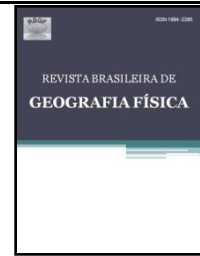




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Índice de vulnerabilidade diante da variação do nível do mar na Amazônia: estudo de caso no município de salinópolis-Pará¹

Ronaldo da Cruz Braga^a, Márcia Aparecida da Silva Pimentel^b

^a Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará -UFPA/EMBRAPA/MPEG e Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA/Belém. Av. Almirante Barroso, nº 1155, Marco, CEP 66093-020, Belém, Pará, Brasil. (91) 3201-1701. Autor correspondente: rbragageo@yahoo.com.br. ^b Professora Pós-Doutora em Geografia da Faculdade de Geografia e Cartografia da UFPA e do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFPA, Rua. Augusto Corrêa, nº 1, Guamá, CEP 66075-110, Belém, Pará, Brasil. (91) 3201-7000. mapimentel@ufpa.br

Artigo recebido em 16/11/2018 e aceito em 24/02/2019

RESUMO

O Município de Salinópolis faz parte da Microrregião do Salgado do Estado do Pará, litoral de Rias da Zona Costeira Amazônica. Passou por evento de transgressão marinha, que configurou a atual Orla, qual apresenta vulnerabilidades distintas quanto à ocupação, fisiografia e ação do mar. Este artigo analisou as variáveis geológicas/geomorfológicas e oceanográficas para a determinação do Índice de Vulnerabilidade Costeira-ICV à elevação do nível do mar em Salinópolis. A costa foi classificada em sete setores de Orla. As variáveis foram: geomorfologia, geologia, cota topográfica, declividade, altura da onda, amplitude de maré, taxa de erosão atual e futura, variação relativa do nível do mar atual e futura. Os softwares utilizados foram o *ArcGis* 10.3 para a elaboração dos mapas e o *Statistical Analysis Software* (SAS) versão 9.4 para o cálculo estatístico da Tendência Estimada atual da variação do nível do mar, utilizando as séries temporais dos anos de 1951 a 1956 e 2005 a 2016. Para a variação futura do mar, foi utilizado o cenário RCP8.5 do IPCC. A análise da vulnerabilidade atual revelou três setores da Orla com Baixo IVC, dois em Moderado e dois em Alto. No IVC futuro, cinco setores apresentaram índices Muito Alto, um Alto e um Baixo. Os resultados indicam certa estabilidade atual quanto à vulnerabilidade à elevação do nível do mar. No entanto, em cenário para 2100, com elevação de um metro, a maior parte da Orla apresenta Muito Alta vulnerabilidade, podendo impactar ambientes naturais e às atividades humanas.

Palavras-chave: Mar. Orla. Índice. Vulnerabilidade. Amazônia

Index of vulnerability faced with the variation of the sea level in the Amazon: case study in the municipality of salinópolis-Pará

ABSTRACT

The Municipality of Salinópolis is part of the Salgado Microregion of the State of Pará, Rias coast of the Amazon Coastal Zone. He passed a marine transgression event, which configured the current Orla, which presents distinct vulnerabilities regarding occupation, physiography and sea action. This article analyzed the geological / geomorphological and oceanographic variables for the determination of the Coastal Vulnerability Index-ICV to the sea elevation in Salinópolis. The coast was classified in seven sectors of Orla. The variables were: geomorphology, geology, topographic dimension, slope, wave height, tidal amplitude, current and future erosion rate, relative current and future sea level variation. The software used was ArcGIS 10.3 for the preparation of the maps and the Statistical Analysis Software (SAS) version 9.4 for the statistical calculation of the current Estimated Trend of the sea level variation, using the time series of years 1951 to 1956 and 2005 to 2016. For the future sea variation, the IPCC scenario RCP8.5 was used. The current IVC classified three sectors of Orla in Low, two in Moderate and two in High. In the future IVC, five sectors had Very High, One High and One Low. The results indicate some current stability regarding vulnerability to sea level rise. However, in a scenario for 2100, with a height of one meter, most of the Orla presents Very High vulnerability, being able to impact natural environments and human activities.

Keywords: Sea. Orla. Index. Vulnerability. Amazonia

¹ Artigo extraído de Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais-PPCCA da Universidade Federal do Pará-UFPA/EMBRAPA/MPEG

Introdução

A vulnerabilidade costeira à elevação do Nível Médio do Mar (NMM) está relacionada a condição que determinados setores da Orla costeira à fatores de natureza geológicas, geomorfológicas, climáticas e oceanográficas (Gornitz, 1991; Cazenave e Cozannet, 2014). No cenário atual de mudanças climáticas globais, a elevação do nível dos oceanos, causada principalmente pela expansão térmica e derretimento das camadas de gelo das altas altitudes (Nicholls, 2014; IPCC, 2013, 2014) é consequência da emissão de gases do efeito estufa de origem antrópica, que vem ocorrendo de forma mais acelerada, principalmente após a Primeira Revolução Industrial do Século XVIII, como apontam (Steffen, 2011; IPCC, 2013; Zhou et al., 2015; Ren, 2015; NOAA, 2017; Dou e Xiao, 2016). Diante desse contexto, as projeções do IPCC (2013, 2014) demonstram aumento de 4,8°C até o ano de 2100, com aumento médio de 3,7°C da temperatura global no período de 2081 a 2100 para o pior cenário. O aumento da temperatura repercute na elevação do nível dos oceanos que, para esse cenário, tem aumento médio de 0,63 m, com máxima se aproximando de 1 metro.

Gornitz 1991 e Cazenave e Cozannet 2014 entendem que as condições da costa à ação da elevação do NMM estão relacionadas às variáveis origem físicas. Tais variáveis são as seguintes: geomorfológicas, erosão e progradação da Linha de Costa, declividade da costa, variação relativa do NMM, altura significativa das ondas e amplitude de maré. Uma análise do conceito de vulnerabilidade e suas diversas metodologias, tanto sociais quanto físicas é descrita por Nguyen et. al 2016. Esses autores abordam uma série de variáveis e fatores que podem influenciar nos três principais pilares do conceito de vulnerabilidade: exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa, que autores como Ferrol-Schulte et. al 2015 citam como fundamentais para a análise desse conceito.

A Orla marítima é uma unidade geográfica especialmente vulnerável a fenômenos naturais ligados à dinâmica costeira, como erosão, inundação costeira, marés meteorológicas, etc. Diante da complexa interação sistêmica dessas variáveis, a Orla pode apresentar características distintas em sua extensão, em decorrência de sua fisiografia. Tal distinção e complexidade remetem à ocorrência de trechos costeiros que apresentam diferentes respostas aos processos naturais e atividades antrópicas, em relação à erosão e inundação, causada pela elevação do NMM. Essa distinção atribui à Orla diferentes vulnerabilidades,

representada pelo sistemismo existente entre as variáveis físicas costeiras, que denotam maior fragilidade, fraqueza ou passividade ante à incidência de fenômenos de potencial destrutivo, como a elevação do NMM.

Com um aumento médio de um metro do NM, projetado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas IPCC, 2013, as zonas costeiras em todo mundo apresentarão diversas formas de impactos, tanto de natureza sociais como ambientais Ramesh et al. 2015. Para esses autores, as zonas litorâneas são as primeiras áreas do globo a serem impactadas pelo aumento do nível do mar. Isso ocorre devido serem áreas de contato imediato com os oceanos e possuir grandes extensões localizadas na chamada Zona Costeira de Baixa Elevação (ZCBE), ou seja, área com topografia até 10 metros do NMM. Essa é uma característica própria da maioria das áreas costeiras, que associada com características climáticas e oceanográficas, como ondas e marés, elevam o fator de vulnerabilidade.

A projeção de um novo nível do mar em zonas costeiras origina uma nova linha costa, sendo possível prever e quantificar perdas ambientais, como também locais a serem erodidos e inundados (Germani et al., 2015). Neste cenário, se torna evidente que a maioria das áreas costeiras é vulnerável fisicamente a estes processos de erosão e inundação causados pelo aumento do NM, desencadeando impactos ambientais. Como grandes porções costeiras são ocupadas por populações, os impactos também assumem dimensões sociais e econômicos Clara et. al 2017 Sobre a interrelação de variáveis físicas e sociais Almeida et. al 2016 trazem importantes contribuições ao fazerem análise da vulnerabilidade ante às mudanças climáticas.

O nível do mar tem demonstrado aumento em diversas áreas do globo e como consequência, a Orla costeira tem sido impactada. Qu et. al 2019 quantificam esse aumento ao longo de alguns setores do litoral chinês. Na Holanda Wencker et. al 2016 demonstram que os impactos desse aumento têm levado o governo investir em tecnologia de proteção dos diques e deposição artificial de areia ao longo da costa. Mehvar et al. 2019 projetam os cenários do IPCC 2013 para quantificar as perdas ambientais resultantes da elevação do nível do mar em Bangladesh. Na costa brasileira além da erosão e intrusão salina, podem ocorrer perdas ambientais, principalmente nos ecossistemas de manguezais, praias e dunas, como demonstraram Bezerra 2014, Novelli et al. 2016.

Ante ao aumento do nível do mar em escala mundial, a identificação de áreas vulneráveis à essa elevação tem sido alvo de pesquisas em várias Universidades espalhadas pelo mundo. Dessa forma, com o objetivo de dimensionar a vulnerabilidade física costeira, é usado, em diversas partes das zonas costeiras mundiais, o Índice de Vulnerabilidade Costeira-IVC. Este índice possibilita a identificação de áreas mais vulneráveis à elevação do nível do mar no litoral.

Os Estados Unidos, principalmente por meio do seu United States Geological Survey-USGS, têm aplicado essa metodologia em diversos setores do seu litoral (Boruff et al., 2005; Gornitz, 1991. Trabalhos como os de Abuodha e Woodroffe 2006 e Gutierrez et al. 2014 também se destacam a nível mundial utilizando o IVC. Na Argentina o IVC foi aplicado em alguns setores da costa por Fernandez et. al 2017. No Brasil também se tem trabalhos desenvolvidos, como os de Santos et al. 2015 e Germani et al. 2015. Zanetti 2016 apontam algumas áreas do Brasil mais vulneráveis aos impactos de uma possível subida do nível do mar. Os impactos da subida do mar têm levado governos locais a elaborarem planos de adaptação. No Brasil desde o ano de 2009, com a instituição da Política Nacional de Mudanças do Clima, tem se observado esforço para inserir o país nas discussões sobre consequências das mudanças climáticas, tanto que, no ano de 2016 foi estabelecido o II Plano Nacional de Adaptação (PNA/MMA, 2016). Uma das preocupações do plano é sobre os impactos da subida do nível do mar em áreas costeiras vulneráveis.

Metodologia semelhante para análise do índice de vulnerabilidade costeira é desenvolvida por Kantamaneni 2016 e Kantamaneni et. al 2018. Esses autores criaram um índice de Vulnerabilidade Física Costeira, considerando a interrelação das variáveis físicas locais. A importância desse estudo é a fácil aplicação e associação desse índice físico a outras variáveis, inclusive as sociais. Outro importante trabalho de enfoque metodológico é o de Wang et al. 2014. Esses autores aplicam na costa chinesa o Abordagem Matricial de Risco, que engloba além das variáveis físicas, os aspectos socioeconômicos.

As metodologias de análise e aplicação do índice vulnerabilidade costeira são utilizadas em vários setores ao longo do litoral mundial. No entanto, observa-se que a maioria, deriva do clássico trabalho de Gornitz 1991.

O Brasil possui 8.694km de faixa litorânea (Linha de Costa), incluindo baías e reentrâncias, estendendo-se desde 4° 30' Norte até os 33° 44'

Sul, com área aproximada de 514 mil km², dos quais cerca de 324 mil km² correspondem ao território dos 395 municípios costeiros, distribuídos em 17 Estados litorâneos. As áreas costeiras sob jurisdição nacional compreendem ao Mar Territorial, a Zona Econômica Exclusiva, que se estende desde 12 até 200 milhas náuticas ou 370,4 km da Costa, o que equivale a aproximadamente a 3,5 milhões de km², além da Plataforma Continental, definida de acordo com o art. 76 da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (MMA, 2008).

A Amazônia possui zona costeira com extensão aproximada de 3.044 Km, ocupando 35% do total do litoral brasileiro MMA 2008, onde se localizam inúmeros ecossistemas em diferentes níveis de vulnerabilidade física.

Cada setor costeiro da Amazônia apresenta características geológica/geomorfológicas que se assemelham à morfogênese regional e climáticas/oceanográficas particulares, como regime de ondas e marés, que o diferenciam em si e do restante da costa brasileira. O contraste demográfico e de renda também é evidente. Afora as três Regiões Metropolitanas, São Luís e Macapá, que possuem maior densidade demográfica e concentram maiores rendas, grandes extensões costeiras amazônicas apresentam incipiente ocupação com suas populações apresentando péssimos indicadores socioeconômicos

A Zona Costeira Amazônica (ZCA), assim como toda a paisagem costeira é herança de processos antigos, como variação do NMM e paleoclimas, modelada pela dinâmica atual, tanto por fatores físicos, como pela ação antrópica. As unidades de paisagem ou Sistemas Ambientais Naturais e Antrópicos Muehe e Nicolodi 2008 que compõem o conjunto paisagístico do litoral amazônico são bastante diversificados sendo, principalmente, dominados por planícies lamosas, manguezais, canais de marés, praias, bancos de areia, praias, dunas, falésias. Esses sistemas modificam-se diariamente com a ação energética do mar e se apresentam em diferentes níveis de vulnerabilidade.

