

Coastal Vulnerability Index of the municipality of São Gonçalo do Amarante (Ceará) in Relation to Rising Sea Levels

Débora Lopes*, Cynthia R. Duarte**, Maykon T. da Silva***, Eduardo V. Freires****

* deboranogueira@hotmail.com.br (autor correspondente)

** cynthia.duarte@ufc.br

*** maykontargino@hotmail.com

**** eduardovgeo@gmail.com

Received 9 March 2023; accepted 22 September 2023

Abstract

Satellite images, when submitted to PDI techniques and integrated in a GIS environment, allow for the assessment of changes in landscape, correlating trends and variability and yielding an understanding of environmental condition changes. This research determined the Coastal Vulnerability Index (CVI) of the municipality of São Gonçalo do Amarante (Ceará), to highlight the areas that present greater vulnerability based on the analysis of six variables (geomorphology, coastline change rates, coastal slope, mean tide range, mean significant wave height and mean sea level) that were quantifiable in relation to coastal vulnerability to sea level rise. It was found that 63.13% of the mapped coastline displayed a Moderate CVI, while 21.85% was classified as Very Low, 8.07% as High, 5.49% as Low and only 1.40% as Very High. The most vulnerable area corresponds to the mouth of the Anil River, which does not present a linear behavior, with its beach strip varying throughout the year and favoring the action of external events.

Keywords: CVI, vulnerability, sea level rise.

Índice de vulnerabilidade costeira do município de São Gonçalo do Amarante (Ceará) frente a elevação do nível do mar

Resumo

As imagens de satélite, submetidas a técnicas de PDI, integradas em um ambiente SIG, permitem avaliar as mudanças na paisagem, correlacionando tendências, variabilidades, permitindo uma compreensão de mudanças nas condições ambientais. Esta pesquisa determinou o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do município de São Gonçalo do Amarante (Ceará), a fim de destacar as áreas que apresentam maior vulnerabilidade, a partir da análise de seis variáveis (geomorfologia, taxa de variação das linhas de costa, inclinação costeira, amplitude média das marés, altura significativa de onda e nível médio do mar) que foram quantificáveis em relação à vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar. Obteve-se que 63,13% da linha de costa mapeada está classificada como IVC moderado, 21,85% Muito Baixa, 8,07% como Vulnerabilidade Alta, 5,49% como Baixa e apenas 1,40% com vulnerabilidade costeira Muito Alta. A porção mais vulnerável corresponde à foz do Rio Anil, local que não apresenta comportamento linear, variando a largura da faixa de praia ao longo do ano, favorecendo a ação de eventos externos.

Palavras-chave: IVC, vulnerabilidade, elevação do nível do mar.

1. Introdução

As zonas costeiras estão entre os ambientes naturais mais dinâmicos do planeta, oferecendo uma série de bens e serviços essenciais para o bem-estar social e econômico do ser humano. As zonas costeiras representam o espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre, caracterizada por

ecossistemas altamente diversos, como recifes de coral, manguezais, praias, dunas e pântanos (Klein, 2002).

De acordo com a Comissão Interministerial para Recursos do Mar – CIRM (BRASIL, 2010), seguindo a tendência mundial em ocupar as áreas litorâneas, 25% da população brasileira vive em municípios costeiros, o que equivale a aproximadamente 50 milhões de habitantes (IBGE,

2010).

Essas regiões são expostas a uma dinâmica de interação terra-mar-ar, e formam um complexo sistema extremamente ameaçado pelas alterações antrópicas e pelos potenciais impactos das mudanças climáticas (PBMC, 2016). Apesar de indicadores sinalizarem que as mudanças climáticas já provocaram alterações na frequência e magnitude das condições climáticas e meteorológicas em algumas localidades, até o momento ainda é complexo atribuir eventos individuais as mudanças climáticas.

Um dos mais importantes problemas aplicados na geologia costeira hoje é determinar a resposta física do litoral a elevação do nível do mar. A previsão de taxas de recuo da linha de costa e de perda de sedimentos é fundamental para o planejamento de futuras estratégias de gerenciamento da zona costeira e para a avaliação dos impactos biológicos devidos às mudanças ou destruição de habitat (Thieler & Hammar, 2000).

O nível do mar subiu 0,17 metros durante o Século XX, estimativas recentes da futura elevação do nível médio do mar (em inglês, *Sea Level Rise* ou SLR) com base na produção do modelo climático sugerem que a elevação no Nível Médio do Mar (NMM) chegue a 0,82 metros até o final do século, apesar de existirem algumas incertezas nesta estimativa (IPCC, 2021).

A elevação no nível médio do mar pode ocasionar um aumento da exposição ao risco da população e de construções, a inundações e erosão em zonas costeiras. Infelizmente, a grandeza e periodicidade desse evento ainda não são totalmente precisas em virtude da qualidade dos registros e ausência de padrão nas medições, o que prejudica o diagnóstico da erosão costeira e do aumento do nível do mar no território nacional (PBMC, 2016).

Embora uma abordagem preditiva quantitativa viável não esteja disponível, a vulnerabilidade relativa de diferentes ambientes costeiros a elevação do nível do mar pode ser quantificada em escala regional a nacional, usando informações sobre geomorfologia costeira, taxa de elevação do nível do mar, evolução da linha costeira passada e outros fatores (Thieler, 2000).

Assim, além de fenômenos extremos e de curta duração, existe nessas localidades litorâneas uma dinâmica natural, frequentemente intensificada através de ações antrópicas. Em decorrência dessa dinâmica há em diversas zonas costeiras, uma situação generalizada de avanço e de recuo da linha de costa, com valores alarmantes a médio e a longo prazo (Coelho *et al.*, 2006).

