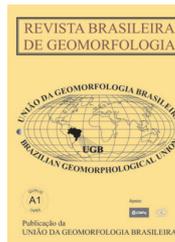


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1260>



### ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA (IVC) PARA O LITORAL DO PIAUÍ, BRASIL

### EVALUATION OF COASTAL EROSION VULNERABILITY INDEX (CVI) FOR PIAUÍ COASTAL ZONE, BRAZIL

**Inessa Racine Gomes de Araújo**

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Acadêmico Hélio Ramos, DECart. Recife, Pernambuco. CEP: 50740-530. Brasil

Email: [inessa.geoprocessamento@gmail.com](mailto:inessa.geoprocessamento@gmail.com)

**Érico Rodrigues Gomes**

Instituto Federal do Piauí

Praça da Liberdade, 1597. Teresina, Piauí. CEP: 64000-040. Brasil

Email: [erico.gomes@ifpi.edu.br](mailto:erico.gomes@ifpi.edu.br)

**Rodrigo Mikosz Gonçalves**

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Acadêmico Hélio Ramos, DECart. Recife, Pernambuco. CEP: 50740-530. Brasil

Email: [rodrigo.mikosz@ufpe.br](mailto:rodrigo.mikosz@ufpe.br)

**Heithor Alexandre de Araújo Queiroz**

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Acadêmico Hélio Ramos, DECart. Recife, Pernambuco. CEP: 50740-530. Brasil

Email: [heithorqueiroz@gmail.com](mailto:heithorqueiroz@gmail.com)

#### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
30/07/2018

Aceito (Accepted):  
12/11/2018

#### Palavras-chave:

IVC (índice de vulnerabilidade costeira); Sensoriamento Remoto; Mapeamento Costeiro.

#### Keywords:

Morphotectonic; Litho-structure; Remote Sensing.

#### Resumo:

A zona costeira do Brasil tem passado por mudanças geomorfológicas em função dos processos hidrodinâmicos, que aliados às mudanças climáticas e antrópicas podem causar problemas de erosão. O objetivo principal do presente estudo foi classificar a vulnerabilidade à erosão costeira do litoral do estado do Piauí, Brasil, considerando três intensidades: *alta*, *média* ou *baixa*. A metodologia consistiu no cálculo IVC (índice de vulnerabilidade costeira) através de uma fórmula analítica obtida pela média aritmética de três grupos de variáveis (indicadores de vulnerabilidade), sendo elas: *mapeamento de variáveis in loco*, *variação da linha de costa* e *cálculo do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)*. O litoral do Piauí, que possui uma extensão total de 66 km foi dividido em quatro setores. Entre os resultados, o indicador mais observado *in loco* foram as obras de proteção costeira não estruturais e a destruição de estruturas artificiais. No que se refere ao NDVI, o setor I obteve uma classificação baixa, indicando uma menor presença de vegetação ao longo de 10 anos. Para a variável *linha de costa*, o setor

II apresentou a maior taxa de progradação, com 65,3%, principalmente na praia das Eólicas; o setor III mostrou as maiores taxas de recuo, com erosão de 48%, acentuada na praia de Macapá; no setor IV foi identificado a maior estabilidade da linha de costa com 37%. Considerando os resultados do IVC, destaca-se que a vulnerabilidade à erosão no litoral piauiense foi considerada *baixa*, em 30,6% da extensão costeira, principalmente no setor I; *média* em 33,45% e *alta* em 31,44%, localizadas principalmente no setor III. Através dos resultados apresentados, esse estudo pode ser utilizado para aprimorar os planos de gerenciamento costeiro integrado.

#### **Abstract:**

The Brazilian coastal zone has undergone geomorphological changes due to the hydrodynamic processes that allied with climate and human induced changes can cause erosion problems. The main goal of the present study was to classify the coastal erosion vulnerability of Piauí State, Brazil, considering three intensities: *high*, *medium* or *low*. The methodology consisted in the CVI (Coastal Vulnerability Index) calculation through an analytical equation obtained by the arithmetical mean of three groups of variables (vulnerability indicators), such as: *in loco mapping variables*, *shoreline changes* and *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) evaluation*. The Piauí coast that has 66 km of extension was divide into four sectors. Among the results, the most *in loco* observed indicator found were non-structural coastal protection works and destruction of artificial structures. Regarding the *NDVI*, the sector I obtained a low classification, indicating less presence of vegetation during 10 years. For the *shoreline* variable, the sector II presented the highest rate of advance, with 65.3%, mainly in the Eólicas beach; the sector III had the highest retreat rates, with 48% of erosion accentuated in Macapá beach; in sector IV it was identified the most of shoreline stability with 37%. Considering the CVI results, it is highlighted that the coastal erosion vulnerability of Piauí was considered *low*, in 30.6% of the coastal extension, mainly in sector I; *medium* in 33.45% and *high* in 31.44%, located mainly in sector III. Through the presented results, this study could be used to improve integrated coastal zone management.

