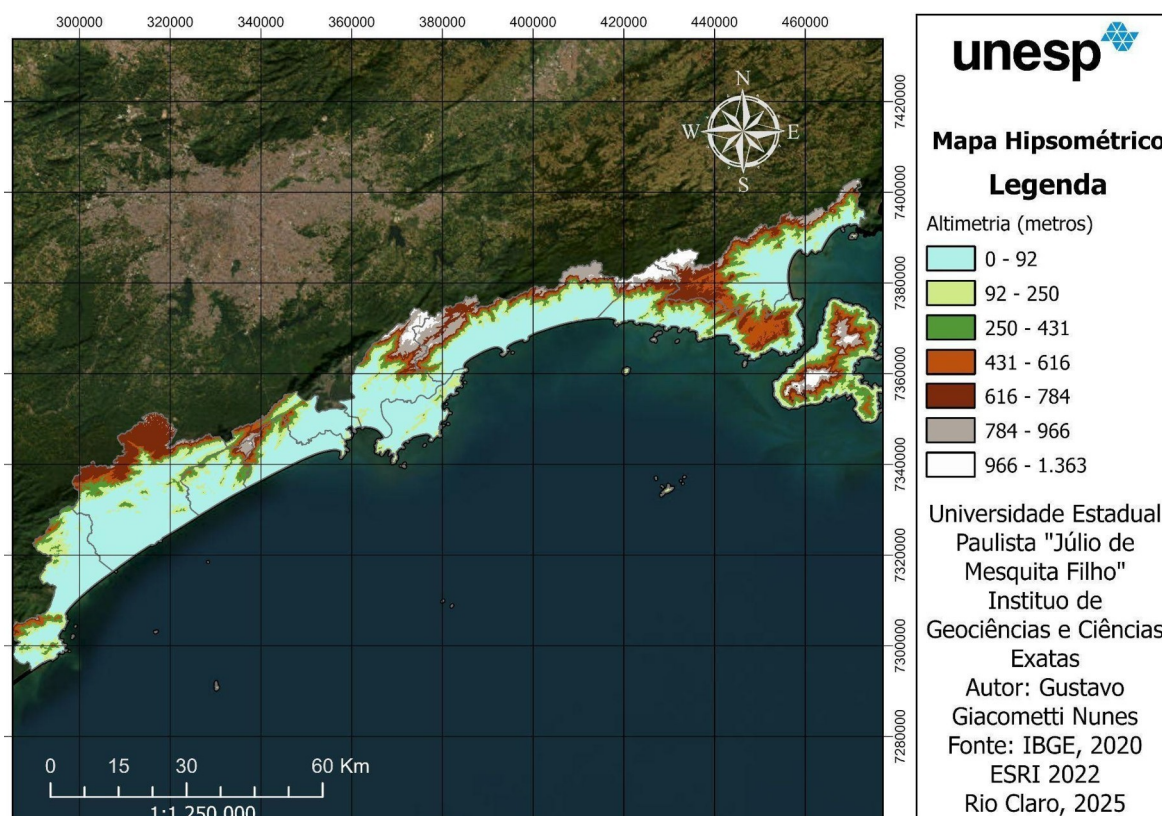
Podemos observar que as estimativas feitas no presente trabalho estão em sua maioria fora dos intervalos previstos pelos cenários SPPs, tanto no cenário mais otimista (SPP1-1,9) que prevê um aumento com cerca de 0,55 m, as estimativas do caso linear e logarítmica encontram-se abaixo dessa estimativa com apenas 0,265 m e 0,255 m respectivamente, apresentando um coeficiente de precisão com apenas 69% em ambos casos, tendo sido considerados insatisfatórios para um modelo representativo cartográfico da elevação do nível do mar para o presente trabalho, já no cenário mais pessimista (SSP5-8,5) é apontado uma subida no nível médio de 1,02 m, o resultado obtido pelos métodos aplicados que mais se alinha com esta

estimativa é o ajuste de função polinomial com uma subida indicada de 0,98 m sendo a mais próxima do aumento médio observado pelo relatório do IPCC (2022).

A partir da comparação entre os resultados obtidos pelos métodos explicitados, para cada caso do estudo e os cenários evidenciados na Tabela 3, considerando o maior coeficiente de precisão alcançado ($R^2=0,73$) e menor diferença entre altimetria marítima projetada (0,04 m) entre o que é previsto como aumento de nível médio global do mar até 2100 para o caso polinomial de 0,98 m e o indicado pelo cenário mais pessimista (SPP5-8,5), foi escolhida a altimetria de 1,02 m para composição do modelo cartográfico de representação dos resultados, sendo esta a possível medida mais próxima do que pode representar os resultados obtidos pelo estudo.