A subida do nível do mar também ocasiona o aumento da velocidade dos ventos. Com

ventos mais fortes, a força das ondas eleva exponencialmente. E, no Brasil, o efeito dessa aceleração dos ventos deverá ser vivenciado sobretudo no Nordeste, onde, com a aceleração dos ventos, as ondas ficam maiores e o aumento de sua energia é exponencial, um efeito muito mais nocivo do que a elevação dos mares, que tem se apresentado mais lenta. Eventos esses que já são possíveis de observar em municípios litorâneos do estado do Ceará, como em Icapuí, Cascavel, Caucaia e Acaraú.

É nesse contexto que as imagens de satélite, submetidas às técnicas de PDI (Processamento Digital de Imagens), integradas em ambiente SIG e validadas por dados de campo, permitem avaliar as alterações ocorridas na paisagem, correlacionando tendências, variabilidades, potencialidades e fragilidades no ambiente, permitindo compreender as mudanças nas condições ambientais, além de demonstrar as dinâmicas de uma região, auxiliando no suporte ao controle de riscos ambientais e desastres naturais (Soares Filho, 1998; Snoussi *et al.*, 2008).

Neste contexto, a pesquisa buscou determinar o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do município de São Gonçalo do Amarante, localizado no litoral do estado do Ceará, com o intuito de evidenciar as áreas que apresentam maior vulnerabilidade, tendo como base características ecológicas e geofísicas, visando um melhoramento no monitoramento costeiro e ambiental, no intuito de suprir lacunas sobretudo com relação ao gerenciamento costeiro.

2. Área de estudo

A área de estudo está inserida no município de São Gonçalo do Amarante (Figura 1), na porção Norte do estado do Ceará, inserida na mesorregião Metropolitana de Fortaleza e na microrregião de Fortaleza (IPECE, 2014). O foco dessa pesquisa compreende apenas os distritos situados na porção litorânea do município: Pecém (praia da Colônia) e Taíba que apresenta uma extensão de 18,5 km de faixa praial com larguras variadas e com declives muito suave para o mar.

Com base na geologia, essa porção litorânea do município é constituída por Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos que são os depósitos eólicos nas proximidades ao longo da costa (dunas, praias e pós-praias), constituídos por areia quartzosa fina a média, bem arredondada e selecionada, laminação plano-paralela ou estratificação cruzada (Montalvão, 1975), além de unidades do embasamento cristalino (quartzitos e gnaiss) e da formação Barreiras (sedimentos areno-argilosos) repousando sobre o Embasamento Cristalino.

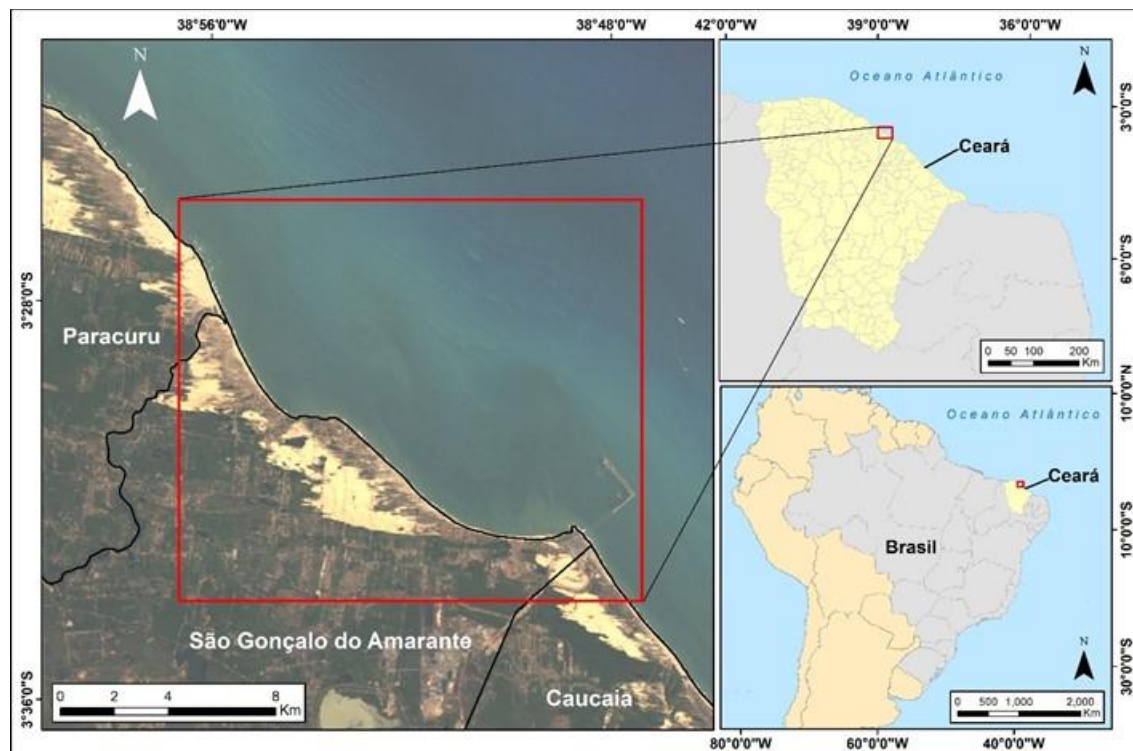


Figura 1 - Mapa de localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE

A Ponta do Pecém, que configura uma topografia mais elevada, caracterizado pelo acidente geográfico (promontório), é constituída por rochas cristalinas do Grupo Ceará, recobertos por sedimentos do Grupo Barreiras e dunas móveis. Local esse, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). A Ponta da Taíba é constituída de rochas menos resistentes, de idade tércio-quaternária, e já se encontra em processo de retrogradação (LIMA, 2000).