#### **Introdução**

A erosão é um fenômeno frequente que pode ser causado por complexas interações entres diversos fatores naturais e antrópicos, que podem provocar a intensificação do processo erosivo bem como gerar perdas para outros setores da costa adjacente (MAIA, 2005). Um dos espaços mais vulneráveis consiste nas zonas costeiras, pois estas se tratam de espaços geográficos de interface entre continente, atmosfera e oceano, havendo a integração de sistemas como fauna e flora. Os principais riscos que atingem a zona costeira brasileira estão ligados ao desenvolvimento socioeconômico e à pressão populacional que atingem as áreas litorâneas (CARVALHO, 2011). Conforme destacado por Paula (2013), a zona costeira do Piauí está subjugada aos processos dinâmicos que são compostos pela ação dos agentes de transporte, erosão e deposição, tendo como causas originais a variação do nível do mar, a corrente de deriva litorânea, a influência da maré, o comportamento climático, a ação eólica e a ação antrópica. Por conseguinte, um dos aspectos fundamentais para o estudo da zona costeira e seu gerenciamento é o

conhecimento da sua vulnerabilidade, e.g., Wansley et al. (2015), para o gerenciamento integrado da zona costeira, a avaliação da vulnerabilidade costeira é essencial, podendo subsidiar o planejamento das ações protetivas e assim assegurar que as funções do sistema sejam mantidas frente ao processo de adaptação ou mitigação dos efeitos causados pelas mudanças climáticas ou antropogênicas. A vulnerabilidade à erosão costeira é um fenômeno que pode ser classificado através do uso de modelos analíticos considerando uma série de parâmetros que podem ser mensurados (MUEHE, 2001). Gornitz (1991) faz um estudo da vulnerabilidade em áreas costeiras, tratando a suscetibilidade da costa em responder negativamente os fenômenos naturais que a expõe a riscos ou outros efeitos adversos. A partir disso, o uso de indicadores foi apontado por Bush et al., (1999) como sendo uma alternativa para avaliar o potencial risco de desastres naturais em áreas costeiras, uma vez que tais indicadores fornecem evidências que ajudam a entender os processos erosivos atuantes na costa e, conseqüentemente os perigos e riscos aos quais a mesma está sujeita. Diversas são as pesquisas encontradas no Brasil que fazem uso de indicadores

como variáveis para classificar e determinar um índice para a vulnerabilidade à erosão costeira, dentre as quais destacam-se: estudos na costa central da Bahia (RAMOS, 2004), em Pernambuco, os estudos de casos de Recife e Jaboatão dos Guararapes (SILVA *et al.*, 2013.), Jaboatão dos Guararapes e Cabo de Santo Agostinho (MENEZES, 2015), Litoral Sul de Pernambuco (MALLMANN, 2008), no Rio de Janeiro, na região dos Lagos (LINS-DE-BARROS, 2010) e no Paraná, o Balneário de Pontal do Sul (NARDEZ *et al.*, 2016), entre outros. No contexto de publicações internacionais referentes a indicadores para o mapeamento da linha de costa encontram-se Boak and Turner, (2005) trazendo uma revisão de várias definições e técnicas para o mapeamento desta feição, além dos trabalhos destacando a importância do gerenciamento costeiro integrado, como é o caso de Jacobson *et al.*, (2014), que apresenta um estudo de caso na Austrália, retratando a importância do monitoramento e avaliações dos fatores adaptativos para o ajuste de ações referentes ao gerenciamento costeiro; Denner *et al.*, (2015), por sua vez, integra a vulnerabilidade costeira com riscos ambientais para um estudo de caso no estuário de Loughor, Gales do Sul, Reino Unido; enquanto Cenci *et al.*, (2017) apresenta a relação entre a obtenção de informações espaciais utilizando sensoriamento remoto com a integração através de sistemas de informações geográficas para modelar a variação das taxas da linha de costa e assim fornecer subsídios ao gerenciamento costeiro e detecção de locais de risco para um estudo de caso considerando praias localizadas em Portugal e na Itália.