5.5 Simulação De Elevação Eustática

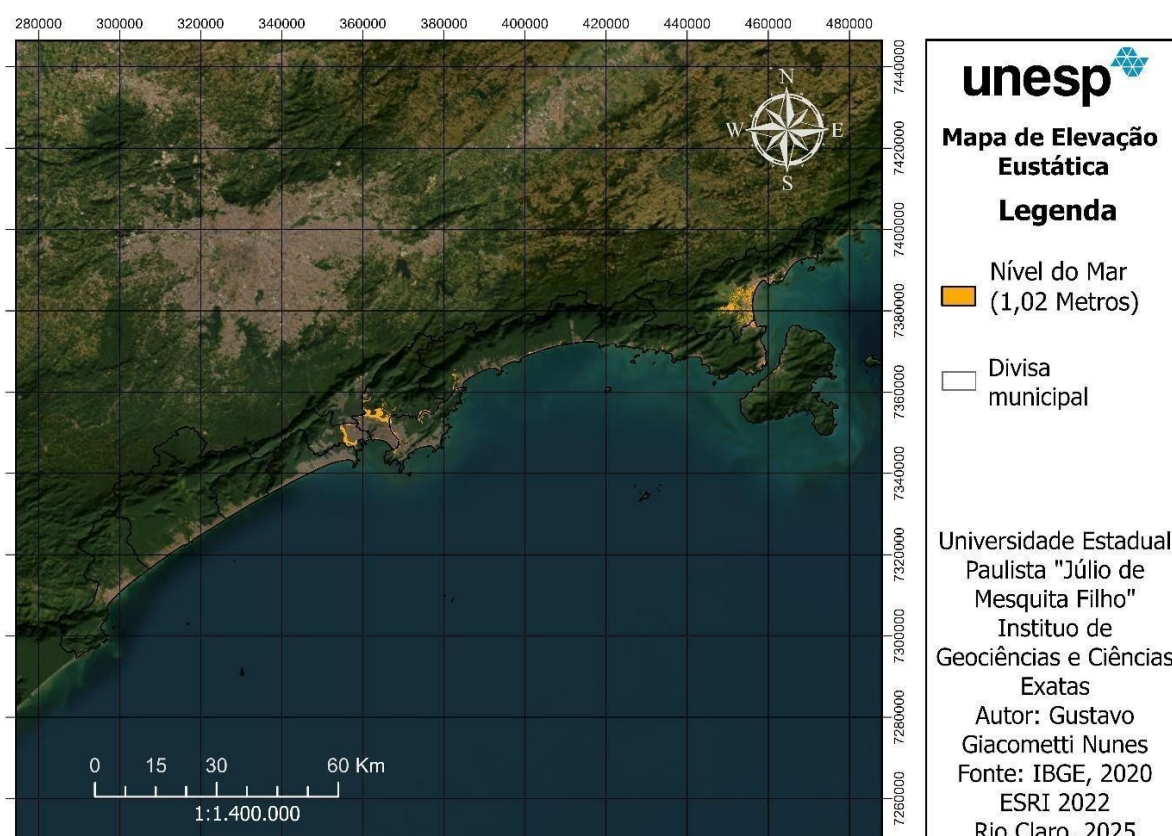
A produção de um mapa hipsométrico exposto na Figura 15 baseado em MDE disponibilizado pelo projeto TOPODATA (2008) formado por mosaico composto pelas cartas SRTM (23S465_ZN, 23S48_ZN), utilizando processos recomendados para produção de mapas hipsométricos de classificação em 7 classes representativas das faixas altimétricas do litoral paulista com precisão de 30 m por pixel, foi possível observar grande variabilidade altimétrica, relacionada ao contexto geológico regional da Serra do Mar, dando base para confecção de um mapa de elevação eustática.



Fonte: Autoral, 2025.

5.5.1 Mapa De Elevação Eustática

A partir das camadas representativas da variação altimétrica, foram utilizadas técnicas de geoprocessamento para eliminação de altitudes $\leq 1,02$ metros, escolhida por meio dos resultados de comparação de coeficientes de precisão obtidos pela aplicação de métodos numéricos aos dados primários, projetando uma camada representativa da subida do nível do mar que comporta a zona de costa dos municípios contidos na área de estudo exposto na Figura 16.



Fonte: Autoral, 2025.