A geomorfologia dessa porção litorânea está inserida na unidade conhecida como Litoral Setentrional Nordeste, onde a planície litorânea apresenta compartimentação e feições distintas. Sendo o foco desse trabalho apenas o domínio, denominado de praia e localizado entre a linha média de baixamar e a linha média de preamar (Monteiro, 2001) e os tabuleiros costeiros que se dispõem de forma paralela à linha de costa e à retaguarda dos sedimentos eólicos, marinhos e fluviomarinhos que constituem a planície litorânea (FUNCEME, 2009).

O clima da região é caracterizado como um macroclima da faixa costeira de clima tropical chuvoso, quente e úmido, com chuvas de verão e outono, sendo com base na classificação de Koppen (1928), do tipo Aw'. Apresenta média pluviométrica

anual de 989 mm.

Com relação aos ventos, as direções predominantes são a leste (E) e leste-sudeste (ESSE) responsáveis pela formação das ondas “sea”, próximo a costa, que chegam com grande ângulo, possibilita um forte transporte, de leste a oeste, na Ponta do Pecém. E ventos na direção sudeste (SE), sendo responsáveis pelo transporte de sedimentos ao longo das praias, com influência direta na morfologia praial (FUNCEME, 2014). Outro tipo de onda presente nessa área de estudo, é a do tipo *swell*, que se originam no hemisfério Norte e chegam ao local do Porto do Pecém com direção N-NE.

3. Metodologia

Os objetivos traçados para a presente pesquisa exigiram o desenvolvimento de etapas no sentido de facilitar a obtenção de informações que subsidiassem a compreensão da área objeto de análise. Para tanto, os procedimentos metodológicos foram baseados nas seguintes etapas:

Na primeira etapa foram realizadas análises meticolosas e amplas das publicações, a fim de desenvolver um banco de dados para uma avaliação em escala regional da vulnerabilidade costeira. Dados relevantes foram coletados de agências locais,

estaduais e federais, bem como de instituições acadêmicas.

A segunda etapa consistiu na aplicação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) que analisa seis variáveis que foram relacionadas de forma quantificável à vulnerabilidade relativa da costa às mudanças físicas devido à elevação do nível do mar (Gornitz, 1990; Gornitz *et al.*, 1994; Thieler e Hammer-klose, 2000).

As variáveis empregadas no IVC são classificadas em dois grupos: Variáveis ecológicas e variáveis geofísicas. As variáveis ecológicas consistem em: geomorfologia; taxa de mudança histórica nas margens/linhas de praia e declividade costeira. Estas variáveis representam a erosão de longo prazo e a tendência de acreção, além de sua susceptibilidade à inundação, respectivamente. As

variáveis relativas aos processos geofísicos incluem: a amplitude média das marés, a altura significativa de ondas, o Nível Médio do Mar (NMM), fatores esses que contribuem para os riscos de inundação de uma determinada seção da linha de costa.

O banco de dados inclui informações quantitativas e qualitativas. Assim, as variáveis numéricas recebem uma classificação de risco com base nos intervalos de valores dos dados, enquanto a variável de geomorfologia, não numérica, é classificada numericamente com base na estabilidade quanto à morfogênese e à pedogênese, conforme classificado por Tricart (1977). As variáveis de risco são classificadas em uma escala linear de 1 a 5, onde o valor 1 representa o menor risco, enquanto o valor 5 representa o maior risco. (Quadro 1).

Quadro 1 - *Ranking* da Vulnerabilidade Costeira. Fonte: Thieler e Hammer-Klose (2000).

VARIÁVEL	RANKING DA VULNERABILIDADE COSTEIRA				
	MUITO BAIXA	BAIXA	MODERADA	ALTA	MUITO ALTA
	1	2	3	4	5
Geomorfologia	-	-	Tabuleiros Costeiros	-	Praia
Declividade costeira (%)	> 1,9	1,3 – 1,9	0,9 – 1,3	0,6 – 0,9	< 0,6
NMM (mm/ano)	< -1,21	-1,21 – 0,21	0,1 – 1,24	1,24 – 1,36	>1,36
Taxa de variação da linha de costa (m/ano)	< 2,0 Acreção	1,0 – 2,0	-1,0 – +1,0 Equilíbrio	-1,0 – -2,0	< -2,0 Erosão
Amplitude média das marés (m)	> 6,0	4,1 – 6,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,9	< 1,0
Altura significativa de onda (m)	< 1,1	1,1 – 2,0	2,0 – 2,25	2,25 – 2,60	> 2,60

Uma vez que cada seção da costa recebe um valor de risco com base em cada variável de dados específica, o índice de vulnerabilidade costeira é calculado como a raiz quadrada da média geométrica ou a raiz quadrada do produto das variáveis classificadas dividido pelo número total de variáveis (GORNITZ *et al.*, 1990):

$$IVC = \sqrt[6]{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}$$

Onde,
a = Geomorfologia;
b = Declividade costeira (%);
c = NMM (mm/ano)
d = Taxa de variação da costa (m/ano);
e = Amplitude média das marés (m);
f = Altura média significativa de onda (m)

Este método produz dados numéricos que não podem ser equiparados diretamente com os efeitos físicos específicos em locais distintos. Contudo, destaca-se na análise de áreas onde os diversos efeitos da elevação do nível do mar são um fator preocupante, por questões socioeconômico-ambientais, como é o caso de áreas estuarinas e costeiras e de ampla ocupação.