O presente trabalho usa como variáveis para o índice de vulnerabilidade à erosão costeira, características geomorfológicas gerais como o cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), características específicas como as variações da linha de costa e indicadores visuais de erosão. Monitorar a estabilidade costeira é fundamental para a gestão do meio ambiente e faz parte do conjunto de tarefas e atividades que contribuem com o gerenciamento costeiro (GONÇALVES, 2010), bem como, para fornecer suporte as leis de gerenciamento costeiro de um estado contribuindo assim com a preservação e tomada de ações para preservar os ambientes costeiros (GONÇALVES

& AWANGE, 2017). Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é obter o grau de vulnerabilidade à erosão costeira através de indicadores de erosão na faixa litorânea do estado do Piauí.

## **Área de Estudo**

### **Localização da área de estudo**

A área de estudo compreende aproximadamente 1.915km<sup>2</sup>, localizada entre as coordenadas geográficas 02°42'35" e 03°05'02" de latitude sul e 41°14'53" e 41°52'46" de longitude oeste, apresenta como limite a leste o estado do Ceará e a oeste o estado do Maranhão (Figura 1) e possui uma extensão linear da linha de costa de aproximadamente 66 km (CODEVASF, 2006). Abrange os municípios de Cajueiro da Praia, Ilha Grande, Luís Correia e Parnaíba, os quais possuem uma população de aproximadamente 190.188 habitantes (IBGE, 2010).

A formação da planície costeira piauiense está relacionada a uma sucessão de eventos geológicos que afetaram a região e culminaram na sua atual configuração, entretanto ainda ocorrem processos constantes de erosão e acumulação de sedimentos. Dentre as diferentes unidades geológicas que se desenvolveram no Piauí, a zona costeira abrange dois períodos distintos: o Terciário, representado pela Formação Barreiras e que se constitui de grande relevância, e os depósitos quaternários a ela sobreposto (BAPTISTA, 2010).

### **Divisão setorial**

A área de estudo foi dividida em quatro setores: o setor I abrange o município de Parnaíba, onde está localizado a praia da Pedra do Sal, o setor II compreende os municípios de Parnaíba e Luís Correia, onde é localizado a praia das Eólicas e praia de Atalaia, respectivamente. O setor III abrange o município de Luís Correia, onde encontram-se as praias Peito de Moça, Coqueiro, Maramar e Macapá, e o município de Cajueiro da Praia, onde estão localizadas as praias da Barra Grande e da Barrinha. Por fim, o setor IV que compreende o município de Cajueiro da Praia que contém as praias Sardim e Itan. O critério usado para essa divisão foi a característica geomorfológica semelhante em uma faixa litorânea de um pouco mais de 10 km para cada setor. A figura 2 apresenta o mapa de localização das praias estudadas.

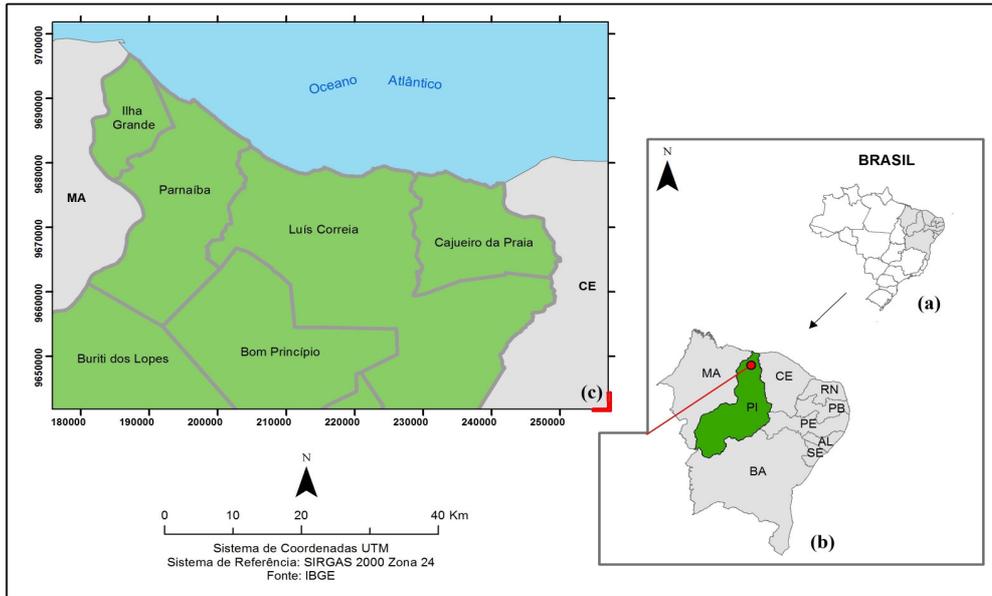


Figura 1 - (a) Localização do Nordeste brasileiro no mapa do Brasil. (b) Ampliação do nordeste do Brasil destacando o estado do Piauí. (c) Municípios costeiros do Piauí