O *layer* é representativo da elevação eustática de altitude marítima de 1,02m acima da média atual, relativa à altimetria prevista no cenário SSP5-8,5. Esse cenário foi escolhido devido à maior proximidade com a previsão de elevação do nível do mar para o ano de 2100 através do método polinomial de previsão para 75 períodos (anos), considerado como o de maior precisão (73%) indicando 0,98 m de subida na média do nível do mar, valor mais aproximado do cenário pessimista.

A partir desse modelo, foi analisada a zona afetada pela elevação eustática sobre os municípios componentes da área alvo deste estudo, sendo selecionadas duas áreas de interesse representativas de zonas de importância socioeconômica e ambiental, especialmente pela presença de ecossistemas vulneráveis, a área total coberta pela projeção contabiliza cerca de 92,975 Km².

Conforme indicados pela Lei nº 12.727/2012, que reafirma o compromisso soberano do Brasil com a preservação das suas florestas e demais formas de vegetação nativa, bem como da biodiversidade, do solo, dos recursos hídricos e da integridade do sistema climático, para o bem estar das gerações presentes e futuras.

Além disso, observa-se o avanço da linha de costa em quase toda a extensão

de praia analisada, com cobertura de cerca de 5 metros de extensão horizontal ao longo da faixa de areia de Praia Grande, Santos e Guarujá localmente sobre a praia de Pitangueiras, indicando a necessidade de análises mais detalhadas para determinação dos efeitos específicos em cada município, devido ao foco do presente estudo a ameaça a zona urbanizada e a ecossistemas mais sensíveis, não foi considerado continuar analisando apenas a linha projetada sobre as praias.

5.5.2 Zonas De Interesse

As zonas de interesse foram selecionadas baseando-se na influência do aumento do nível eustático sobre zonas de proteção ambiental como os ecossistemas de manguezal de importância socioeconômica e ambiental para região do litoral paulista central, assim como a sobreposição sobre áreas urbanas mais extensas, que contemplam tanto zonas residenciais, como portuárias e proeminentes para o desenvolvimento regional como o porto de Santos.

Com a maior área urbana atingida pela previsão de subida, o município de Caraguatatuba está em foco na segunda zona de interesse, devido a perda de área urbanizada com a invasão da linha de costa sobre grande parte da porção continental conectada à porção de praia do município.

5.5.2.1 Zona De Interesse 1

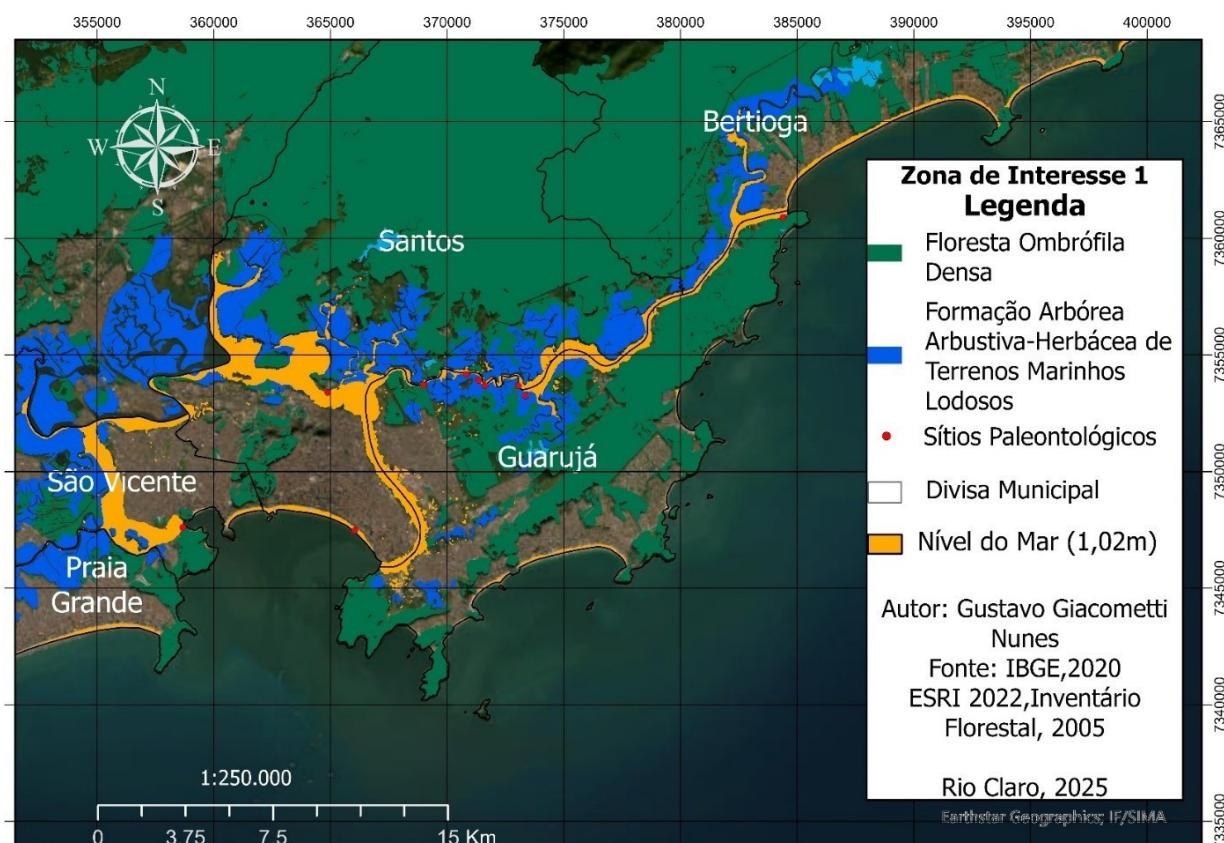
A zona de interesse 1 é composta pelos municípios de Santos, Praia Grande, São Vicente, Guarujá e Bertioga, todas integradas dentro do bioma de Mata Atlântica segundo as classificações de Biomas e Sistemas Costeiros do IBGE (2019).