E por fim, a terceira etapa ocorreu com o intuito de integrar os dados de vulnerabilidades/riscos e a elevação do nível do mar, a fim de compreender evolução da paisagem, tendo em vista, principalmente, a ação de planejamento e zoneamento, buscando analisar o meio ambiente em sua forma mais ampla.

3.1 Geomorfologia

A variável geomorfologia expressa a erodibilidade relativa dos diferentes tipos de relevo. Esses dados foram derivados do Levantamento de Geodiversidade do Estado do Ceará (Brandão e Freitas, 2014), onde foi possível identificar as classes geomorfológicas, Tabuleiros Costeiros e praia, aos quais foram atribuídos valores numéricos fundamentados no conceito de estabilidade, da análise ecodinâmica de Tricart (1977), que estabeleceu um modelo com classes de vulnerabilidade à erosão, distribuídas entre as situações de predomínio dos processos de pedogênese (aos quais se atribuem valores próximos de 1,0), passando por situações intermediárias (às quais se atribuem valores em torno de 3,0) e situações de predomínio erosivos modificadores da forma do relevo e morfogênese (as quais se atribuem valores próximos de 5,0).

3.2 Declividade costeira

A declividade costeira (%) foi calculada com base em levantamentos de elevações topográficas e batimétricas. Esses valores também são fixados com base na fisiografia, detalhes de contorno de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e DEM (*Digital Elevation Model*). O declive regional permite uma avaliação não apenas do risco relativo de inundação, mas também do potencial de rapidez de recuo da linha de costa, uma vez que as regiões costeiras de baixa declividade deveriam recuar mais rapidamente do que as regiões mais íngremes (Pilkey e Davis, 1987).

Em valores de inclinação menores que 0,6% tem-se vulnerabilidade muito alta e em valores de inclinação maiores que 1,9 é atribuída muito baixa vulnerabilidade. Valores entre 1,3 e 1,9 são

classificados como Baixa, valores compreendidos entre 0,9 e 1,3 são tidos como moderada vulnerabilidade, enquanto valores entre 0,6 e 0,9 são classificados como Alta vulnerabilidade

3.3 Nível Médio do Mar

A variável NMM (mm/ano) é derivada do aumento (ou diminuição) da elevação média anual da água ao longo do tempo. Com base no Relatório IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) AR6 WGI “Mudanças Climáticas 2021: a Base das Ciências Físicas” (IPCC, 2021), onde foram gerados quatro cenários climáticos para elevação do nível do mar, denominados de *Representative Concentration Pathways* (RCP), baseado nas concentrações de gases do efeito estufa, na emissão de gases, aumento de temperatura e aquecimento global. Os cenários para 2100 são de elevação do nível do mar de 0,26 a 0,55 m para RCP2.6; 0,32 a 0,63 m para RCP4.5; 0,33 a 0,63 m para RCP6.0 e 0,45 a 0,82 m para RCP8.5. Sendo o cenário RCP2.6 o mais otimista, o cenário RCP8.5 o mais pessimista e os cenários RCP4.5 e RCP6.0, intermediários.

Com base na metodologia de Thieler e Hammer-Klose (2000), todos os valores de variação do nível médio do mar maiores que 1,36mm/ano são considerados de alta vulnerabilidade. Desse modo, como todos os cenários propostos pelo relatório do IPCC apresentam variações superiores a 1,36mm/ano, selecionou-se o cenário mais otimista, RCP2.6, para calcular o IVC.

3.4 Taxa de variação das linhas de costa

A taxa de mudança nas linhas de costa, ou seja, as taxas de erosão e acreção da linha costeira (m/ano) é baseada no intervalo de mudança nos valores da largura da praia. Esses valores foram determinados através de análise multitemporal a partir de imagens de satélite da série Landsat em um intervalo de 36 anos, entre os anos de 1984 e 2020 (Quadro 2), por meio do método de quantificação da linha de costa DSAS (*Digital Shoreline Analysis System* 5.0), a partir da utilização dessa extensão disponível no ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019). Empregou-se o método *Linear Regression Rate* (LRR) para analisar o comportamento das linhas de costa (LC), obtendo-se uma matriz numérica que determinou o comportamento morfológico das LCs em relação a linha de base, considerando as situações de erosão, acreção e equilíbrio na área em estudo.

Quadro 2 - Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa

Data	Satélite/Sensor	Resolução espacial
15/06/1984	Landsat 5/TM	30 m
15/06/1985	Landsat 5/TM	30 m
19/06/1991	Landsat 5/TM	30 m
30/10/1993	Landsat 5/TM	30 m
14/08/2000	Landsat 5/OLI	30 m
01/08/2001	Landsat 5/OLI	30 m
27/07/2005	Landsat 5/OLI	30 m
05/10/2007	Landsat 5/OLI	30 m
18/06/2014	Landsat 8/OLI	30 m
26/08/2016	Landsat 8/OLI	30 m
13/08/2017	Landsat 8/OLI	30 m
13/06/2018	Landsat 8/OLI	30 m
22/10/2019	Landsat 8/OLI	30 m
06/09/2020	Landsat 8/OLI	30 m

As imagens da série Landsat foram selecionadas devido as suas adequadas configurações espectrais e resolução espacial que possibilitou a distinção das linhas de costa para esse longo intervalo, combinadas com a facilidade de acesso aos dados. O critério de escolha dessas datas deve-se a qualidade referente a ausência de nuvens nas imagens nesses períodos.