As zonas costeiras mundiais já passaram por processos relacionados a variação eustática, tanto de eventos transgressivos como regressivos, resultantes das mudanças climáticas Ramesh et al. 2015. Na costa amazônica a formação geológica de Pirabas, que aflora em diferentes áreas da costa de reentrâncias amazônicas é resultante de um processo transgressivo que ocorreu no Terciário (Rossetti, 2006). A história ecológica e ambiental

da ZCA está diretamente ligada às variações do NMM.

Ante o exposto, a determinação do Índice de Vulnerabilidade Costeira IVC à elevação do NMM, metodologia adotada neste trabalho, será aplicada no Município de Salinópolis. O objetivo é determinar o IVC por setores, levando em consideração variáveis físicas, tais como geologia, geomorfologia, marés, altura da onda em águas rasas, declividade da costa, cota topográfica, taxa de erosão e variação relativa do nível do mar. Considerando a importância do Município para a economia regional, principalmente com o Turismo, a presença de diversos sistemas naturais e a ocupação humana da costa, a determinação do IVC de Salinópolis constitui-se, além de uma aplicação prática da metodologia, também um instrumento a ser utilizado por gestores para planejamento de possíveis áreas impactadas pela ação do mar, bem como, políticas de adaptação local da população, social e ambientalmente mais vulnerável.

Material e métodos

A área selecionada é o Município de Salinópolis, inserido no Litoral de Rias ou reentrâncias da ZCA. Esta, está localizada entre os paralelos 4° S e 5° N e os meridianos 43° W e 51° W, entre o Cabo Orange (Amapá) e a Ponta de Tubarão (Maranhão), medindo, cerca de, 2.250 km de extensão, sem considerar as reentrâncias (recortadas por dezenas de estuários) e as ilhas costeiras.

Salinópolis possui aproximadamente 54 km de litoral. Possui características de natureza física que se assemelham ao contexto regional, mas que são singulares quando comparadas ao restante da Zona Costeira Brasileira. A região costeira apresenta clima quente e úmido e o total médio de precipitação é um dos maiores do mundo, atingindo valores de 3.300 mm anuais. O principal sistema meteorológico que causa as chuvas na Região é a Zona de Convergência Intertropical. A Figura 1 mostra a localização da área de estudo e seus setores de Orla classificados.

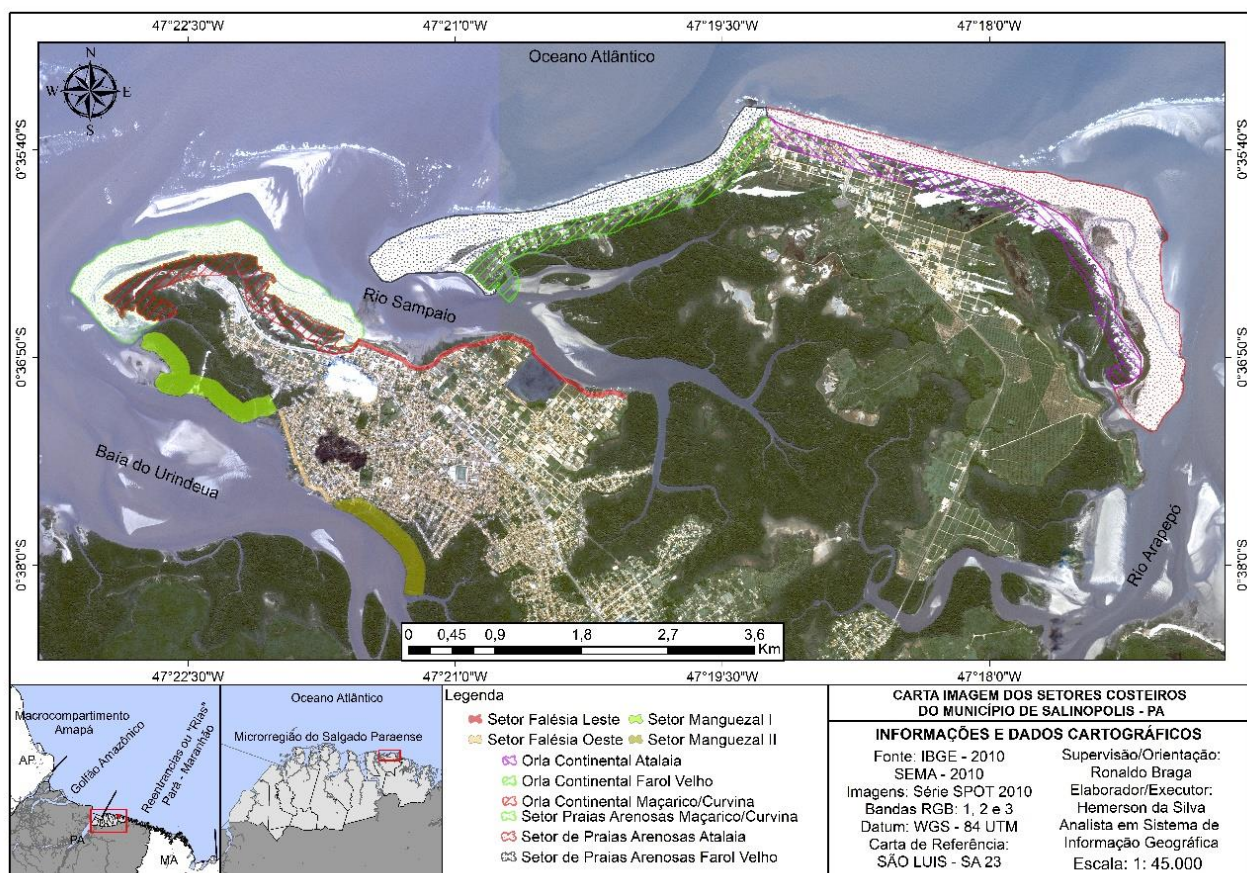


Figura1: Localização da área de estudo com a divisão dos subsectores costeiros em Salinópolis-Pará. Fonte: Elaborado pelos autores

Índice de vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar (IVC) - Dentre a vastidão de literatura sobre o conceito de vulnerabilidade optou-se, por questão metodológica, basear-se no trabalho de Gornitz 1991, pois relaciona as condições dos setores costeiros à ação da elevação do NMM. Para este autor a vulnerabilidade é entendida como a condição de setores costeiros a partir da interrelação entre as variáveis físicas. Tais variáveis são as seguintes: geomorfológicas, erosão e progradação da Linha de Costa, declividade da costa, cota topográfica, variação relativa do NMM, altura significativa das ondas e amplitude de maré.

Para a identificação o Índice de Vulnerabilidade Costeira IVC, subdividimos a Costa de Salinópolis da seguinte forma: **Setor Maçarico/Corvina** e **Setor Farol Velho/Atalaia**. O primeiro subdivide-se em cinco subsetores: Costa de Falésias Leste e Oeste, Praias arenosas

Maçarico/Corvina e Setores de Manguezal I e II; o segundo subdivide-se em dois subsetores: Setor praia do Farol Velho e Setor praia do Atalaia (Figura 1 e Tabela 1). A inserção da variável topografia por setores na área permitiu a classificação de uma nova tipologia de falésias baseada na altitude.

A determinação tipológica de cada setor baseou-se em modificações da metodologia do Projeto Orla (Projeto Orla, 2006): Os critérios para definição dos setores costeiros ou orla marítima² de Salinópolis foram: configuração da costa, geomorfologia da costa e altimetria. Para a delimitação da faixa emersa: critérios do Projeto Orla (50 e 200 metros para orla urbanizada e não urbanizada, respectivamente); para a delimitação da faixa submersa: limite externo da praia em maré baixa, base da falésia e faixa externa de manguezal.

Tabela 1: Subsetores, extensão, área e tipos de Orla Costeira do Município de Salinópolis-Pará.

Subsetores	Extensão (km)	Área total (m ²)	Área da faixa emersa (m ²)	Tipo de Orla
Costa de praias arenosas Maçarico/Corvina	5.186,19	1952502,56	713.972,461	Exposta e Não Urbanizada
Costa de Falésias Leste	3.279,65	160902,826	160902,826	Semi-exposta e Urbanizada
Costa de Falésias Oeste	1.221,30	58867,51	58867,51	Abrigada e Urbanizada
Setor de Manguezal I	2.288,97	388692,983	388692,983	Abrigada e Não Urbanizada
Setor de Manguezal II	1.525,66	268161,979	268161,979	Abrigada e Não Urbanizada
Praia do Farol Velho	6.266,66	2103704,51	804.159,428	Exposta e Parcialmente Urbanizada
Praia do Atalaia	7.483,98	3260130,88	1.031.385,62	Exposta e Parcialmente Urbanizada

Cálculo da vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar - A determinação do Índice de vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar

de cada setor foi calculada de acordo com a Equação 1 e a Quadro 1.

² A orla marítima pode ser definida como unidade geográfica inclusa na zona costeira, delimitada pela faixa de interface entre a terra firme e do mar. Podem ser do tipo costas rochosas (altas e baixas); falésias

erodíveis; praias arenosas; praias de seixos; planícies lamosas; pântanos; manguezais; e formações recifais (Projeto Orla, 2006).

Equação 1: Desenvolvimento da equação para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira.

$$IVC = \left[\frac{1}{n} (a_1 * a_2 * a_3 * \dots * a_n) \right]^{1/2}$$

$$IVC = \frac{\sqrt{(a*b*c*d*e*f*...n)}}{n} \quad \text{(Equação 1)}$$

Fonte: Gornitz (1991)

Quadro 1: Variáveis e valores para a determinação do Índice de Vulnerabilidade Costeira-IVC. Fonte: Modificada pelos autores de Gornitz 1991 e Germani 2015.

Variáveis	Muito Baixa 1	Baixa 2	Moderada 3	Alta 4	Muito Alta 5
Geomorfologia (GM)	Costa de falésias alta passivas ³	Costa de Falésias médias passivas	Costa de Falésias baixas passivas	Costa de falésias ativas ⁴	Praias arenosas e planícies de marés.
Cota Topográfica (CT) metros	> 30	> 20 ≤ 30	> 10 ≤ 20	> 5 ≤ 10	≤ 5
Variação Relativa do Nível do Mar (mm/a)	≤ - 1,1	- 1.0-0.99	1.0-2.0	2.1-4.0	≥ 4.1
Taxa de erosão ou acreção (m/a)	≤ 2,1 Acreção	1,0 – 2,0 Acreção	- 1 – (+ 1) Estabilidade	-1,1 – (- 2,0) Erosão	≥ - 2 Erosão
Declividade da costa (DC)%	>1,2 Alta declividade	1,2 a 0,9 Alta declividade	0,9 a 0,6 Média declividade	0,6 a 0,3 Baixa declividade	< 0,3 Muito baixa declividade
Altura significativa da Onda (m) (AO)	<0,55	0,55 a 0,85	0,85 a 1,05	1,05 a 1,25	> 1, 25
Amplitude da Maré (m) (AM)	< 1.0	1.0 – 2.0	2.0 - 4.0	4.0 – 6.0	> 6

O IVC por setores foi classificado a partir dos seguintes intervalos: abaixo de 8,7 são incluídos na categoria de **BAIXA** vulnerabilidade; valores entre 8,7 - 15,5 são considerados de vulnerabilidade **MODERADA**; valores entre 15,6 e 20 indicam **ALTA** vulnerabilidade; valores de

IVC acima de 20 são classificados como de vulnerabilidade **MUITO ALTA** (Tabela 2). Após a determinação do IVC para cada variável foi obtido o IVC geral para os sete setores de Orla em estudo.

³ As falésias passivas em Salinópolis são escarpamentos de alturas variadas que não são na atualidade solapadas com a ação energética dos agentes exodinâmicos, tais como ondas, marés e correntes longitudinais.

⁴ Escarpamentos que são atingidos e solapados diariamente pela ação dos agentes exodinâmicos.

Tabela 2: Valores para a determinação do Índice de Vulnerabilidade Geral para o Litoral de “Rias” e Salinópolis, costa amazônica. Fonte: Gornitz 1991 e Germani et al. 2015.

Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
Até 8,6	8,7 a 15,5	15,6 a 19,9	≥ a 20

Geomorfologia - Foi determinada a partir de observações em campo, análise de imagens de satélite (SPOT/2010) de 2,5 metros de resolução espacial, leituras de artigos relacionados ao tema, como Ranieri e El-Robrini 2015; BRASIL 1973, folha South American-SA 23 e análise topográfica de aerolevanteamento da parte urbana da cidade. Também foram classificadas as falésias de acordo com a topografia em: falésias baixas, entre 0 até 2 metros; falésias médias, maior que 2 e inferiores a 5 metros e falésias altas, superiores a 5 metros.

Taxas de Erosão - A maioria dos trabalhos sobre a progradação e retrogradação da Linha de Costa são realizados com a análise multitemporal de imagens de sensor orbital. Três metodologias são normalmente utilizadas para estudo das mudanças da linha de costa (Conti e Rodrigues, 2011): A Linha de Contato Água/Solo, determinada, principalmente a partir de mascaramento da água por banda infravermelho próxima; A Linha de Deixa, ou máximo de inundação em tempestades), normalmente determinada a partir de bandas na

faixa do vermelho TM3 Landsat; A linha de Limite da Vegetação, obtida através de análise visual de bandas pancromáticas, composições coloridas. Desde o ano de 2003, tem-se utilizado uma nova metodologia com base na linha digital de costa, a Digital Shoreline Analysis (DSAS), desenvolvido por Thieler et al. 2003 e utilizada como extensão em Software de geoprocessamento. Todas essas metodologias são possíveis de serem utilizadas para análise das mudanças da linha de costa. Neste artigo utilizou-se os Limites da Vegetação, indicada para longos períodos. Dessa forma, foram utilizadas as imagens LandSat dos anos de 1984, 1994, 2004 e 2015 e 2016 (Quadro 2), esta última, foi utilizada como base para a projeção da linha de costa do ano de 2100. O cálculo da variação da linha de costa futura foi realizado pela delimitação e quantificação da taxa de erosão projetada para o ano de 2100 a partir de um metro de elevação do NMM, de acordo com o cenário RCP8.5 do IPCC 2013.