De acordo com o relatório da CETESB (1991), a área reconhecida como Baixada Santista que inclui os municípios de Santos, Guarujá e Bertioga, compreende aproximadamente 1329 km², com 10% desse território (133 km²) sendo ocupados originalmente por manguezais.

Os bosques de manguezal afetados na região de estudo estão localizados sobre o que é caracterizado pelo Inventário Florestal (2005) como Formação Arbórea/Arbustiva-Herbácea de Terrenos Marinhos Lodosos na Figura 17.

A área observada pela zona de interesse em questão, considera que as margens de interface entre dos bosques pertencem as Ilha Piaçaguera, Ilha dos Bagres e Ilha do Barnabé de manguezal ao longo dos rios Piaçaguera e Pedreira

que deságuam na Baía de Santos, também observados por Jesus (2017) na Figura 6, pertencentes a margem norte da Ilha de São Vicente, podem sofrer grande impacto



Fonte: Autoral, 2025.

De acordo com a relação estabelecida pelo Quadro 3 de impactos previstos para diferentes aspectos das mudanças sobre ecossistemas de manguezal pertencentes a zona de interesse proposta no Diagnóstico Técnico – Produto 2 Meio Biótico APAM Litoral Centro (APAMLC) parte do Sistema Integrado de Gestão Ambiental (SIGAM, 2025), pode observar se zonas susceptíveis aos impactos listados como decorrentes do efeito do aumento do nível médio relativo do mar (NMRM), sendo a erosão das margens em direção ao mar, um dos aspectos mais preocupantes em questão, considerando que a intensidade dessa erosão deve depender diretamente da posição do bosque de mangue.

Quando consideramos a subida dos níveis eustáticos a 1,02 metros previstos na simulação em questão e observamos as zonas de interface referentes a

Formação Arbórea e a subida prevista, fica claro haver possível impacto em toda zona que permeia a subida no nível médio do mar, com efeitos diretos também sobre pontos de interesse paleontológico. O avanço das espécies terras adentro, pode ocorrer com espécies pertencentes aos bosques dispostos as margens dos rios afetados.

Além disso, um aumento de produção secundário decorrente da erosão, também pode apresentar problemas para o controle sedimentar da zona portuária, com a descarga de sedimentos sobre a baía de Santos, causando impacto econômico direto.

Tabela 5: Impactos previstos para aumento no NMRM

Perigo	Resposta prevista	Fatores atenuantes
Aumento do nível médio relativo do mar (NMRM)	Avanço das espécies terra adentro	A extensão do impacto na área dependerá enormemente do declive da área de entre marés pode ser limitado pela topografia e taxa de acreção; Taxa de restabelecimento das plantas vai depender da taxa de aumento do NMRM ; Mudança da composição das espécies com o aumento do NMRM pode favorecer espécies decrescimento rápido nas novas áreas.
	Erosão das margens em direção ao mar	Depende da posição do bosque de mangue no estuário ou costa
	Aumento de produção secundária devido à maior disponibilidade de nutrientes resultantes de erosão	Depende da taxa de erosão; mudança na diversidade de espécies graças ao aumento da taxa de entrada de nutrientes

Fonte: Diagnóstico Técnico – Produto 2 - APAMLC (2022).