Linhas de costa com taxas maiores que + 2,0m/ano representam acreção, sendo classificado como uma classe de Muito Baixa Vulnerabilidade, valores entre -1,0 e +1,0m/ano correspondem a estabilidade das taxas de erosão/acreção caracterizadas como moderada vulnerabilidade e valores menores do que -2,0m/ano equivalem à erosão, pertencendo a classe de Muito Alta vulnerabilidade. Os valores compreendidos entre 1,0 e 2,0m/ano configuram áreas de Baixa vulnerabilidade costeira e valores entre -1,0 e -2,0m/ano traduzem localidades Alta vulnerabilidade. Ou seja, as taxas de erosão ou acreção cada vez mais altas são classificadas como risco correspondentemente maior ou menor.

3.5 Amplitude média das marés

A amplitude média das marés (m) corresponde a diferença vertical entre o nível atingido pela maior das marés cheias e a menor das marés vazias. Esses valores foram baseados em dados disponíveis do marégrafo da área de estudo que está localizado na estação 30337 (Marinha Brasileira) no Porto do

Pecém, que tem medidas disponíveis de dados sobre as variações do nível do mar, incluídas as elevações astronômicas e meteorológicas, na qual foram disponibilizados pela Marinha do Brasil os dados do intervalo de 1988 a 1998 (DHN, 2021).

As marés cujas amplitudes correspondem aos valores mais altos e mais baixos em relação ao nível médio do mar local, que se produzem, respectivamente, durante a lua cheia e a lua nova, conhecidas como marés de sizígia (Suguio, 1992). No Pecém, a amplitude máxima de maré é de 3 m e mínima de 0,4 m, mas durante a maré alta pode chegar a 3,1 m com mínima de 0,1 m, nas maiores marés de sizígia.

O vento, principalmente, bem como outros fatores meteorológicos, pode ocasionar a elevação ou o abaixamento do nível do mar e o atraso ou o adiantamento dos instantes de ocorrência das preamares ou baixa-mares, interferindo na faixa intertidal da praia do Pecém (DHN, 2021).

Dessa maneira, tem-se que os ambientes de micromarés são aqueles caracterizados por uma amplitude de maré menor que 2m, enquanto os ambientes mesomarés lidam com amplitudes de maré entre 2 m e 4 m. Ambientes de macro-marés são aquelas áreas onde a amplitude da maré é superior a 4 m, sendo raros de ocorrer nessa localidade (Short, 1999).

Considera-se que as micromarés têm maior vulnerabilidade quando comparadas às macromarés,

principalmente porque, em um ambiente de micro-marés, o nível do mar está sempre próximo à maré alta. Portanto, durante um evento de tempestade, as inundações costeiras acontecem mais facilmente em uma micromaré do que em uma macromaré (Thieler & Hammar, 2000; Koroglu *et al.*, 2019; Rangel-Buitrago *et al.*, 2020). Tal abordagem liga grandes faixas de maré (por exemplo, maiores do que 6 m) a um nível de muito baixa vulnerabilidade.

Assim, a amplitude média de marés foi classificada de vulnerabilidade costeira Muita Baixa para valores inferiores a 6,0 m, para valores compreendidos entre 4,1 e 6,0 m classifica-se como Baixa, valores entre 2,0 e 4,0m corresponde a vulnerabilidade Moderada, já amplitude média entre 1,0 e 1,9 m apresentam classificação Alta e para valores que estão menores que 1,0 m a classe atribuída é a Muito Alta.

3.6 Altura significativa das ondas

A altura significativa (Hs) das ondas (m) é usada aqui como um indicador da energia das ondas, que impulsiona os sedimentos costeiros, onde juntamente com o regime de marés e influência dos ventos, atua na formação de um ambiente altamente dinâmico (Almeida *et al.*, 2015). A energia das ondas aumenta conforme o quadrado da altura das ondas, assim, a capacidade de mobilizar e transportar

materiais de praia é uma função da altura das ondas.

Os dados dessa localidade foram coletados em Costa (2019) do período de dezembro de 2016 a novembro de 2017 através do levantamento de dados observados da boia do PNBOIA (Programa Nacional de Boias), projeto esse mantido pela Marinha do Brasil em conjunto com outras instituições de pesquisa.

Os dados históricos da boia localizada em Fortaleza (Ceará), boia mais próxima da área de estudo encontra-se em manutenção, havendo a possibilidade apenas de coleta de dados para o período acima mencionado. Desse modo, com base nesses dados foi possível perceber que a média de Hs foi de 1,66 m, sendo que no período de dezembro a maio a média foi de 1,57 m, e no intervalo de junho a novembro a média foi de 1,75 m, com maiores médias mensais nos meses de setembro e outubro, registrando Hs de 2,1 m e 1,9 m, respectivamente (Costa, 2019).

Assim, alturas significativas das ondas inferiores a 1,1 m são classificadas como vulnerabilidade costeira Muito Baixa, valores entre 1,1 e 2,0 m se classificam como Baixa. A classe Moderada abrange o intervalo de 2,0 a 2,25, enquanto valores entre 2,25 e 2,60 pertencem a classe denominada de Alta e valores superiores a 2,60 m correspondem à classe de vulnerabilidade costeira Muito Alta.