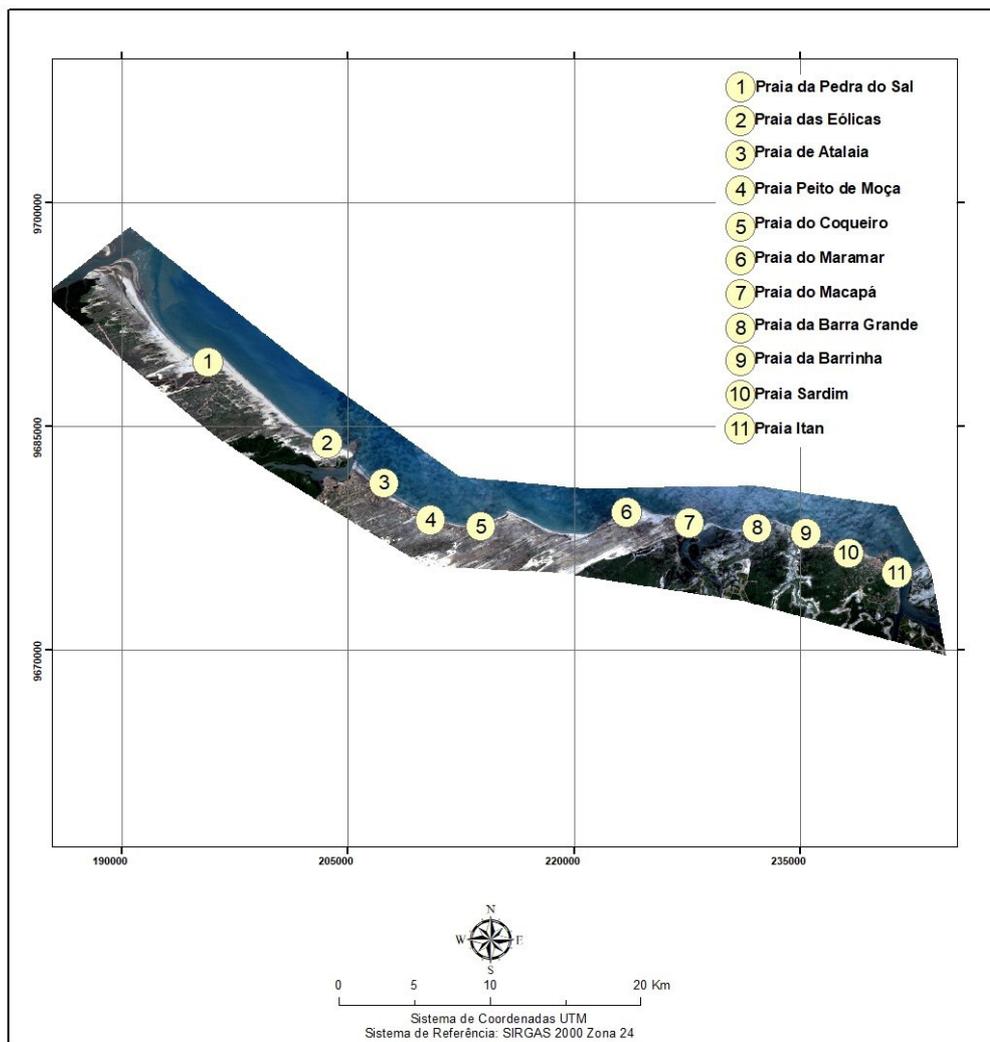


Figura 2 – Localização das praias estudadas no litoral do Piauí

## Materiais e Métodos

### Materiais

Os materiais utilizados foram imagens digitais dos satélites Landsat 5 sensor TM e Landsat 8 sensor OLI georreferenciadas no sistema geodésico de referência SIRGAS 2000, zona 24 Sul. As imagens de satélite foram obtidas no catálogo de imagens do site do INPE (e.g, <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>), para anos de 2005 a 2015. O georreferenciamento das imagens foi feito no *ArcGIS versão 10.1*. O levantamento de campo foi realizado no mês junho/2016, onde foram identificados e mapeados os indicadores de erosão costeira. Para tal mapeamento fez-se uso de um receptor de navegação GPS de marca *Garmin*, em campo caminhou-se por toda a faixa de praia, e a escolha dos pontos foi realizada de acordo com as observações visuais ao longo do percurso com o objetivo de identificar lugares com diferentes feições. Em todos os pontos de campo foram registradas fotografias para auxiliar nas interpretações e análises.

### Métodos

#### Linha da costa

Conforme Mendonça (2005), foi proposto que os indicadores da linha de costa fossem analisados a partir de dois tipos: as feições físicas que criam obstáculos à passagem da água, tais como dunas, arenitos de praia, muro de proteção e as marcas associadas ao nível de água, como linha de vegetação, resíduos deixados pela maré, linha de água e marca da maré mais alta. Neste estudo o principal indicador utilizado foi a maré mais alta, que considera o instante da tomada da imagem digital obtida por satélites artificiais visualmente interpretado e extraído sua posição espacial através do processo de vetorização no sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator).

#### NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) serve para o monitoramento da vegetação e é utilizado para construir perfis sazonais e temporais das atividades da vegetação, permitindo comparações interanuais desses perfis (PONZONI *et al.*, 2012). Para a zona costeira, o NDVI pode ser utilizado, conforme

Queiroz (2017), para classificação da faixa litorânea com destaque à importância no relacionamento entre a vulnerabilidade à erosão costeira e a presença ou ausência de vegetação. Chouhan e Rao (2011) avaliaram o efeito protetivo da presença de vegetação, utilizando NDVI, em áreas costeiras impactadas por desastres do tipo tsunami, chegando à conclusão da eficiência do uso do NDVI nesse tipo de avaliação. Džubáková *et al.