Os ecossistemas em questão estão localizados principalmente na zona de interface entre a Formação Arbórea Arbustiva-Herbácea de Terrenos Marinhos lodosos e o a zona de projeção do nível do mar para 1,02 m, de maneira que, dependendo diretamente da relação entre as zonas de exposição intermitente ao domínio de maré, sejam afetadas pela mudança na altimetria marítima proposta pelo modelo produzido.

Dessa forma, podem ser afetados pela erosão de margens em direção ao mar, devido a posição dos bosques identificada por Jesus (2017) como posto na Figura 6 conforme a área competente ao modelo produzido por este trabalho.

O conteúdo cadastrado no Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão (SICG) pertencente ao IPHAN, coberto pelo modelo de elevação eustática para 1,02 metro indica 10 sítios arqueológicos listados no Quadro 4 e indicados na Figura 17, entre eles 5 Sambaquis pertencentes a zona de Bertioga entre outros sítios em São Vicente, Santos e Guarujá que devem ser submersos de acordo com as projeções do modelo proposto, também sendo afetados possivelmente por erosão local em direção ao mar.

Tabela 6: Identificação dos sítios paleontológicos afetados pela subida eustática projetada.

Identificação	Código IPHAN	Logradouro
Sambaqui Largo do Candinho 3	SP3518701BAST00007	Canal de Bertioga
Sambaqui Largo do Candinho	SP3518701BAST00006	Canal de Bertioga
Sambaqui Largo do Candinho 2	SP3518701BAST00005	Canal de Bertioga
Sambaqui Monte Cabreo 2	SP3518701BAST00004	Canal de Bertioga
Sambaqui Monte Cabreo	SP3518701BAST00003	Canal de Bertioga
Cruma	SP3518701BAST00002	Bairro Jardim Progresso
Armao	SP3518701BAST00001	Ilha de Santo Amaro
Sítio Submerso Ilha Barnabas	SP3548500BAST00002	Ilha Barnabas
Veleiro Kestrel	SP3548500BAST00001	Praia do Emparo
Remanescentes da Vila Colonial	SP3551009BAST00001	Avenida Tupiniquins

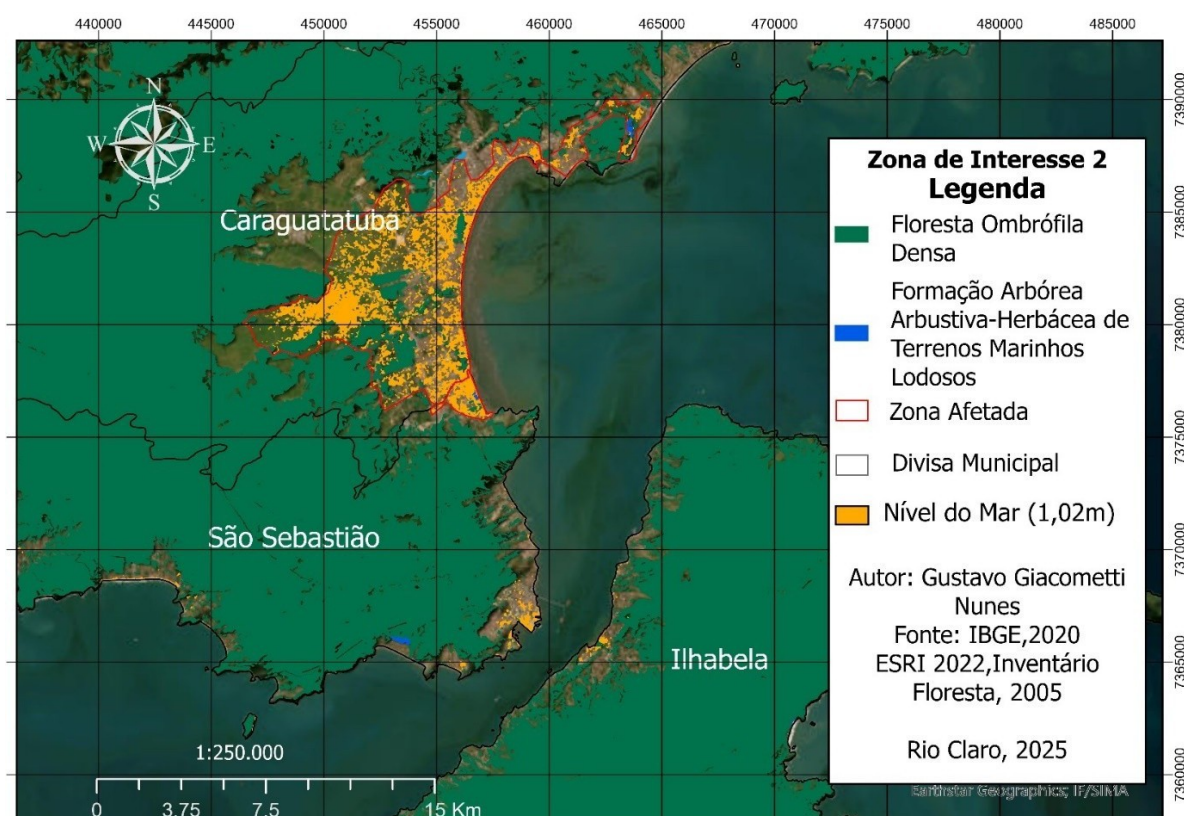
Fonte: Autoral, 2025.