Quadro 2: Características das imagens orbitais utilizadas no estudo multitemporal da variação da linha de costa em Salinópolis-Amazônia.

Imagem	Informações Gerais	Combinação de bandas utilizadas
1984 LANDSAT 5	Data de aquisição: 27/07/1984 Resolução espacial: 30m	Bandas: 5,4,3
1994 LANDSAT 5	Data de aquisição: 21/06/1994 Resolução espacial: 30m	Bandas: 5,4,3
2004 LANDSAT 5	Data de aquisição: 04/09/2004 Resolução espacial: 30m	Bandas: 5,4,3
2015 LANDSAT 8	Data de aquisição: 02/08/2015 Resolução espacial: 30m	Bandas: 6,5,4
2016 LANDSAT 8	Data de aquisição: 08/06/2016 Resolução espacial: 30/15m	Bandas: 2,3,4,5,6,7

Declividade e Cota Topográfica - Foram calculadas a partir da confecção do Modelo Digital de Elevação Terreno (MDET) do Município de Salinópolis. Com manipulação do Software ArcGis 10.3 foi possível a confecção dos mapas temáticos e posterior determinação da declividade e cotas topográficas por setores de Orla. Sobre o MDET

foi traçado perfil transversal usando a extensão 3D Analyst do ArcGis 10.3.

Variação relativa do Nível do Mar - Foram utilizados dois tipos de informações: (a) dados locais, que consistiram em séries temporais de dois intervalos: a dos anos de 1951 a 1956, obtidos do banco de dados do Permanent Service for Mean

Sea Level (PSMSL, 2017) e dos anos de 2005 a 2016, obtidos da Tabua de Marés, junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DNH, 2016); (b) dados gerais, obtidos da projeção do cenário RCP8.5 do Quinto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas AR5 IPCC 2013, que projeta a elevação do NMM em aproximadamente um metro até o ano de 2100.

Com esses valores, duas variações do NMM foram determinadas, a atual e a futura. Na

atual utilizou-se o procedimento estatístico referentes aos estudados para séries temporais, com manipulação do *Statistical Analysis Software* (SAS) versão 9.4, utilizando o pacote PROC TIMESERIES e PROC ARIMA. Fez-se o processamento separadamente das séries devido a carência de dados dos intervalos, cujo procedimento simplificado está na Figura 2.

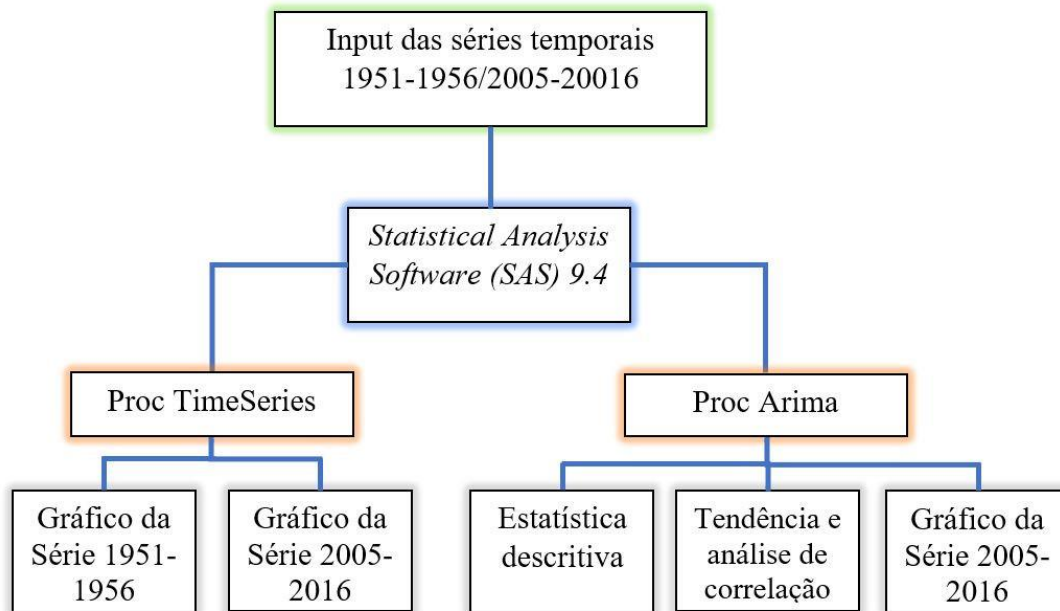


Figura 2: Esquema simplificado de análise em séries temporais para cálculo da Constante Estimada da variação do NMM em Salinópolis. Fonte: Elaborada pelos autores.

Na variação futura, com dados gerais, dividiu-se o valor em milímetros da projeção RCP8.5 pela diferença de anos de 2013 a 2100 (Equação 2).

Equação 2: Fórmula para determinação da variação relativa futura do NMM com base na projeção do IPCC para o ano de 2100.

$$Vr = RCP8.5 / (2100 - 2013) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

Vr = Variação relativa do NMM

RCP8.5 = Cenário de elevação do NMM até o ano de 2100, equivalente a 1000mm.

Altura significativa das ondas - Os valores gerais de ondas de Salinópolis foram adquiridos do banco de dados do CPTEC/INPE: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e os valores locais para os setores de praias foram extraído de Ranieri e El-Robrini 2016.

Amplitude da maré - De acordo com autores como El-Robrini et al. 2006, na costa de reentrâncias do Litoral Norte da ZCA, as marés são classificadas como macro-marés semidiurnas⁵, cuja amplitude varia entre 4,5 a 5,5 metros. De acordo com o modelo Soft ware WTides⁶, processado para Salinópolis, o padrão de marés

⁵ A marés semidiurnas apresenta duas **Premar PM** e duas **Baixa-mar BM** no período de 1 dia lunar, sendo o intervalo de tempo entre uma **PM** e a **BM** consecutiva de pouco mais de 6 horas. Normalmente, há apenas variações relativamente pequenas nas alturas de duas **PM** ou de duas **BM** sucessivas. No Brasil, as **marés**

semidiurnas são observadas da cidade de Vitória, ES em direção a região Norte.

⁶ WTides é um programa que usa dados harmônicos para prever as alturas das marés em muitos locais em todo o mundo de acordo com o fuso horário do local de destino.

claramente evidencia o tipo semidiurna, acompanhado de uma grande amplitude.

Os dados sobre amplitude da maré foram calculados a partir da Tábuas de Marés do Departamento de Hidrografia Nacional-DHN da Marinha do Brasil dos anos de 2005 a 2016. O cálculo que foi realizado procedeu-se da seguinte forma: calculou-se o Mean High Water Spring (MHWS) ou média da preamar de sizígia MHWS e Mean Low Water Spring (MLWS) ou média da baixamar de sizígia médio de cada mês. Os valores encontrados estão acima do Nível de Redução⁷ (NR) determinado pela Fundação de Estudo do Mar (FEMAR, 2016) e pela DHN. Em seguida utilizou-se a seguinte equação (Equação 3).

Equação 3: fórmula para cálculo da Amplitude de Maré (Miguens, 1996)

$$\text{MHWS} - \text{MLWS} = \text{AM (Amplitude de Maré)} \\ \text{(Equação 3)}$$

Resultados e discussão

Índice de Vulnerabilidade Costeira da variável Geomorfologia (GM) - O Município de Salinópolis apresenta uma diversidade de unidades geomorfológicas: tabuleiros costeiros (Falésias), planícies alagáveis, planícies não alagáveis, dunas, cordões arenosos, depressões interdunares e lagunares. Na área de estudo, foram identificadas e destacadas apenas três unidades geomorfológicas, que servirão para a determinação do IVC. São elas: falésias, praias e planície de maré.

Para a unidade geomorfológica de falésias, subdividimos de acordo com a altitude e disposição espacial. Dessa forma, foram classificados dois setores de falésias: Setor de Falésias Leste e Oeste. Esta subdivisão permitiu a proposição de uma nova classificação, baseada na topografia. Foram identificadas, de acordo com a altitude, três tipos de falésias: falésias baixas, entre 0 até 2 metros; falésias médias, com topografia maior que 2 e inferiores a 5 metros; falésias altas, superiores a 5 metros, sendo as duas últimas de ocorrência mais frequente.

O subsetor de Falésia Leste ocupa aproximadamente 3 km de extensão, variando em 2,9 a 17,6 metros de altura mais para o interior. O subsetor de Falésia Oeste, com extensão aproximada de 1,1 km apresenta falésias com 5 até

11 metros. Todas as áreas de falésias apresentam grande densidade demográfica. As falésias Oeste, são ocupadas por população de baixa renda, as do Leste apresentam habitações de alto padrão, a maioria de segunda residência além de hotéis e pousadas. Quase toda extensão de falésias, estão relativamente expostas à ação das ondas e das correntes de marés e longitudinais. Por esse motivo, apresentam grandes extensões de falésias ativas. Os dois setores estão semi-protegidos, não propriamente por estuários, mas, a ação energética das ondas e correntes, são minimizadas pelas reentrâncias que dominam a região e se estendem em direção ao mar, formando baías flúvio-estuarinas e vales fluviais afogados. A Tabela 3 destaca as principais baías com seus canais e a largura da foz em Salinópolis.

Tabela 3: Baías flúvio-estuarinas, largura da foz e canais relacionados no Município de Salinópolis. Fonte: Elaborado pelos autores com rotinas de geoprocessamento e observações em campo.

Baías	Largura da Foz (m)	Quantidade de canais relacionados
Urindeua	3.471,08	23
Sampaio	2.135,22	14
Arapepó	3.443,86	13

Outra unidade morfológica que se destaca na paisagem costeira de Salinópolis são as planícies de marés. Estas, são quase na sua totalidade, colonizadas por vegetação de mangue, que recortam a cidade e sua diferenciação morfológica com o planalto costeiro onde se instalou a área urbana, se dá de forma abrupta, evidenciada em vários pontos.

Foram identificadas quatro principais praias: Maçarico, Corvina, Farol Velho e Atalaia. Estas unidades geomorfológicas ocupam grande extensão da área e é a unidade mais dinâmica com relação à remoção de sedimentos pelo mar.

Devido à expansão urbana do Município e à política de incentivo ao turismo do Governo do Estado do Pará, extensas áreas das planícies de marés, dunas e praias vêm sendo, ou ocupadas por

⁷ Corresponde ao nível médio das Baixa mares de sizígia (MLHS). É um nível em que o mar não desce ou desce raramente.

população de baixa renda ou sendo alvo de instalação de infraestruturas permanentes de incentivo ao turismo, Souza e Rocha, 2018. A Figura 3 mostra a hipsometria e o perfil das

unidades geomorfológicas de alguns setores costeiros.

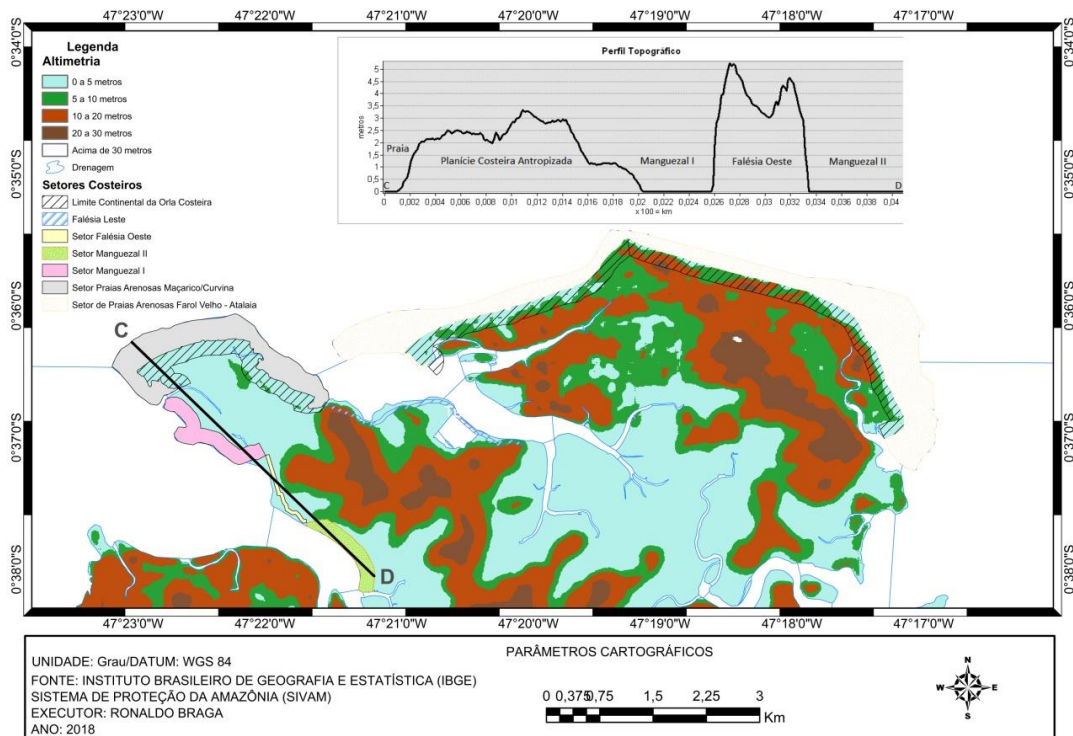


Figura 3: Hipsometria e perfil topográfico de Salinópolis, destacando as principais unidades morfológicas. Fonte: Elaborado pelo autor a partir do MDE, criado com imagens SRTM e pontos de Aerolevanteamento e com a extensão 3D do Soft ware ArcGis.