4. Resultados e discussão

Após atribuir o valor de risco para cada variável constituinte do litoral do município de São Gonçalo do Amarante (Quadro 3) foi calculado o IVC,

no qual os valores foram classificados em cinco partes iguais com base no princípio dos percentis de 20, 40, 60 e 80. Onde os valores de IVC variam de 8,12 a 22,36 (Figura 2) compostas pelas seguintes classes: Muita Baixa, Baixa, Moderado, Alta e Muito Alta.

Quadro 3 - Classes de Índice de Vulnerabilidade Costeira

Classes	Intervalos	km
Muita Baixa	< 8,12	4,06
Baixa	8,12 a 9,94	1,02
Moderada	9,94 a 11,49	11,74
Alta	11,48 a 17,31	1,50
Muito Alta	17,31 a 22,36	0,26

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) fornece informações sobre o potencial relativo da mudança costeira frente a elevação do nível do mar. Os mapas e dados apresentados poderão ser visualizados como base para o desenvolvimento de um inventário mais completo de variáveis que influenciam a vulnerabilidade costeira, ao qual outros elementos poderão ser adicionados à medida que se tornam disponíveis.

Esta pesquisa obteve os índices de vulnerabilidades do município de São Gonçalo do

Amarante e buscou relacioná-los aos processos de evolução de linha de costa que configuram o espaço geográfico, com o intuito de evidenciar as áreas que apresentarem maiores vulnerabilidades, tendo como base as características e condições morfológicas.

Na Figura 3 é possível observar as classes de vulnerabilidade atribuídas a regiões do município estudado frente a elevação do nível do mar em uma escala de 1:100.000. A área de estudo apresenta uma extensão de 18,58 km de faixa praial, das quais 63,13% da linha costeira mapeada é classificada com

IVC moderado, 21,85% Muito Baixa, 8,07% com vulnerabilidade Alta, 5,49% classificada como Baixa

e apenas 1,40% da faixa litorânea classificada com vulnerabilidade costeira Muito Alta.

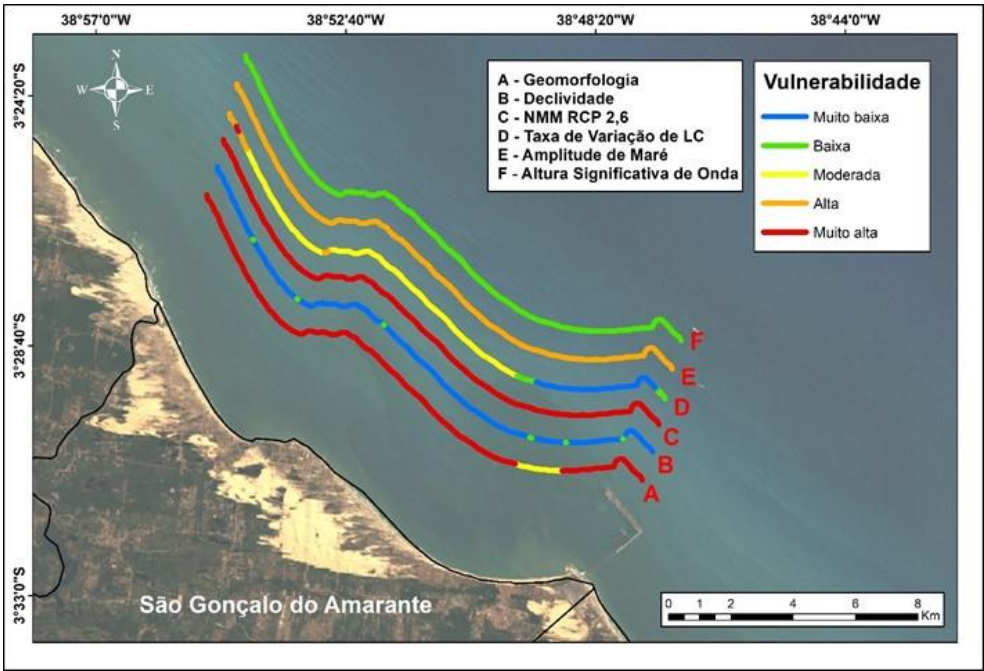


Figura 2 - Classes de Índice de Vulnerabilidade Costeira

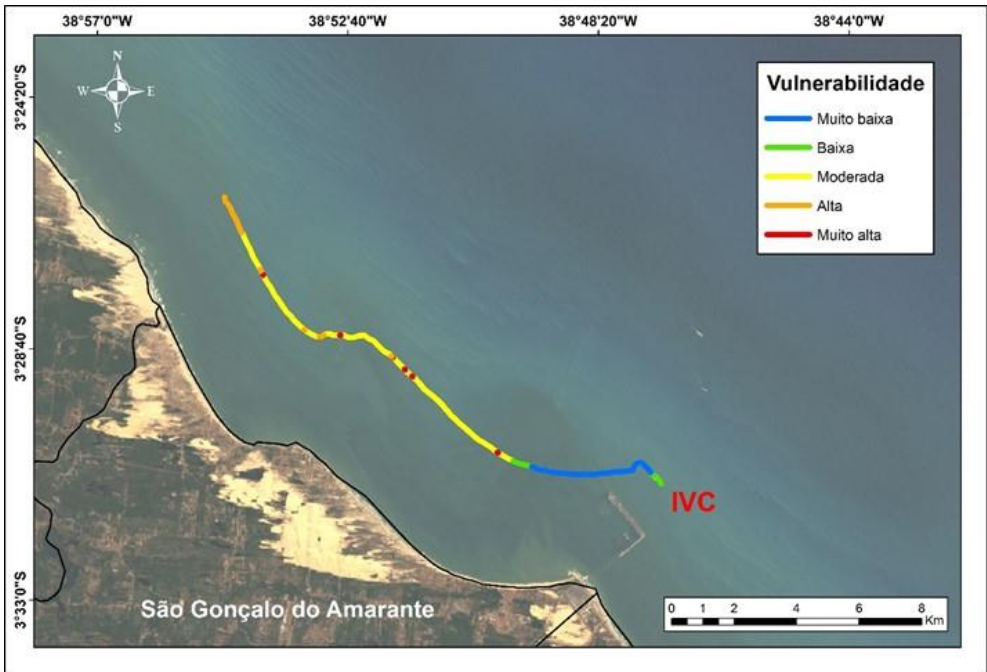


Figura 3 - Índice de Vulnerabilidade costeira do município de São Gonçalo do Amarante