5.5.2.2 Zona De Interesse 2

A segunda zona de interesse busca trazer foco à maior área urbanizada perdida na projeção de elevação eustática de 1,02 m como previsto pelo IPCC (2022) no município de Caraguatatuba com área afetada de cerca de 64 km² contabilizados pela área de alcance da previsão indicada pelo polígono de zona afe

tada.

Grande parte da área urbana e majoritariamente residencial da cidade deve ser coberta pelo avanço da linha de costa de acordo com o que é previsto pela projeção do avanço, conforme observado. O município de São Sebastião também deve sofrer com cerca de 2 km² de inundação da zona norte do município sendo invadida pela linha costa, com uma boa porção da Floresta Ombrófila Densa de acordo com o Inventário Florestal (2005) estabelecida na área do município de Caraguatatuba sendo afetada diretamente pela subida do nível do mar esperada para o ano de 2100 exposta na Figura 18. A zona de costa utilizada pela balsa de São Sebastião a Ilha Bela também deve ser afetada pela erosão costeira proveniente da subida projetada.



Fonte: Autoral, 2025.

A precisão dos métodos linear e logarítmico quando aplicados aos dados disponíveis de elevação marítima, podem ter sido possivelmente afetados pela baixa linearidade dos dados obtidos, conforme as classificações identificadas por Silva (2022); esse conjunto de projeções para o ano de 2100 (linear e

logarítmico) também não foi capaz de atingir a elevação marítima prevista por mesmo meio dos cenários SPP mais brandos de emissões consideradas, estabelecidos pelo relatório do IPCC (2022), o que foi considerado insatisfatório pelo presente estudo para futuras previsões.

Já precisão apontada pelos baixos coeficientes de determinação (R^2) dos métodos em questão, pode ter sido causada por diferentes motivos, um deles sendo o formato específico da costa, sendo muito mais aberta e extensa quando comparada a estudos anteriores que buscam prever os mesmos parâmetros no Brasil, como Silva (2022) com o litoral piauiense, bem como a zona escolhida para aquisição de dados, sendo possível que em uma menor área de aquisição de dados e através de projeção individual para zonas de interesse escolhidas, possa ser encontrado maiores níveis de precisão para áreas específicas direcionadas a estudos futuros, também indicando a necessidade de um maior número de testes com diferentes capturas para conclusões diretas sobre os métodos utilizados para composição das tabelas de previsão e seus respectivos coeficientes de determinação.

Comparando o coeficiente de precisão dos métodos supracitados com o método polinomial, indicado por Dubois et al (2024) como mais indicado para situações de análise para dados não lineares como os obtidos a partir da construção do Gráfico 11, pode-se observar previsões de maior precisão, alcançando 73%, indicada pelo coeficiente de determinação $R^2 = 0,73$, determinado pelo processamento dos dados para a previsão de 0,98 m para o ano de 2100, considerada aceitável.

As zonas de interesse indicadas a partir dos resultados das elevações projetadas sobre a área de estudo revelam a possibilidade de impacto direto às comunidades ribeirinhas localizadas nas margens dos rios pertencentes a zonas cobertas pela elevação eustática e urbanizada prevista, indicando assim necessidade da manutenção do equilíbrio dos ecossistemas instalados para contenção da erosão ocasionada pelo avanço da linha de costa sobre a área, assim como sobre o ecossistema de manguezal pertence a zona de Floresta Arbórea Arbustiva-Herbácea aos municípios de Praia Grande, Santos, São Vicente e Guarujá e Bertioga.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o presente trabalho, foi possível concluir que as projeções por meio dos métodos linear e logarítmico apresentam baixa precisão para série de dados estudados, com previsões de altimetria marítima também insuficientes para alcançar, de forma quantitativa, proximidade com os resultados previstos pelas previsões propostas pelo IPCC (2022) dispostos na Tabela 3.