Com a predominância dessas três unidades geomorfológicas, praias, planícies de marés e falésias de altura variável, o Índice de

Vulnerabilidade Costeira à elevação do nível do mar para a variável geomorfologia foi classificado de acordo com o Quadro 3.

Quadro 3: Classificação da vulnerabilidade para o parâmetro geomorfologia em Salinópolis de acordo com os setores selecionados. Fonte: Elaborado pelos autores.

Setores costeiros	Unidades morfológicas	Vulnerabilidade
Costa de praias arenosas Maçarico / Corvina	Predominância de praia arenosa limitada por manguezais e dunas vegetadas	Muito Alta
Setor de falésias Leste	Predominância de Falésias Altas e Médias Ativas	Alta
Setor de Falésias Oeste	Predominância de Falésia Altas passivas	Muito Baixa
Setor de Manguezais Leste I	Planície de maré	Muito Alta
Setor de Manguezais Leste II	Planície de maré	Muito Alta
Praia do farol Velho	Praia arenosa	Muito Alta
Praia do Atalaia	Praia arenosa	Muito Alta

Índice de Vulnerabilidade Costeira da Variável Onda - Ranieri e El-Robrini 2016, analisando os dados modelo WWATCH do CPTEC/INPE do ano de 2013, identificaram que as alturas de ondas de águas profundas no município de Salinópolis variam de 0,5 a 1,5 metros. Em águas rasas na zona de arrebatamento das praias da Corvina, Farol Velho e Atalaia, estas ondas alcançam em média 0,5 a 1 m de altura. Na face oceânica desses segmentos de Orla, as alturas das ondas incidentes são inferiores a 1,5.

A velocidade do vento em águas profundas é de 10 a 12 m/s e direção predominante de Nordeste, formam normalmente ondas entre 3 a 4 metros de altura. Com a diminuição da intensidade do vento nas proximidades da costa, chegando entre 6 a 8 m/s, as ondas diminuem de altura, muito associado também pela configuração da costa, chegando a alturas não superiores a 1,5 metros, como já observado por Ranieri e El-Robrini 2016 e confirmado pelo Modelo WWATCH GLOBAL (CPTEC/INPE, 2017). A vulnerabilidade para o parâmetro onda está descrito na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de altura média de onda nas principais praias de Salinópolis coletados entre durante o período equinocial⁸(26, 27 e 28/04/2013 – estação chuvosa e 04, 05 e 06/10/2013 período menos chuvoso e suas respectivas vulnerabilidades.

Setores	Altura média das ondas (m)	Vulnerabilidade
Costa de praias arenosas Maçarico/Corvina	0,6	Baixa
Setor de falésias Leste	< 0,6	Muito Baixa
Setor de Falésias Oeste	< 0,6	Muito Baixa
Setor de Manguezais Leste I	< 0,6	Muito Baixa
Setor de Manguezais Leste II	< 0,6	Muito Baixa
Praia do farol Velho	0,9	Moderada
Praia do Atalaia	1,2	Alta

Ao incidirem na Orla, as ondas dissipam sua energia potencial sobre construções para o turismo e sobre o pacote arenoso das praias,

provocando destruição e obrigando os proprietários a implantar medidas de contenção (Figura 4)

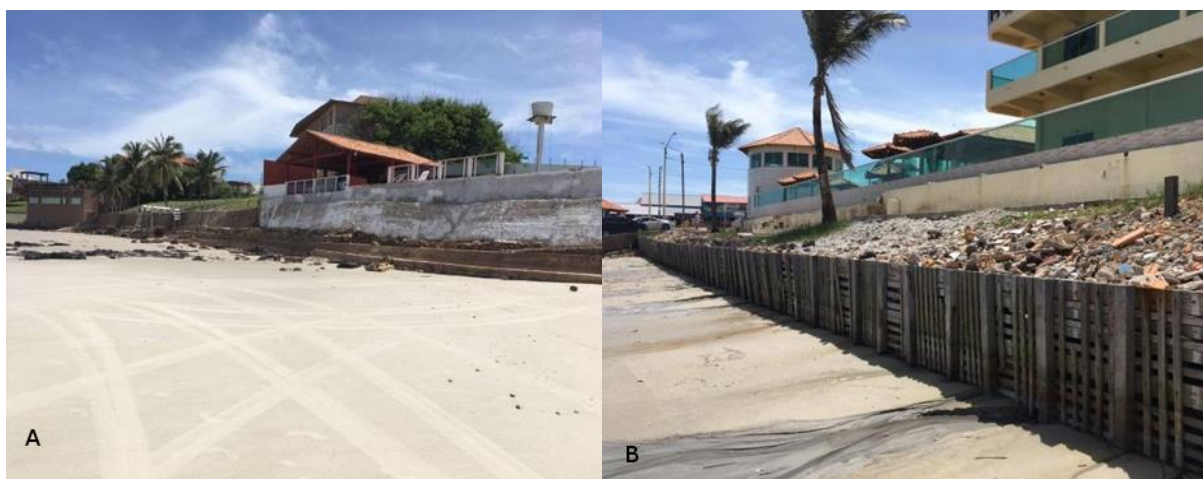


Figura 4: (A) Destruição de estruturas artificiais na praia do Farol Velho. (B) tentativa de proteção com estruturas de madeira e concreto e fragmento de rocha na praia do Atalaia. Fonte: Ronaldo Braga, 01/2017.

⁸De acordo com Ranieri e El-Robrini (2016) em praias equatoriais com as da área de estudo, as modificações significativas nos padrões morfológicos e nas condições oceanográficas sazonais ocorrem em condições extremas (durante o Equinócio ou chuvas mais severas).

Índice de Vulnerabilidade Costeira da Variável Amplitude da Maré - Em Salinópolis a Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN, Marinha do Brasil, faz previsões diárias desde a década de 1950. As previsões para o Salinópolis podem ser consultadas em (www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare).

Comparou-se os valores de Salinópolis com outras estações maregráficas, localizadas em pontos estratégicos do litoral brasileiro. Salinópolis possui a segunda maior amplitude de maré entre os principais pontos de observação desde a Região Sul até a Norte (Figura 5).

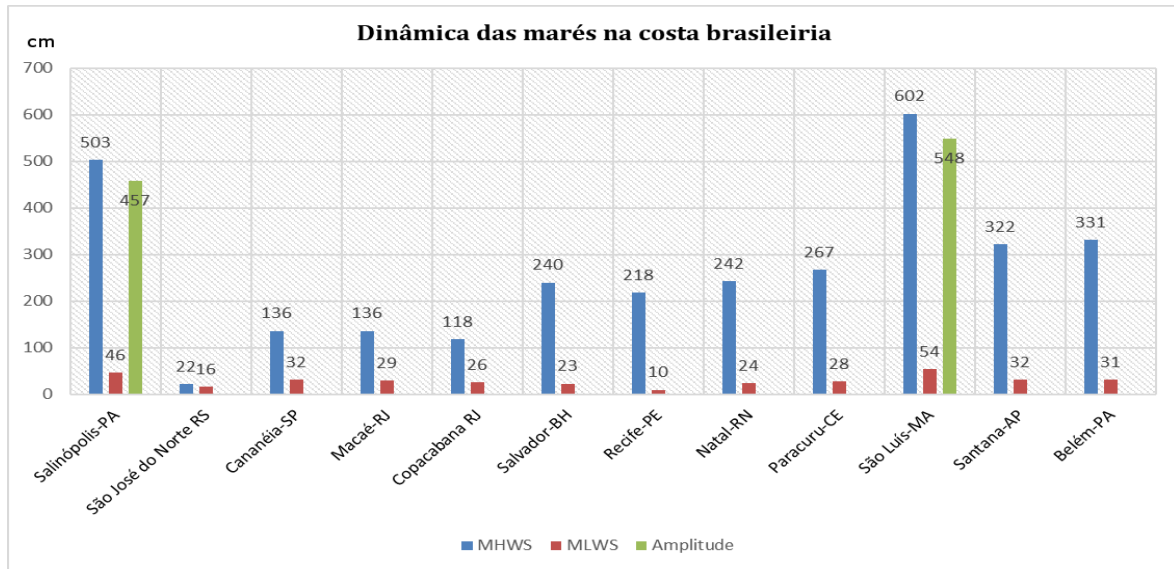


Figura 5: Variação das marés de Sizígia das principais estações maregráficas das Regiões Norte ao Sul do litoral Brasil e em Salinópolis de 2005 a 2016. Fonte: Elaborada pelos autores com dados das Estações Maregráficas-FEMAR e da Tábuas de Mares da Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN.

Também foram realizados os comparativos com os dados da FEMAR 2019 e da análise das Tabuas de marés para o mesmo período de 2005 a 2016. O MHWS calculado foi de 5,04 metros acima do Nível de Redução. Esse valor, é praticamente igual ao valor oficial da FEMAR, de 5,03 metros. A amplitude de maré para os 12 anos foi de 4,71 metros (Figura 6)

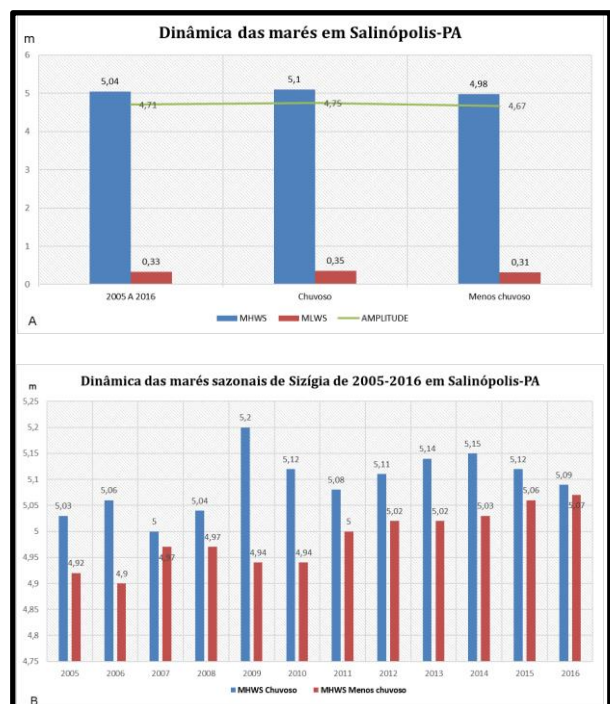


Figura 6: (A) Marés e amplitude de marés de sizígia em Salinópolis para o período de 2005 a 2016. (B) Dinâmica sazonal das marés de sizígia para cada ano no período de 2005 a 2016. Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Tabuas de marés da Diretoria de Hidrografia Nacional-DHN.

A análise das Tábuas de marés para 2005 a 2016 dá um valor de 4,71 metros de amplitude. Esse valor caracteriza a área como de **Alta Vulnerabilidade**. Ranieri e El-Robrini 2016 registraram as maiores marés no período equinocial, meses de março e setembro. No entanto, a Figura 6.B mostra que também a pluviosidade provoca variações nas amplitudes na área.

Índice de Vulnerabilidade da Variável Nível Médio do Mar - Em Salinópolis não há sistema de monitoramento do Nível do Mar e no Brasil, poucos locais fazem parte da **RMPG - Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**, sob controle do IBGE. Os valores do cálculo da variação do NMM em Salinópolis realizados com dados das Tábuas de Marés e do Permanent Service for Mean Sea Level-PSML (PSML, 2017) estão plotados nos gráficos. (Figuras 7 e 8).

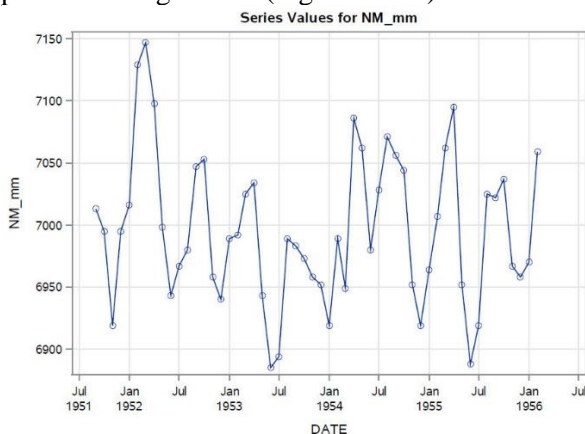


Figura 7: Gráficos das variações do NMM em Salinópolis da série temporal de 1951-1956: para análise de Constante Estimada. Fonte: Elaborado pelos autores com valores da variação do NMM da Permanent Service for Mean Sea Level-PSML (Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL, 2017). (<http://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>).

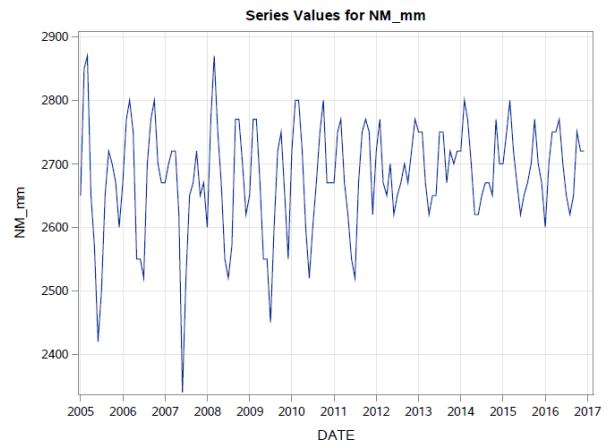


Figura 8: Variação do NMM em Salinópolis da série temporal de 2005-2016 para análise de Constante Estimada. Fonte: Elaborado pelos autores com dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação-DHN. (<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>).

O valor da Constante Estimada para a série temporal de 1951-1956 é de (-0,868 mm/ano) e para a série 2005-2016 é de (-0,1288 mm/ano). Os dois valores estão inseridos no intervalo de **MUITO BAIXA** vulnerabilidade.