O IVC caracterizado como Muito Baixo apresenta uma extensão de 4,02km em que combina as variáveis de praia e região de tabuleiro costeiro da área de estudo, regiões essas de baixa declividade, com variações da linha de costa positiva e com uma altura significativa de onda entre 1,1 e 2,0 m, associadas a uma variação do NMM elevada, classificada com uma vulnerabilidade costeira Muito Alta e com amplitude média de maré de Alta vulnerabilidade.

A classe caracterizada como Baixa (1,02km de extensão) abrange duas porções do município, como é possível observar na Figura 3, onde as taxas de variações da linha de costa variam entre 1,0 e 2,0m/ano, ou seja, há uma acreção da linha de costa, associadas a essa região de praia com muito baixa declividade tem-se uma altura significativa de onda entre 1,1 e 2,0 m. E assim como na classe Muito baixa, essa porção também apresenta uma variação do NMM elevada (superior a 1,36mm/ano) e um amplitude média de maré de alta vulnerabilidade.

A classe de vulnerabilidade costeira frente a elevação do nível do mar de maior extensão corresponde a classe Moderada, que difere da classe IVC Baixa, pois combina a região de praia, regiões essa de baixa declividade, que possuem um alto potencial de rapidez de recuo da linha de costa, com regiões de estabilidade das taxas de erosão/acreção, e com amplitude de maré de alta vulnerabilidade, bem como uma região de alta variação da linha de costa, mas com uma altura significativa inferior a 1,1 m.

A região litorânea do município que apresenta um IVC Alto é consequência de uma baixa declividade relacionada a uma taxa de variação da linha de costa Alta, com predomínio de erosão e uma amplitude de maré alta, além de uma região com uma variação do nível médio do mar Muito Alta, assim como toda a porção litorânea do município.

A classe de vulnerabilidade costeira frente a elevação do nível do mar de menor extensão refere-se a classe Muito Alta, localizada na porção mais a oeste do município, limite com o município de Paracuru, onde está localizada a foz do Rio Anil. A combinação dessa região de praia com valores de declividade moderada, com uma taxa de variação da linha de costa muito alta, que varia de acordo com um grande número de fatores, tanto de origem natural (balanço de sedimentos, variações do nível relativo do mar, dispersão de sedimentos, entre outros), como de origem antrópica (de engenharia, dragagens, entre outros). Como resultado da interação entre estes vários fatores, essa porção do município recua em direção ao continente, ou seja, à predomínio de erosão.

Associada a essa situação, tem-se uma amplitude de maré alta e uma variação do nível médio do mar maior que 1,36mm/ano, ou seja, regiões de alta

vulnerabilidade tendo como resultado um cenário de maior susceptibilidade à futura elevação do nível do mar, que se apresenta com baixa resiliência e pouca capacidade de recuperação natural dos sedimentos erodidos.

Percebe-se que dentre as variáveis analisadas no Índice de Vulnerabilidade Costeira, a variável NMM, a altura significativa da onda e a amplitude de maré permanecem constantes ao longo de toda área de estudo, pois a tendência dessas variáveis é mudar em uma escala espacial entorno de 100km, enquanto as variáveis relacionadas à geomorfologia e à declividade costeira variam em uma escala espacial de aproximadamente 10km. Os dados de erosão e acreção costeira também variam em pequenas distâncias.

Essas variáveis de pequena escala são aquelas que geralmente induzem uma maior variação nos índices de vulnerabilidade, tornando-se assim as variáveis mais importantes para estabelecer o Índice de Vulnerabilidade Costeira frente à elevação do nível do mar.

Conforme Lopes *et al.* (2021), com base nos dados de erosão e acreção para o intervalo de 1984 a 2020, o município de São Gonçalo do Amarante apresenta maiores erosões associados ao Rio Anil, região essa que apresentou maior vulnerabilidade costeira, devido a sua própria dinâmica fluvial combinada a fatores externos, como pluviosidade, transporte de sedimentos, entre outros. Fatores esses que, combinados a elevação do NMM, desencadeiam uma região de vulnerabilidade Muito Alta.

Nas regiões mais a leste do município, no distrito do Pecém, há um predomínio nos processos deposicionais de leste a oeste que ocasionam um maior aporte sedimentar na região a sotamar, na região do promontório. Essas regiões combinadas com as demais variáveis correspondem as áreas que foram classificadas com IVC Muito baixo e Baixo.

Contudo, para se determinar a presença de um risco a um determinado evento, é necessário se estimar a perda a algum bem material ou imaterial. Mas, em se tratando da elevação do nível do mar, não se preve perdas humanas, uma vez que é um evento já previsto, havendo tempo para adaptação da sociedade, bem como obras de contenção e deslocamento para locais menos vulneráveis, a fim de se evitar danos ambientais e socioeconômicos (MMA, 2008).