O método polinomial demonstrou-se o de maior precisão aproximada de 73%, indicado pelo coeficiente de $R^2 = 0,73$ e condizente com, pelo menos, um dos cenários previstos, sendo, portanto, o mais indicado para a previsão dos períodos analisados, sendo o método mais adequado a dados de baixa linearidade, como os utilizados no presente estudo.

As áreas de Formação Arbórea/Arbustiva-Herbácea de Terrenos Marinheiros Lodosos, podem ser significativamente impactadas pelo avanço da linha de costa projetado para o ano de 2100, conforme os resultados do presente estudo, tendo identificado efeitos especialmente a margem norte da Ilha de São Vicente.

Por estarem intrinsecamente associadas à dinâmica hídrica e aos regimes de marés, tais formações possuem vida altamente dependente dessas variações, o que evidencia a vulnerabilidade dos ecossistemas de mangue diante da elevação do nível do mar projetada por este estudo.

7. IMPLICAÇÕES FUTURAS

Infelizmente durante a produção do presente trabalho, o programa responsável pela disponibilização dos dados pertinentes a esta pesquisa também disponíveis anteriormente no *Data Analysis Tool 2.0*, portal *Sea Level Change* (2025), que seriam intrínsecos para a avaliação da situação futura dos ecossistemas de manguezal presentes na área de estudo e zonas de interesse, estão até o presente momento sem novas atualizações devido à dependência do projeto em questão do financiamento do Governo dos Estados Unidos da América, através da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), esse fato se deve a entrada do governo federal dos EUA em situação de fechamento ou “*shutdown*” a partir de 1º de outubro de 2025, por não haver aprovação de resolução de continuidade (*continuing resolution*) ou todos os valores orçamentários necessários.

Dessa forma, a operação normal de diversas agências federais assim como a responsável por atualizar os dados utilizados no presente estudo fica suspensa ou sob regime reduzido, tanto a vulnerabilidade orçamentária dessas agências, dependentes de decisões políticas de curto prazo ou por meio de apropriações anuais ou resoluções temporárias, podem vir a impactar os planejamentos a longo prazo que dependem de estudos ambientais relacionados a disponibilidade dos dados utilizados neste estudo.

A dependência da infraestrutura científica relacionada à vontade política individual ou de um grupo que compõe uma maioria, impacta diretamente no êxito da compilação e disponibilização de dados históricos como os utilizados no presente trabalho, sendo que a falta de registro ou falta na manutenção da infraestrutura necessária para obtenção de dados pode comprometer o desenvolvimento.

Mesmo após o fim do “*shutdown*” do Governo Federal dos Estados Unidos da América, os custos residuais como atrasos em pagamentos e perdas de dados devido à falta de manutenção de servidores e satélites, podem implicar em impactos diretos sobre parcerias da agência em questão, assim como a cooperação com a comunidade internacional de pesquisa em mudanças climáticas.

8. REFERÊNCIAS

BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011.

BORN, G. H.; TAPLEY, B. D.; RIES, J. C.; STEWART, R. H. Accurate measurement of mean sea level changes by altimetric satellites. *Journal of Geophysical Research*, v. 91, n. C10, p. 11775–11782, 1986.

CETESB. *Avaliação do estado de degradação dos ecossistemas da Baixada Santista – SP*. São Paulo: CETESB, 1991. 45 p. (Relatório Técnico CETESB).

CINTRÓN, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *Ecology and management of New World mangroves*. Rome: FAO, 1983.

CLIMATE IMPACT LAB; PNUD. *Assessing Risk from Climate Change in Coastal Cities: A 2050 Outlook*. New York: United Nations Development Programme, 2022. Disponível em: <https://www.climateimpactlab.org>. Acesso em: 5 jun. 2025.

DE ARAÚJO, C. A. S. et al. Aplicações de técnicas de Sensoriamento Remoto na análise multitemporal do ecossistema manguezal na Baixada Santista, SP. 2010.

DE ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. *Brazilian Journal of Geology*, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.

DUBOIS, C. et al. Improving sea-level extreme value estimates by extending short tide-gauge records: a comparison of statistical learning and regression models. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, n. 2, p. 215, 2024.

FARIA, A. P. Eustasia global e a realidade do litoral brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 2, 2005. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/53/161>. Acesso em: 3 fev. 2025.

FRANCO, N. B. Aproximação de Funções: Método dos Mínimos Quadrados. In: *Cálculo Numérico*. São Paulo: [s.n.], 2006. Cap. 8. p. 234–268.