A projeção de um metro ou 1000 milímetros (mm) de elevação do NMM para o IVC futuro de 2013 a 2100 resultou em uma variação positiva de 11,49 mm/ano. Esse valor configura em **MUITO ALTA** vulnerabilidade para o parâmetro variação relativa do NMM. (Figura 9).

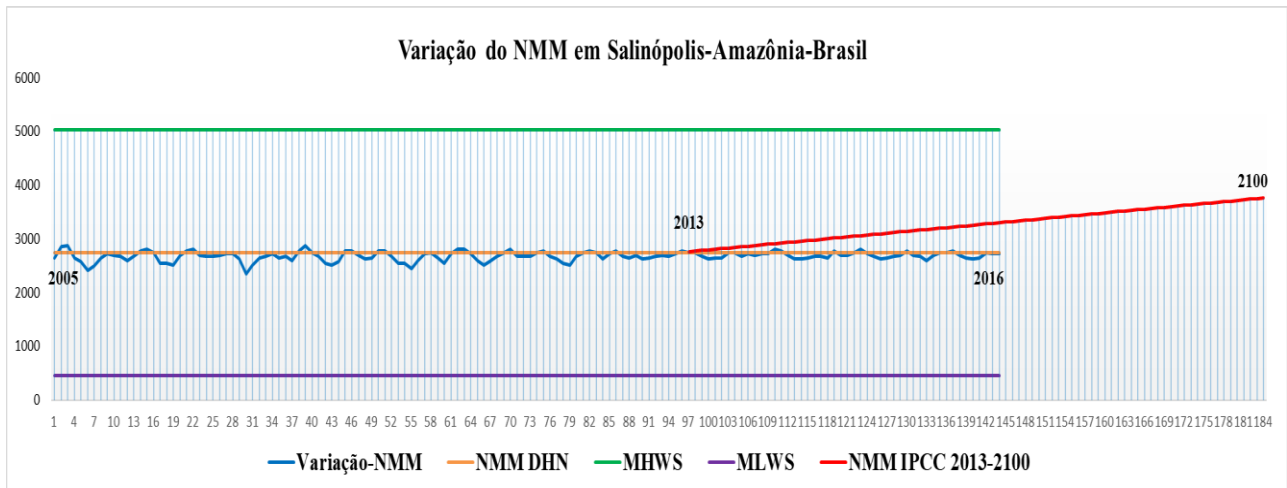


Figura 9: Variação do NMM em Salinópolis (mm). Em azul: variação local para o período 2005 a 2016; em vermelho: projeção de aumento do NMM de 2013 até 2100 (IPCC, 2013); em amarelo: Nível Médio do Mar pelo DHN de 2005 a 2016; em verde: média da maré alta de sizígia (FEMAR); em roxo: média da maré baixa de sizígia (FEMAR).

As séries de 1951-1956 e de 2005-2016 demonstraram uma tendência de recuo do NMM em Salinópolis. Essa constatação serve de base

explicativa para a expansão do manguezal e para o aumento do pacote arenoso em alguns setores da Orla (Figura 10 e 11).

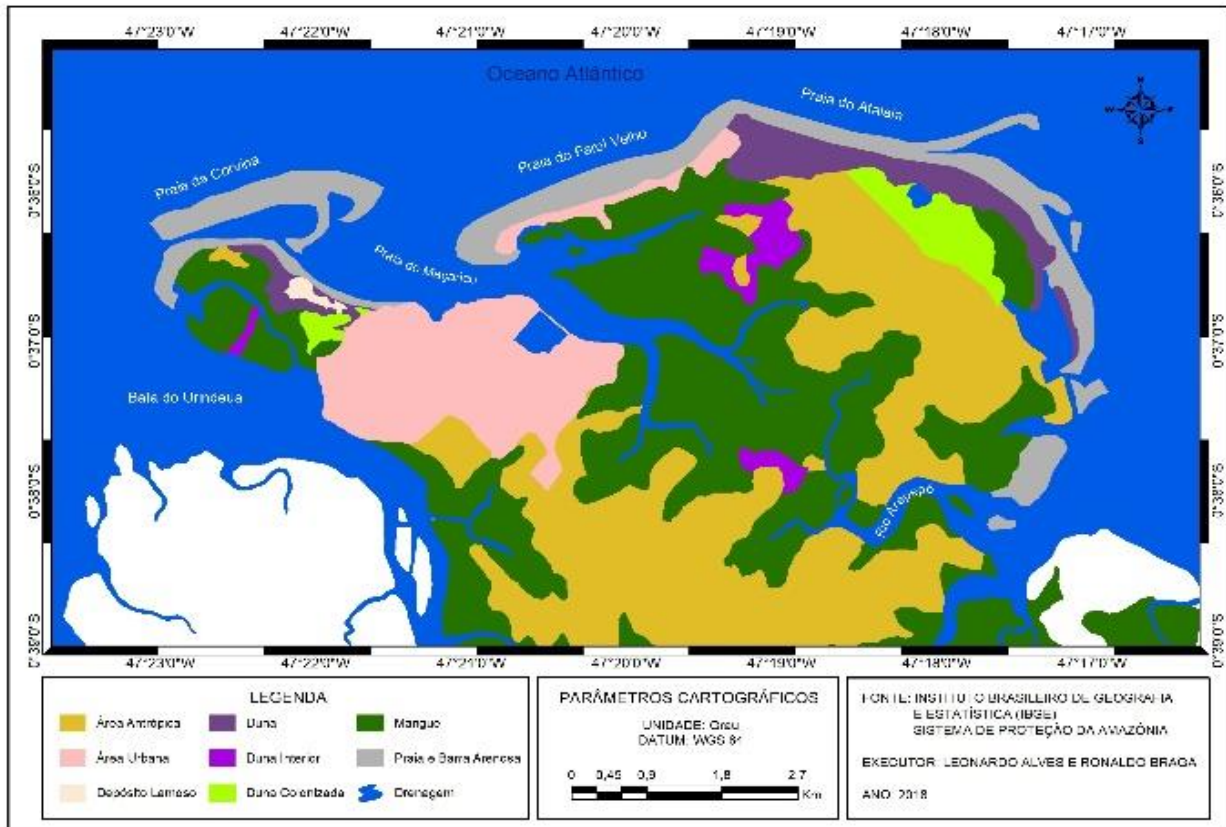


Figura 10: Classificação das principais unidades de paisagem em Salinópolis no ano de 1984.

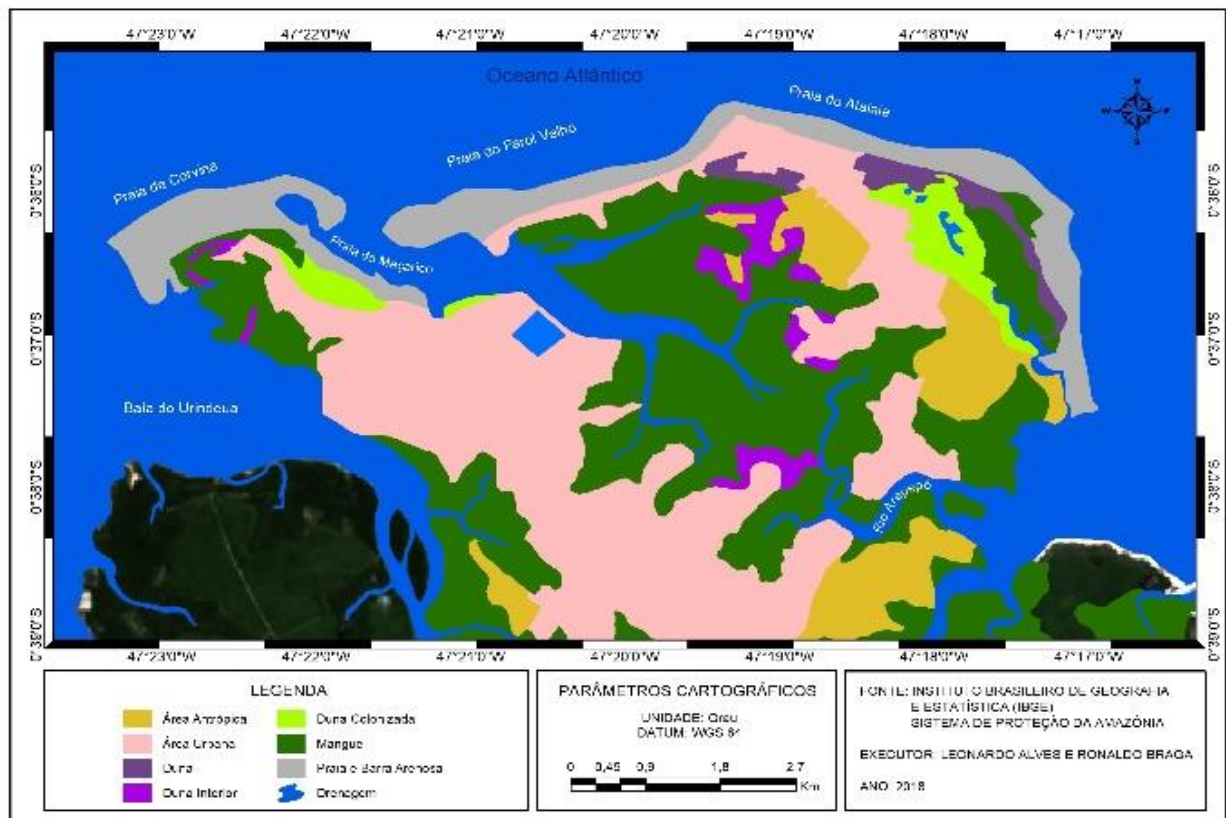


Figura 11: Classificação das principais unidades de paisagem em Salinópolis, ano de 2016.

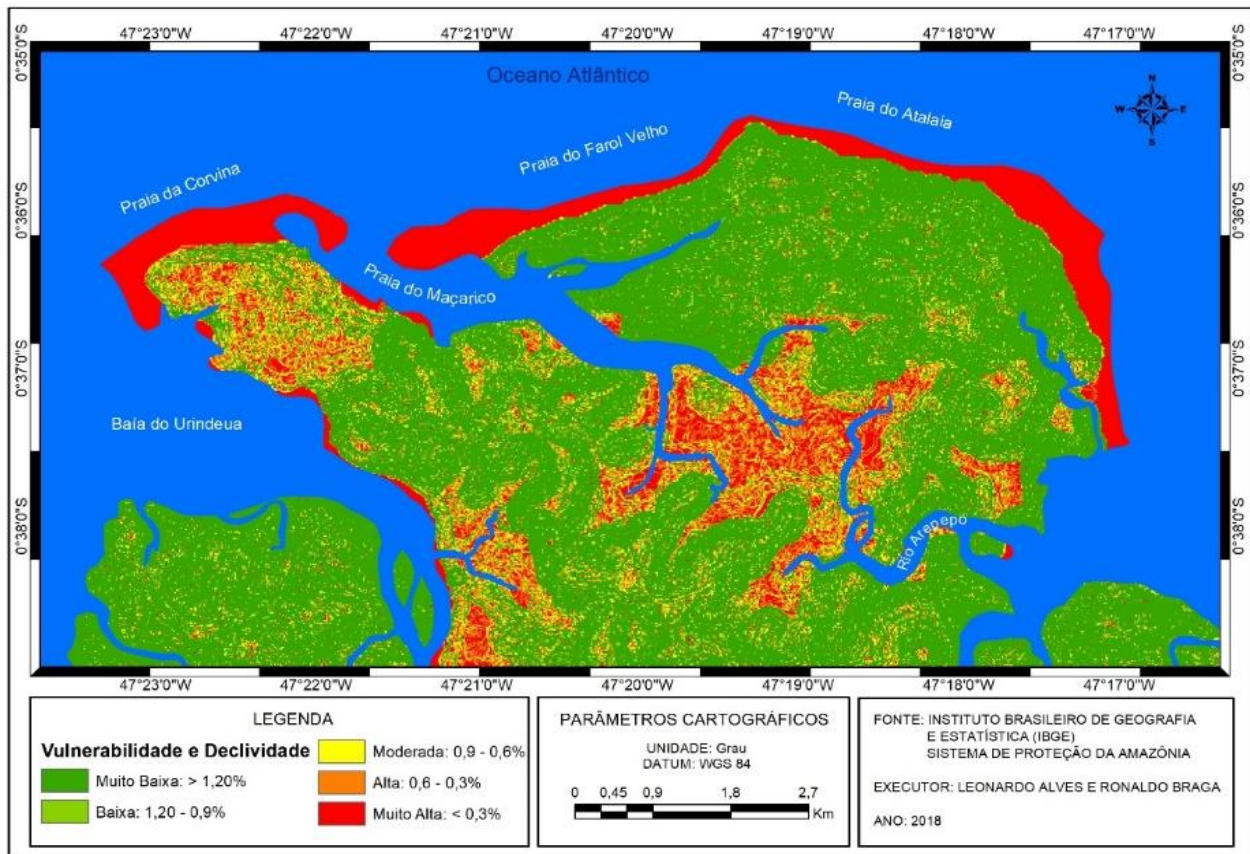


Figura 13: Mapa de declividade da costa de Salinópolis-Pará. Fonte: Elaborado pelo autor com dados de Aerolevanteamento COHAB 2000 e imagens SRTM Shuttle Radar Topographic Mission/U.S. Geological Survey (USGS, 2016).

O aumento da vulnerabilidade em decorrência da diminuição da declividade, configura em Salinópolis uma extensa área sujeita a ser alagada em virtude de um possível aumento do NMM na região. As áreas de falésias, que compõem a Orla da cidade devem funcionar como áreas de contenção de impactos a este aumento do mar. No entanto, assim como as áreas de baixa declividade, as falésias também sofrerão com o processo erosivo. Os setores de praias do Farol Velho e Atalaia, serão fortemente impactados, visto que a baixa declividade permite que o mar alcance extensas áreas do pacote arenoso e da orla continental que atualmente são ocupadas para segunda residência e para infraestrutura da atividade turística.