5. Conclusões

Por meio desse estudo foi possível determinar as áreas costeiras vulneráveis ao aumento do nível do mar, onde foi constatado que, apesar da porção costeira do município de São Gonçalo do

Amarante ter sofrido influências antrópicas, como a implantação do Terminal Portuário do Pecém, que afetaram diretamente a ação das ondas e correntes e consequentemente a dinâmica sedimentar, atualmente há um predomínio da deposição na maior parte dessa costa. Fator esse que agregado as variáveis de geomorfologia, declividade costeira, NMM, amplitude média das marés e altura média significativa de onda determinaram que a porção mais vulnerável a elevação do nível do mar corresponde a foz do Rio Anil, onde não apresenta um comportamento linear, variando a largura da faixa de praia ao longo do ano, favorecendo a ação de eventos externos.

As porções de menor valor de IVC estão relacionados as localidades em que ocorrem maiores valores deprecionais ao longo do intervalo de 36 anos analisados. E as áreas classificadas como moderadas, correspondentes as maiores extensões da área de estudo é caracterizada com um estágio de equilíbrio entre a erosão e a deposição.

7. Referências

- Almeida, L. R. D.; Amaro, V. E.; Marcelino, A. M. T.; ScudelarI, A. C. 2015. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. v.15, p.135-151,
- BRASIL. Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/secirm>>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira Pinto, F. A, 2006. Vulnerability analysis approach for the Portuguese West Coast. Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation, 251-262.
- Costa, C. E. B. Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados. 78 f. , 2019. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábua de maré. 2021. Disponível em: <<http://www.dhn.mar.mil.br>>. Acesso em: 12 dez. 2020.
- ESRI, 2019. Environmental Systems Research Institute. Software ArcGis Desktop, License Type Arcinfo, version 10.8.1.
- FUNCEME 2009- Fundação Cearense de Meteorologia E Recursos Hídricos. A zona costeira do estado do Ceará: compartimentação geoambiental e antropismo.
- FUNCEME, 2014 – Fundação Cearense de Meteorologia E Recursos Hídricos. Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre o Nordeste.
- Esse índice não apenas contribui significativamente para os métodos e métricas usados na ciência da vulnerabilidade, mas também indica possíveis mudanças na linha costeira devido ao aumento do Nível Médio do Mar. Esse índice pode servir como base para um inventário mais completo, incluindo variáveis que possam influenciar a vulnerabilidade dessas localidades, tais como as varáveis socioeconômicas. Também fornece informações importantes para os formuladores de políticas públicas e para o planejamento e ordenamento territorial.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará e ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GeoCE).

Secretaria de Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/551-sistemas-atmosfericos-atuantes-sobre-o-nordeste>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

Gornitz, V, 1990. Vulnerability of the east coast, USA to future sea level rise. Journal of Coastal Research, 9, 201–237.

Gornitz, V. M.; Daniels, R. C.; White, T. W.; Birdwell, K. R, 1994. The development of a coastal vulnerability assessment database, vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. Journal of Coastal Research, 12, 327-338.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA). 2019. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 mar. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, e P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, Estados Unidos da América, 582 págs.

Klein, R. J. T, 2002. Coastal Vulnerability, Resilience and Adaptation to climate: na interdisciplinar perspective. Cumulative Dissertation. Disponível em: <<https://www.pik.potsdam.de/~richardk/part1.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2021

- Koppen, W., Geiger, R. 1928. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm.
- Koroglu, A.; Ranasinghe, R.; Jiménez, J.A.; Dastgheib, A, 2019. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. *Ocean Coast. Manag*, 178, 104799.
- Lima, L. C, 2000. *Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará*. FUNECE: Fortaleza.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente). *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*. Brasília: MMA, 2008.
- Montalvão, R. M. G, 1975. *Geologia*. In: Brasil. Projeto RADAM. Folha NA.20 Boa Vista e parte das Folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21 - RJ17: Série Levantamento de Recursos Naturais, volume 8. Projeto RADAM.
- Monteiro, Norah Maria Veras. *Os efeitos da política de desenvolvimento no litoral cearense e as estratégias para a sustentabilidade: o caso do Pecém – São Gonçalo do Amarante*. 228 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Modernização Pública) – Universidade Internacional de Lisboa/ Universidade Estadual Vale do Acaraú, 2001.
- PBMC, 2016. *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas* [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6.
- Pilkey, O. H.; Davis, T. W, 1987. An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: D. Nummedal, O.H. Pilkey and J.D. Howard (Editors), *Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), 41, 59-68.
- Rangel-Buitrago, N.; Neal, W.J.; De Jonge, V.N, 2020. Risk assessment as tool for coastal erosion management. *Ocean Coast. Manag*, 186, 105099.
- Snoussi, M; Ouchani T.; Niazi, S. 2008. Vulnerability assessment of the impact of sea level rise and flooding on the Moroccan coast: the case of the Mediterranean eastern zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 206–13.
- Soares Filho, Britaldo Silveira. 1998. *Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. 229 p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.
- Short, A.D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Number 551.468. John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1991.
- Suguio, K, 1992. *Dicionário de Geologia Marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol*. São Paulo: T A Queiroz, Biblioteca de Ciências Naturais. v. 15.
- Thieler, E.R.; Hammar-klose, E.S. *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise; Preliminary Results for the US Pacific Coast; Technical Report; U.S. Geological Survey: Woods Hole, MA, USA, 2000*. Tricart, J. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN, 91p, 1977.