HERZ, R. A regional program on coastal monitoring and management of mangrove in Brazil. In: *Symposium on Coastal and Ocean Management*, 5., New York. Proceedings... Seattle: ASMCE, 1987.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira: Sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos*. Rio de Janeiro: Fundação IBGE, 2012.

IBGE. Diretoria de Geociências, Coordenação de Meio Ambiente. *Biomass 2019*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Geneva: IPCC, 2022.

IOUSP – INSTITUTO OCEANOGRÁFICO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Nível do mar no litoral paulista apresenta tendência de elevação nas últimas décadas*. São Paulo: IOUSP, 2023. Disponível em: <https://www.io.usp.br>. Acesso em: 5 jun. 2025.

IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Sítios arqueológicos cadastrados. Disponível em: <https://sicg.iphan.gov.br/>. Acesso em: 2025.

JESUS, R. de. *Estudo temporal de alterações na cobertura vegetal de manguezais do estado de São Paulo*. 2017. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017.

LACERDA, L. D. *Mangrove ecosystems: function and management*. Berlin: Springer, 2002.

LEATHERMAN, S. P. *Barrier Island Handbook*. College Park: Laboratory for Coastal Research, University of Maryland, 1986.

LEATHERMAN, S. P. Impacts of sea level rise on the coasts of South America. In: *Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate*, v. 4: *Sea Level Rise*. p. 73–82, 1986.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). *Plano Nacional de Desenvolvimento Urbano – PNDU*. Brasília: MDR, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/desenvolvimento-urbano/pndu>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NALON, M. A. et al. *Inventário florestal da vegetação do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2005. Acesso em: 9 nov. 2025.

NASA. *Sea Level Change: Data Analysis Tool 2.0*. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2024. Disponível em: <https://sealevel.nasa.gov/data-analysis-tool>. Acesso em: 5 jun. 2025.

NASA JPL PODAAC. *NASA-SSH Simple Gridded Sea Surface Height from Standardized Reference Missions Only – Version 1* [recurso eletrônico]. Pasadena, CA: Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/SSH/NASA/GRIDS/L4/ALL/001>.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States*. Silver Spring, MD: NOAA, 2023. Disponível em: <https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

OLIVA, A. *Programa de manejo fronteiras para o Parque Estadual Xixová-Japuí – SP*. 2003. Dissertação (Mestrado) – ESALQ, Universidade de São Paulo, 2003.

OLIVA, M. A. *Diagnóstico ambiental dos manguezais da Baixada Santista*. São Paulo: Instituto Florestal, 2003.

RASMUSSEN, D. J.; MEINSHAUSEN, M.; KOPP, R. E. Probability-weighted ensembles of U.S. county-level climate projections for climate risk analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 55, n. 10, p. 2301–2322, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0302.1>.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. (Coord.). *Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar*. São Paulo: Caribbean Ecological Research, 1995. 64 p.

SCHERER, C.; ROCHA, J. C.; FURTADO, T. S. Avaliação de impacto ambiental em áreas costeiras urbanizadas: metodologia e estudo de caso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 3, p. 1141–1155, 2020.

SCHMIEGELOW, J. M. M. *Manguezais do Sistema Estuarino de Santos (SP): estrutura e produção de serrapilheira*. 2009. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SIGMINE – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DA MINERAÇÃO. Dados geoespaciais. Disponível em: <https://sigmine.mme.gov.br/>. Acesso em: 2025.

SILVA, H. A. P. da. *Simulação da elevação do nível médio do mar utilizando métodos numéricos e ferramentas de geoprocessamento: estudo de caso*. 2022.

SILVA, R. R. Aplicação de modelos matemáticos em séries históricas do nível do mar no litoral paulista. *Revista de Climatologia*, v. 20, n. 1, p. 58–74, 2022.

SOUSA, W. R. N. de. *Criação e avaliação de modelos de prognóstico futuro de linhas de costa, utilizando regressão estatística e redes neurais artificiais, a partir das séries temporais de imagens de satélite*. 2022. 98 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. *TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil*. São José dos Campos: INPE, 2012. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>

VISNADI, S. R. Marchantiophyta e Bryophyta de manguezais do estado de São Paulo, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais*,

Belém, v. 3, n. 1, p. 69–80, jan./abr. 2008.

WAGNER, C. A.; CHENEY, R. E. Global sea level change from satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. C10, p. 15607–15615, 15 out. 1992.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *State of the Global Climate 2023*. Geneva: WMO, 2023. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>. Acesso em: 5 jun. 2025.