Variável Taxa de Erosão e Acreção - A dinâmica dos fatores e agentes costeiros em Salinópolis, principalmente ondas, ventos e correntes de marés e longitudinais, além de deslocamentos de células de deriva litorânea, provocam ao longo dos setores costeiros processos de erosão e acreção diferenciados, Ranieri e El-Robrini, 2015. Em Salinópolis as taxas de variação da linha de costa

calculada para os setores costeiros em estudo entre os anos de 1984, 1994, 2004 e 2015 revelaram expressiva dinâmica costeira (Figura 14).

Todos os setores de praias mostram expressivo ganho sedimentar para o período de 31 anos. Nas praias do Maçarico e Corvina esse ganho permitiu a formação de dunas no limite da pós-praia, como também deposição em áreas próximas ao Setor de Falésia Leste. Nas praias do Farol Velho e Atalaia, a deposição e estabilidade arenosa, principalmente a partir da década de 1980, foram acompanhadas pelo processo de urbanização. No Farol Velho, atualmente, quase toda a Orla emersa é ocupada para moradias de segunda residência. Outro setor que apresentou ganho sedimentar foi o de Manguezal II. Os setores de Falésia Oeste e Manguezal I apresentaram perda sedimentar.

A análise multitemporal das imagens orbitais de 1984 a 2015 demonstraram que 47 locais da Orla apresentaram dinâmica costeira no período analisado. O processo de progradação foi predominante sobre o de retrogradação na maioria da Orla (Figura 15).

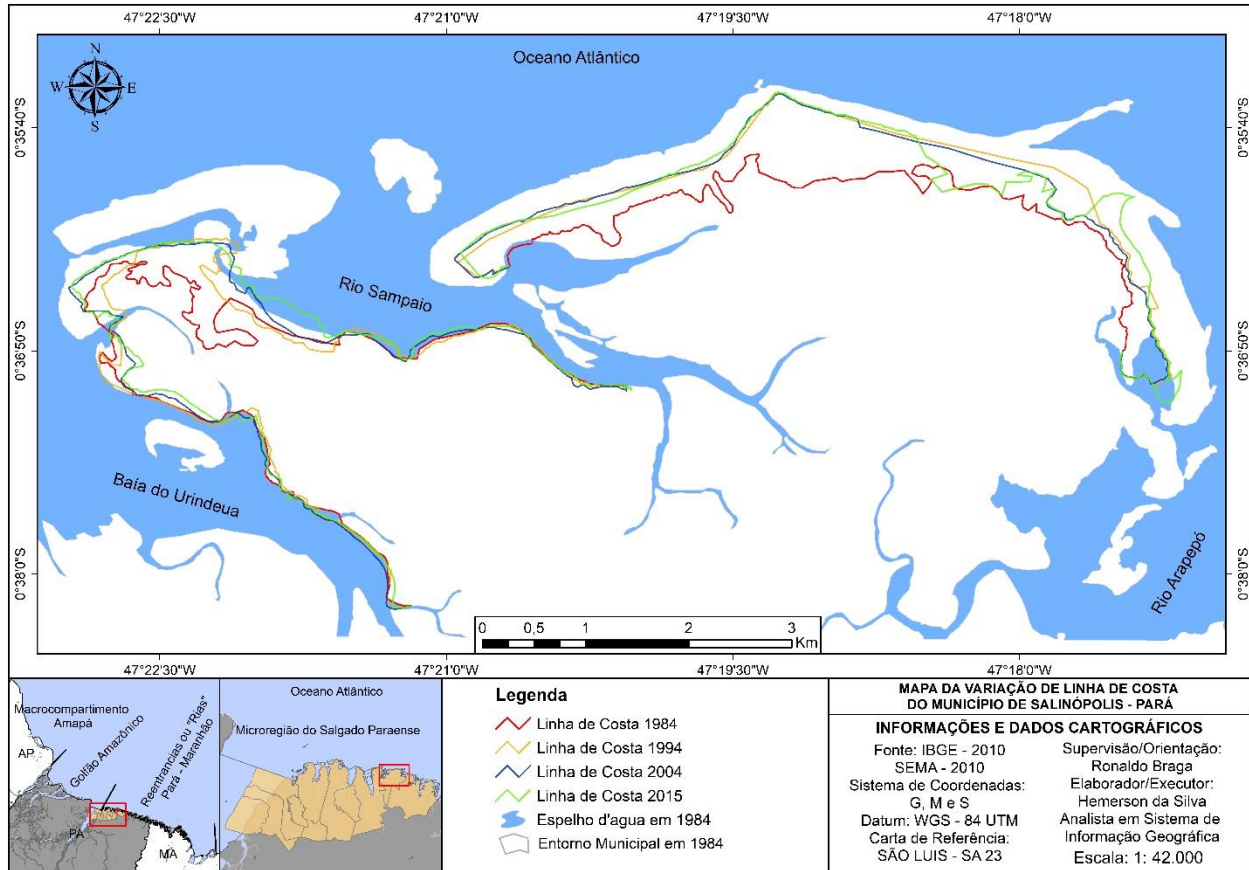


Figura 14: Variação da Linha de costa em Salinópolis nos anos de 1984, 1994, 2004 e 2015.

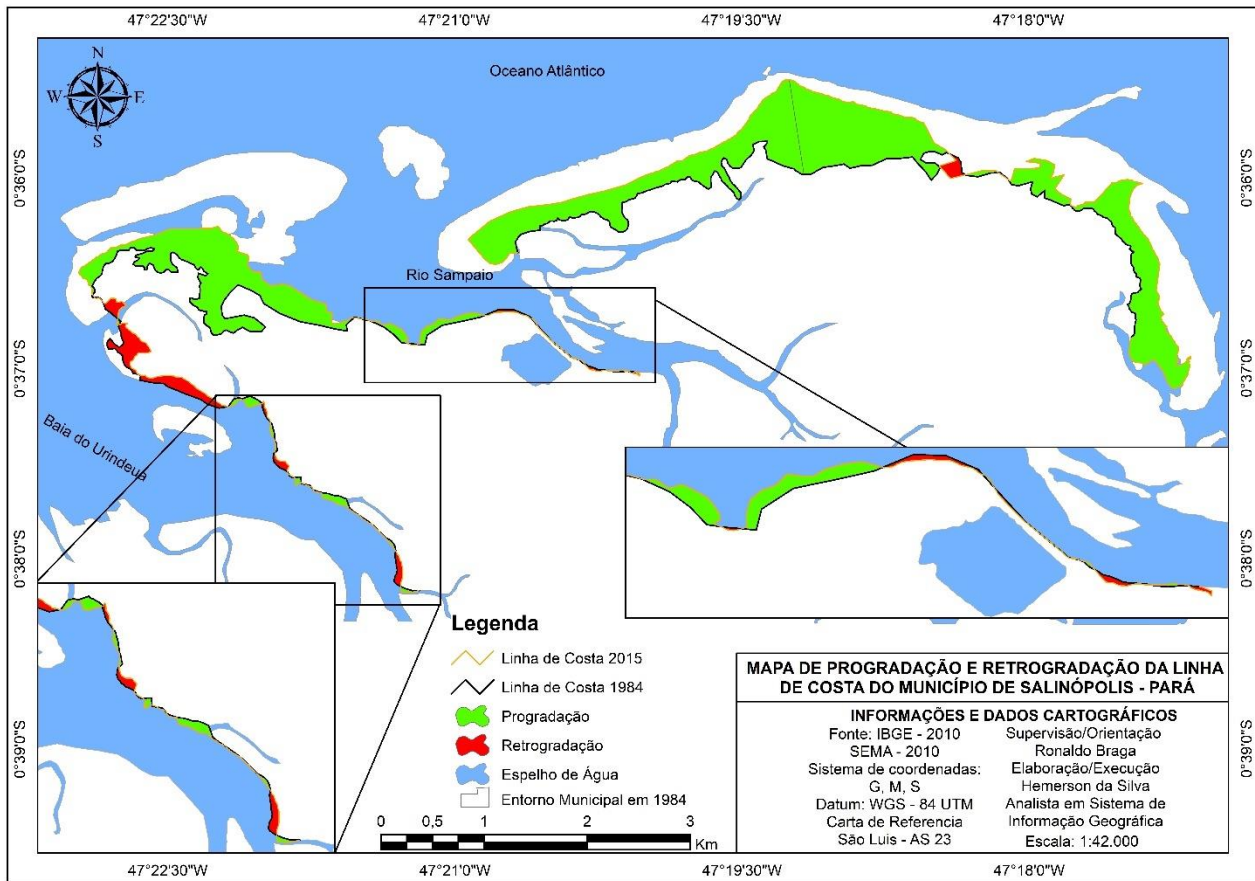


Figura 15. Variação da Linha de Costa em Salinópolis entre os anos de 1984 a 2015.

Com a projeção de um metro de aumento do NMM, a nova linha de costa que se configura, resultará em um intenso processo de retrogradação costeira em Salinópolis. Todos os setores de Orla serão afetados por esse aumento. A localização dos principais sistemas ambientais, praias, manguezais

e dunas e das ocupações humanas em altimetria de até um metro serão diretamente impactados.

O Quadro 4 mostra as taxas de erosão (retrogradação costeira) e acreção (progridação costeira) na área de estudo por setores de Orla para os anos de 1984 a 2015 e para a projeção futura até 2100.

Quadro 4: Taxa de erosão em m² em Salinópolis. Atual: anos de 1984 a 2015 e futura: projeção de um metro de aumento do NMM para o ano de 2100. Fonte: Elaborada pelos autores com análise multitemporal e do cenário RCP8.5 do IPCC 2013.

Setores	Taxa atual de erosão (-) e acreção (+) em m ² entre 1984 a 2015	Vulnerabilidade atual	Taxa futura de erosão (-) e acreção (+) em m ² : projeção para o ano de 2100	Vulnerabilidade futura
Setor Maçarico/Corvina	(+) 27.431,59	Muito Baixa (1)	(-) 1.785.652	Muito Alta (5)
Praia do farol velho	(+) 31.730,89	Muito Baixa (1)	(-) 1.458.663	Muito Alta (5)
Praia do Atalaia	(+) 46.520,72	Muito Baixa (1)	(-) 2.200.740	Muito Alta (5)

Costa de Falésias Leste	(+) 1.664,37	Muito Baixa (1)	(-) 108.292	Muito Alta (5)
Costa de Falésias Oeste	(-) 188,511	Muito Alta (5)	(-) 116.099	Muito Alta (5)
Setor Manguezal I	(-) 4.712,74	Muito Alta (5)	(-) 306.762	Muito Alta (5)
Setor Manguezal II	(+) 299,13	Muito Baixa (1)	(-) 191.855	Muito Alta (5)

O processo acelerado de urbanização demográfica evidenciado desde a década de 1980 em Salinópolis tem provocado mudanças na tipologia da Orla costeira. As Orlas do Farol Velho e Atalaia que não eram urbanizadas, atualmente são parcialmente urbanizadas ou até mesmo urbanizadas em alguns setores. Considerando à elevação do NMM futura, onde esses espaços se apresentarão em Muito Alta vulnerabilidade, estando sujeitas aos processos erosivos e de inundação, as populações residentes ou estruturas construídas, serão impactadas.

Variável Cota Topográfica - A identificação e análise diferenciada por setores costeiros da topografia é uma das variáveis mais importantes

para a determinação da vulnerabilidade à elevação do nível do mar. De acordo com considerações de Tagliani 2006 e Gutierrez 2014 existe um limite máximo altimétrico de alcance do nível do mar sobre o continente, conhecido como a Zona Costeira de Baixa Elevação, que compreende a cota topográfica de 10 metros acima do Nível Médio do mar.

Em Salinópolis, essa Zona Costeira de Baixa Elevação (Figura 15) é composta principalmente pelas unidades de praias, planícies de marés e algumas formações de dunas. A classificação quanto ao grau de vulnerabilidade dos sete setores costeiros selecionados no Município ficou da seguinte forma (Tabela 5).

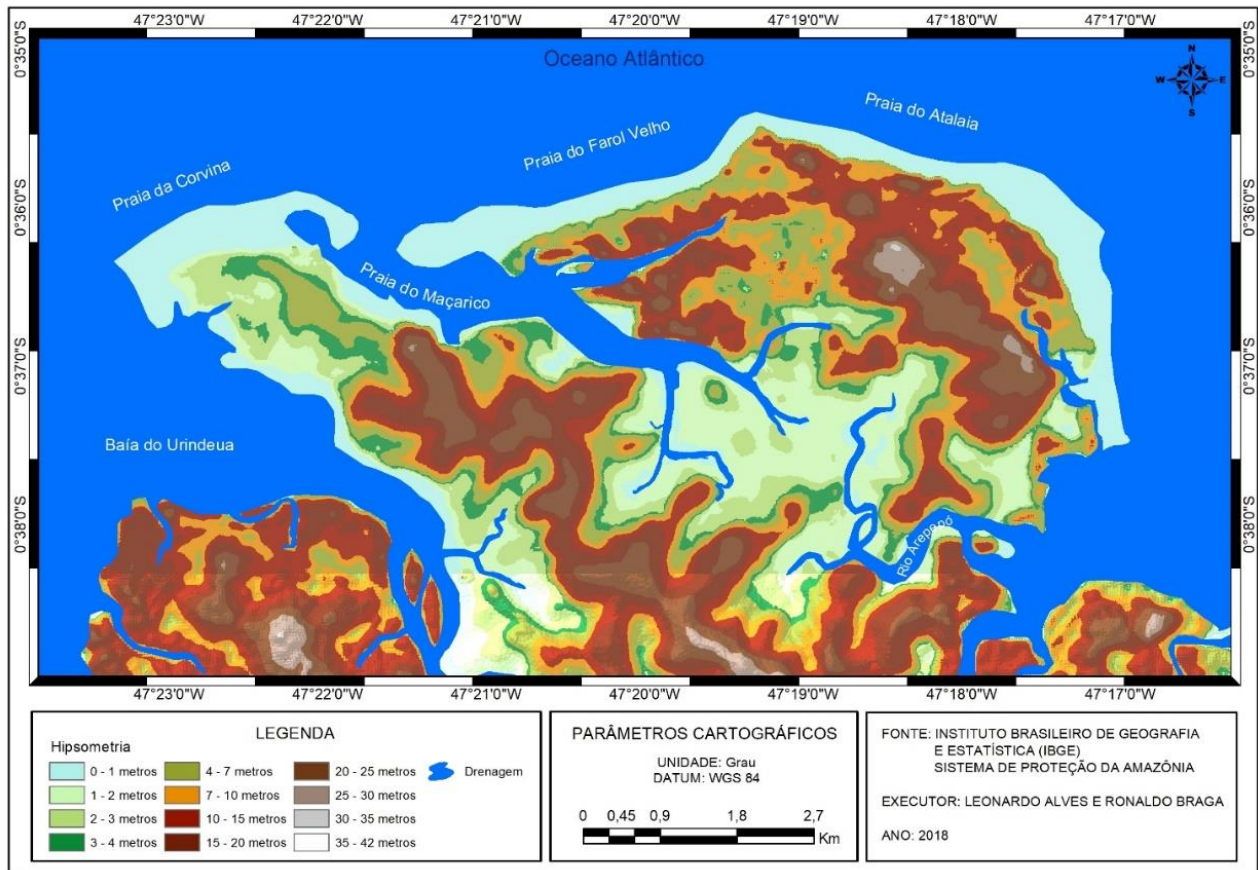


Figura 16: Mapa hipsométrico de Salinópolis para determinação da vulnerabilidade do parâmetro Cota Topográfica. Os intervalos altimétricos de 1 a 10 metros constitui a Zona Costeira de baixa Elevação. Fonte: Elaborado pelos autores com dados de imagens SRTM/USGS e pontos de Aerolevantamento realizado pela Companhia de Habitação do Pará (COHAB, 2000).

Tabela 5: Vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar para o parâmetro Cota Topográfica por Setores Costeiros em Salinópolis-Pará.

Setores costeiros em Salinópolis	Vulnerabilidade Cota Topográfica (m)
Costa de praias arenosas Maçarico/Corvina	≤ 5 Muito Alta
Setor de falésias Leste	$> 5 \leq 10$ Alta
Setor de Falésias Oeste	$> 5 \leq 10$ Alta
Setor de Manguezais Leste I	≤ 5 Muito Alta
Setor de Manguezais Leste II	≤ 5 Muito Alta
Praia do farol Velho	≤ 5 Muito Alta
Praia do Atalaia	≤ 5 Muito Alta

Fonte: elaborado pelos autores

A baixa cota topográfica que domina todo o litoral Norte de Rias da Zona Costeira Amazônica forma uma extensa ZCBE em Salinópolis. Os eventos transgressivos do Mioceno e Quaternário que inundaram toda essa região (Rossetti, 2006), formaram uma extensa planície costeira de baixa topografia e, como consequência, atualmente essa

baixa topografia aumenta a vulnerabilidade regional a uma possível subida do mar.

Matriz de Vulnerabilidade à elevação do Nível do Mar

A Tabela 6 mostra a síntese dos valores de vulnerabilidade costeira para cada variável e o

Índice de Vulnerabilidade Costeira Geral (IVCG)
por setores de Orla analisado.

Tabela 6: Matriz de vulnerabilidade e Índices de Vulnerabilidade Costeira Geral – IVCG à elevação do NMM em Salinópolis. (GM: Geomorfologia, AO: Altura da Onda, CT: Cota Topográfica, DC: Declividade da Costa, AM: Amplitude de Maré, TE: Taxa de Erosão, NMM: Nível Médio do Mar).

Setores costeiros	Parâmetros de Vulnerabilidade										IVCG Atual	IVCG futuro
	GM	AO	CT	DC	AM	TE Atual	TE Futura	NMM Atual mm/a	NMM 2100 mm/a			
Costa de praias arenosas Maçarico/Corvina	5	2	5	5	4	1	5	1	5	11,95 Moderado	26,72 Muito Alta	
Setor de falésias Leste	4	1	4	1	4	1	5	1	5	2,64 Baixo	15,11 Alta	
Setor de Falésias Oeste	1	1	4	1	4	5	5	1	5	3,38 Baixo	7,55 Baixo	
Setor de Manguezais I	5	1	5	5	4	5	5	1	5	18,89 Alto	42,25 Muito Alto	
Setor de Manguezais II	5	1	5	5	4	1	5	1	5	8,45 Baixo	42,25 Muito Alto	
Praia do farol Velho	5	3	5	5	4	1	5	1	5	14,63 Moderado	73,19 Muito Alto	
Praia do Atalaia	5	5	5	5	4	1	5	1	5	18,89 Alto	94,49 Muito Alto	
Média										11,26 Moderado	43,08 Muito Alto	

A Figura 16 mostra o IVCG atual e futuro para cada setor de orla estudado. A vulnerabilidade atual destaca as sete variáveis geológicas/geomorfológicas e oceanográficas

analisadas, e a vulnerabilidade futura destaca as duas variáveis projetadas (Taxa de erosão e Variação do NMM) e o IVCG resultante.

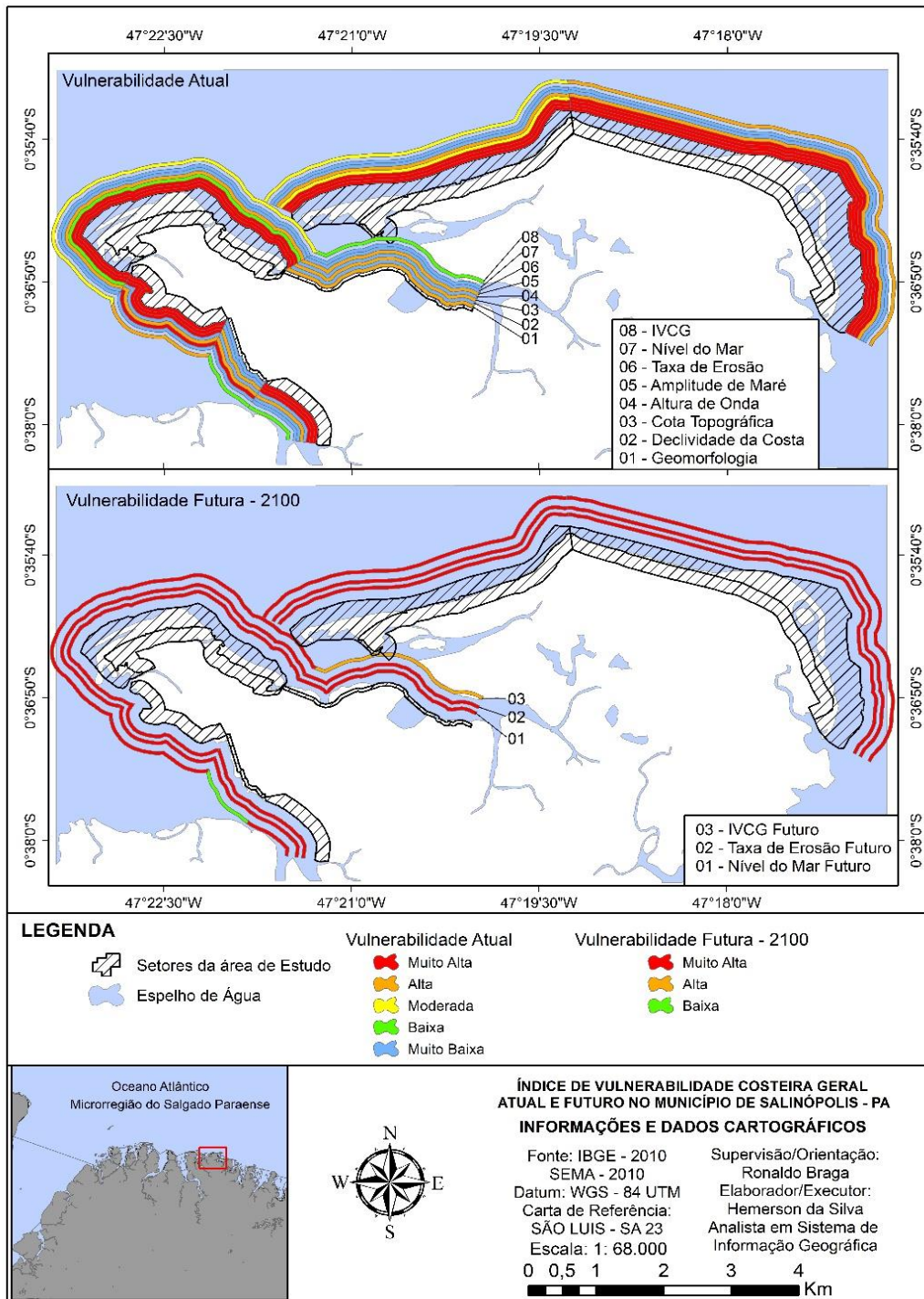


Figura 17: Mapa síntese das variáveis analisadas por setor de orla e o Índice de Vulnerabilidade Costeira Geral atual e futuro resultante.

Nos setores de Orla costeira analisados têm-se o IVCG atual Moderado para os setores de praias do Maçarico/Corvina e Farol Velho, Baixo para os setores de Falésia Leste, Falésia Oeste e Manguezal II e Alto para os setores de Manguezal I e Atalaia.

O IVCG futuro é resultante da inserção de valores projetados das variáveis: taxa de erosão futura e variação relativa do NMM projetadas para

o ano de 2100. Com essa mudança, a maioria da Orla de Salinópolis se apresenta em Alta e Muito Alta vulnerabilidade, com exceção do setor de Falésia Oeste, que apresenta Baixo IVCG.

A vulnerabilidade Muito Alta futura à elevação do NMM se apresenta em uma extensão de aproximadamente 22.748 km de Orla em Salinópolis, envolvendo os Setores das praias do Maçarico/Corvina, Farol Velho e Atalaia e os de

Manguezal I e II. Os impactos diretos provenientes dessa classificação se materializarão em forma de inundação e erosão.



Figura 18: Hotel construído à 50 metros de distância da linha de espraiamento das ondas em maré alta e a 7 metros do Nível Médio do Mar, localizado na área central da praia do Atalaia.

A maior parte da área da Orla da praia do Atalaia e Farol Velho é ocupada por hotéis e moradias de alto padrão, localizados na Zona Costeira de Baixa Elevação. O aumento de um metro do NMM, associado com as altas amplitudes de marés de média de 4,71 metros, aumentarão a frequência de áreas das inundações e intensificarão o processo erosivo, colocando em risco direto, tanto a rede hoteleira como as residências. A área do hotel descrito (Figura 18) já sofre com infiltrações em marés altas, principalmente as de sizíguas equinociais.

Os impactos indiretos podem afetar, principalmente, a economia baseada na pesca e no turismo. O novo modelo do setor de turismo, cuja infraestrutura já está sendo implantada na Ilha do Atalaia começará a funcionar a partir do ano de 2020. O modelo consiste na construção de Resorts, que certamente serão atrativos maiores e aumentarão o fluxo turístico (Figura 19).



Figura 19: A) Resort em fase final de construção; B) Resort em fase avançada de construção; C) Apartamento modelo do Resort Aqualand em fase inicial de construção; D) Propaganda para venda e área do Resort com obras ainda não iniciadas.

Todos esses empreendimentos estão localizados ao longo da estrada que dá acesso as duas praias mais frequentadas pelos turistas: Farol Velho e Atalaia. Somente nas férias de julho do ano de 2015 a Secretaria Municipal de Meio Ambiente SEMMA, 2015. Calculou cerca de 300.000 turistas, a maioria se deslocando para essas duas praias. Os novos empreendimentos de alto padrão de qualidade têm como objetivo aumentar o número de turistas.

No entanto, os processos físicos que se desencadearão com a aumento do NMM em Salinópolis projeta a perda de aproximadamente 5.500 m² do pacote arenoso das quatro principais praias do Município, principal local dos turistas, o que certamente comprometerá a economia baseada no turismo e as atividades a ela relacionada.

A carência de estudos atuais e de projeções por parte da gestão municipal e regional, para conhecimento da dinâmica física dos fatores e agentes costeiros responsáveis pelo equilíbrio dinâmico e sistêmico da Orla de Salinópolis, ainda se constitui em uma das maiores problemáticas ambientais da área. Esse fator impede que políticas públicas sejam realizadas e projetadas para a melhoria da qualidade social e ambiental do Município.

Conclusões

A análise da vulnerabilidade física para a determinação do Índice de Vulnerabilidade Costeira Geral à elevação do NMM em Salinópolis foi possível devido à visão sistêmica dos fatores e agentes responsáveis pela dinâmica costeira local.

Com essa análise foi possível a determinação de dois índices em diferentes escalas temporais, utilizando variáveis geológicas/geomorfológicas e oceanográficas: o IVCG atual e o futuro,

Na classificação do IVCG atual não foram identificados índices Muito Alto em nenhum setor de Orla, isso ocorreu, devido aos baixos valores de Altura da Onda, da Declividade da Costa e, principalmente, da variação relativa do NMM. Os valores da Constante Estimada, obtidos através das duas séries temporais, demonstrou que o mar em Salinópolis está recuando. Este recuo tem provocado avanço da vegetação de mangue e deposição de sedimentos arenosos em alguns setores.

Por tanto, a análise conclui que a orla atual de Salinópolis não está sendo impactada pelo avanço do mar resultante do aumento do seu Nível Médio. Os impactos de erosão e inundação observados são resultantes, principalmente, da fisiografia local, da alta amplitude de maré e da ocupação antrópica irregular.

O IVCG Muito Alto futuro se especializa longitudinalmente na maioria da Orla costeira Municipal. Essa classificação é devida, principalmente ao avanço do NMM projetado com aumento um metro para o ano de 2100, equivalente a um aumento de 11,49 mm/ano. Caso a projeção se confirme, os impactos serão evidenciados sobre os ecossistemas da área, economia e infraestrutura.

A metodologia utilizada para determinação do IVCG pode ser replicada para outros setores da Zona Costeira Amazônica, considerando as particularidades locais para a determinação dos valores das variáveis.

A determinação do IVCG futuro na Orla de Salinópolis é um instrumento de subsídio para o planejamento costeiro, através da implementação de políticas públicas relacionadas aos processos erosivos, de inundação e de estratégias de adaptação da população ICLEI, 2017. Ressalta-se, que essa pesquisa comprometeu-se com a gestão Municipal atual em repassar os resultados, para servir de informação complementar a ser utilizada em futuras políticas públicas na Orla costeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Deus pela vida. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – IFPA/Belém pelo auxílio financeiro e pelo progresso da pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – PPGCA/EMBRAPA/MPEG e a todos que colaboraram com este trabalho de Tese.

Referências

Abuodha, P.A.; Woodroffe, C.D, 2006. Assessing vulnerability of coasts to climate change: A review of approaches and their application to the Australian coast. University of Wollongong. Disponível: <http://ro.uow.edu.au/scipapers/161>. Acesso: 02 mai. 2016.

Almeida, L.Q., Welle, T., Birkmann, J, 2016. Disaster Risk Indicators In Brazil: A Proposal Based On The World Risk Index, International Journal of Disaster Risk Reduction [Online] 17. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>. Acesso: 07 fev. 2019.

Bezerra, D.S., 2014. Modelagem da dinâmica do manguezal frente à elevação do nível do mar. São José dos Campos: INPE, Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre), pp 89.

Boruff, B.J., Emrich, C., Cutter, S.L., 2005. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. Journal of Coastal Research [Online] 21.5. Disponível: <https://doi.org/10.2112/04-0172.1>. Acesso: 19 de abril de 2017.

BRASIL. DNPM. 1973., Projeto RADAM. Folha SA.23-São Luís e parte da Folha SA.24-Fortaleza; geologia, geomorfologia: solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.

Cazenave, A., Cozannet, G.L 2014. Sea level rise and its coastal impacts. Earth's Future [Online] 2. Disponível: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2013EF000188>. Acesso: 07 fev. 2019.

CPTEC/INPE., 2017. Centro de previsão de tempo e estudos climáticos. Disponível: <http://www.cptec.inpe.br/> Acesso em 20 de mai. 2017.

Dou T. F.; Xiao, C. D., 2016. An overview of black carbon deposition and its radiative forcing over the Arctic. Science Direct Advances in Climate Change Research [Online] 7/3. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2016.10.003>. Acesso: 07 fev. 2019.

Cohab. 2000. Companhia de Habitação do Estado do Pará. Aerolevantamento de Salinópolis. (CD-ROOM, Digital).

Conti, L.A., Rodrigues, M. 2011. Variação da Linha de Costa na Região da Ilha dos Guarás – PA Através de Análise de Série Temporal de Imagens de Satélites. Revista Brasileira de Geografia Física 05, 922-937.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação., 2019. Marinha do Brasil. Disponível: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/index.htm>. Acesso: 07 fev. 2019.

El-Robrini, M., Silva, M.M.A., Souza Filho P.W.M., El-Robrini, M.H.S., Silva Júnior O.G., França, C.F., 2006. Erosão e progradação no Pará In: Muehe, D. (Org), Erosão e Progradação no Litoral Brasileiro. MMA, Brasília. Disponível: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/gestao-territorial/category/80-gestao-costeira-g-erosao-e-progradacao.html>. Acesso: 07 fev. 2019.

FEMAR. Fundação de Estudos do Mar., 2019. Disponível: <https://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/e>

- mb/indice.html#amapaepara. Acesso:07 fev. 2019.
- Ferrol-Schulte, D., Gorris, P., Baitoningsih, W., Adhuri, D., Ferse, S.C.A., 2015. Coastal livelihood vulnerability to marine resource degradation: A review of the Indonesian national coastal and marine policy framework. *Marine Policy* [Online] 52. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.09.026>. Acesso: 07 fev. 2019.
- Fernandez, J.M., Bértola, G.R., Campo, A.M., 2017. Aplicación del índice de vulnerabilidad costera (CVI) a los barrios costeros del partido de mar chiquita, Buenos Aires, Argentina. *GEOACTA* [Online] 42. Disponível: <http://ppct.caicyt.gov.ar/index.php/geoacta/articulo/view/9275>. Acesso: 20 fev. 2019.
- Germani, Y. F., Figueredo, S.A., Tagliani, C.R.A., 2015. Vulnerabilidade costeira e perda de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management* [Online]15(1). Disponível: <http://dx.doi.org/10.5894/rgci540>. Acesso: 13 nov. 2017.
- Gornitz, V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section/Elsevier Science)* [Online] 89. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90173-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90173-O). Acesso: 01 ago. 2016.
- Gutierrez, B.T., Plant, N.G., Pendleton, E.A.; Thieler, E.R., 2014. Using a Bayesian Network to predict shore-line change vulnerability to sea-level rise for the coasts of the United States. *U.S. Geological Survey*, Reston, VA. Disponível: <https://doi.org/10.3133/ofr20141083>. Acesso: 25 out. 2017.
- ICLEI.2017. Governos locais pela sustentabilidade. Guia de Ação Local pelo Clima. São Paulo:Iclei, 2017, 96p. Disponível: <http://sams.iclei.org/noticias/noticias/arquivo-de-noticias/2016/guia-sobre-acao-local-pelo-clima-apresenta-roteiro-pratico-para-gestores-municipais-enfrentarem-as-mudancas-climaticas.html>. Acesso: 08 fev. 2019.
- IPCC. Summary for Policymakers, 2013. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. Summary for policymakers, 2014 In: *Climate Change. Impacts, daptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kantamaneni, K., 2016. Coastal infrastructure vulnerability: an integrated assessment model. *Nat. Hazards* [Online] 84. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-016-2413-y>. Acesso: 08 fev. 2019.
- Kantamaneni, K., Phillips, M., Thomas, T., Jenkins, R., 2018. Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. *Ocean & Coastal Management* [Online] 158. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.039>. Acesso: 07 fev. 2019.
- Mehvar, Seyedabdolhossein., Filatova, T., Sarker, M. H., Dastgheib, Ali., Ranasinghe, R., 2019. Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands: A case study in the West coast of Bangladesh [Online] 169. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.009>. Acesso: 08 fev. 2019.
- Miguens, A.P., 1996. Navegação: a ciência e a arte. 1ª ed. DHN, Brasil, Rio de Janeiro.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente., 2008. *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*, Brasília: ISBN 978-85-7738-112-8.
- Muehe, D., Nicolodi, J., 2008. Geomorfologia. In: *MMA (Org), Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. MMA, Brasília, 23-40.*
- Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K., Woodroffe, C.D., 2016. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability índices. *Ocean & Coastal Management* [Online] 123. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>. Acesso: 07 fev. 2019.

- Nicholls, R. J.; Hanson, S. E.; Lowe, J. A.; Warrick, R. A.; Lu, X.; Long, A. J., 2014. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. WIREs Clim Change [Online] 5. Disponível: <https://doi.org/10.1002/wcc.253>. Acesso: 10 ago. 2017.
- Niell, E.R., Kousky, C., Thompson, A.W., 2017. Threatened protection: Sea level rise and coastal protected lands of the eastern United States. Ocean & Coastal Management. [Online] 137. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.12.014>. Acesso: 08 fev. 2019.
- NOAA. Administração Oceânica e Atmosférica Nacional. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2017. Disponível: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/graph.html>. Acesso em setembro de 2017.
- Novelli, Y.S., Sierra, E.J., Vale, C.C., Bernini, E., Rovai, A.S., Pinheiro, M.A, Schmidt, A.J., Almeida, R., Júnior, C.C., Menghini, R.P., Martinez, D.I., Guilherme, M.O, Lignon, M.C., Sarubo, S.C., Freitas, J.S., Molero, G.C., 2016. Climate changes in mangrove forests and salt marshes. Brazilian Journal of Oceanography. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-875920160919064sp2>. Acesso: 08 fev. 2019.
- PNA/MMA., 2016. Plano nacional de adaptação: zonas costeiras. In: O Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. MMA, Brasília. Disponível: <http://www.mma.gov.br/clima/adaptacao/plano-nacional-de-adaptacao>. Acesso: 07 fev. 2019.
- Projeto Orla, 2006: Fundamentos para gestão integrada/Ministério do Meio Ambiente, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. MMA, Brasília.
- PSMSL. Permanent Service for Mean Sea Level, 2017. Data. Disponível: <https://www.psmsl.org/data/obtaining/map.html>. Acesso: 05 abr. 2016.
- Qu, Y., Jevrejeva, S., Jackson, L.P., Moore, J.C., 2019. Coastal Sea level rise around the China Seas. Global and Planetary Change. [Online] 172. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.11.005>. Acesso: 08 fev. 2019.
- Ramesh, R., Chen, Z., Cummins V., Day J., D'elia, C., Dennison B., Forbes D.L., Glaeser, B., Glaser, M., Glavovic, B., Kremer, H., Lange, M., Larsen, J.N., Tissier, M., Le., Newton, A., Pelling, M., Purvaja, R., Wolanski, E., 2015. Land–Ocean Interactions in the Coastal Zone: Past, present e future. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.005>. Acesso: 12 jun. 2017. DOI: 10.22456/1807-9806.78121.
- Ranieri, L.A., El-Robrini. M., 2015. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil [Online] 42 (3). Disponível: https://www.researchgate.net/publication/286458986_Evolucao_da_linha_de_costa_de_Salinopolis_Nordeste_do_Para_Brasil. Acesso: 22 jul. 2017.
- Ranieri, L. A.; El-Robrini, M., 2016. Condição Oceanográfica, Uso e Ocupação da Costa de Salinópolis (Setor Corvina – Atalaia), Nordeste do Pará, Brasil [Online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5894/rgci565>. Acesso: 22 jun. 2017.
- Ren, G.Y., 2015. Urbanization as a major driver of urban climate change [Online] 6. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.accre.2015.08.003>. Acesso: 28 abr. 2018.
- Rossetti, D.F., 2006 Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão [Online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.5327/S1519-74X2006000300003>. Acesso: 16 dez. 2015.
- Santos, M.S.T., Amaro, V.E., Ferreira, A.T.S., Barboza, A.A., Figueiredo, M.C, Araújo, AG., 2015. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à elevação do nível médio do mar (NMM) em escala local [Online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400040>. Acesso: 19 mar. 2016.
- SEMMA. Secretaria Municipal de Meio de Ambiente de Salinópolis. Salinópolis, 2015.
- Souza, G.B.N.; Rocha, G.M., 2018. Ordenamento territorial na ilha do Atalaia, Salinópolis (PA): uma análise a partir dos diferentes trechos de ocupação. Revista do IHGP. [Online] 5. Disponível: <http://ihgp.net.br/revista/index.php/revista/artic le/view/100>. Acesso: 07 fev. 2019.
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P.; McNeill, J., 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives [Online] 369. Disponível: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/369/1938/842>. doi: 10.1098/rsta.2010.0327. Acesso: 11 mar. 2018.
- Tagliani, C.R.A., Conterat, M.R., Antiqueira, J.A.F., Calliari, L.J., Tagliani, P.R., Soares, M.N., 2006. Construção de um modelo digital de elevação digital de terreno para Ilha dos Marinheiros, Rio Grande, RS, com uso de

- DGPS e rotinas de geoprocessamento. Gavel 4, 89-98.
- Thieler, E.R., Martin, D., Ergul, A., 2003. The digital shoreline analysis system, version 2.0: shoreline change measurement software extension for ArcView, USGS. Disponível: <http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version2/index.htm> 2003. Acesso: 14 dez. 17.
- USGS. U.S., 2016. Geological Survey, 2016. Disponível: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso: 16 mai. 2016.
- Ventura, C., Sousa, J., Fernandes, A., 2017. Os estuários e as relações climáticas: impactos da subida do nível médio das águas do mar em Vila Franca de Xira. CEGOT [Online] 11. Disponível: <http://dx.doi.org/10.17127/got/2017.11.015>. Acesso: 20 fev. 2019.
- Wang, G., Liu, Y., Wang, H., Wang, X., 2014. A comprehensive risk analysis of coastal zones in China. Estuar. Coast. Shelf Sci [Online] 140. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.019>. Acesso: 08 fev. 2019.
- Wenneker, I., Spelt, B., Peters, H., Ronde, J., 2016. Overview of 20 years of fieldmeasurements in the coastal zone and at the Petten sea dike in the Netherlands. Coastal Engineering [Online] 109. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.12.009>. Acesso: 08 fev. 2019.
- Zanetti, V.B., Sousa Junior, W.C., Freitas, D.M. A Climate Change Vulnerability Index and Case Study in a Brazilian Coastal City. Sustainability [Online] 8/811. Disponível: <https://www.mdpi.com/2071-1050/8/8/811>. Acesso: 07 fev. 2019.
- Zhou, W.L., Jin, N., Zheng, L., Wu, G.X., 2015. From global change to Future Earth in China [Online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.10.001>. Acesso: 22 mai. 2018.