*, (2015) utilizaram o NDVI para analisar o comportamento da vegetação em relação aos problemas de inundações e Alatorre *et al.*, (2016) através de uma análise temporal de NDVI, gerada a partir de imagens Landsat TM, foi detectado a influência da vegetação em um manguezal.

O NDVI foi desenvolvido por Rouse *et al.*, (1974) e é definido pela seguinte fórmula:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R)$$

onde:

NIR = infravermelho próximo (0,75 – 0,90  $\mu$ m);

R = vermelho (0,63 – 0,70  $\mu$ m).

O NDVI baseia-se na assinatura espectral das plantas, e conforme Karaburun (2010) seus valores variam entre -1,0 e 1,0, em que os valores negativos de NDVI (NDVI < 0) correspondem a corpos d'água, valores muito baixos (NDVI < 0,1) indicam áreas inférteis, já valores considerados moderados (0,2 < NDVI < 0,3) representam áreas de pastagem e arbustos, enquanto (0,6 < NDVI < 0,8) expressam florestas tropicais e temperadas e indicam a presença de “vegetação viva”, e por fim o solo exposto tem valor nulo (NDVI = 0) (CHOUHAN e RAO, 2011). Ou seja, as plantas quanto mais verdes e saudáveis terão maior absorção da radiação na faixa do vermelho e maior será a reflectância no infravermelho, logo a diferença entre as reflectâncias das bandas do infravermelho e vermelho será tanto maior quanto mais saudável/viva for a vegetação. No estudo, o NDVI será usado como um indicador de vulnerabilidade à erosão, que conforme a divisão da área de estudo será considerado o valor obtido pela média aritmética setorial. Para classificação linguística os intervalos serão divididos em classes considerando: Baixo (NDVI < 0,2), Médio (0,2 < NDVI < 0,5) e Alto (0,5 < NDVI < 1).

### Indicadores visuais de erosão

Em estudos de Souza (2009) são apresentados onze tipos de indicadores de erosão costeira encontrados no litoral do estado de São Paulo. Porém, para este estudo no litoral do estado do Piauí, destes onze indicadores foram identificados e considerados oito. Estes por sua vez, foram agrupados em três classes e utilizados para definirem um grau de intensidade à erosão costeira. A primeira classe, de intensidade “baixa”, foi formada pelas praias que apresentaram os indicadores I (vegetação rasteira de duna ou restinga soterrados com raízes expostas) e II (escarpa erosiva nas dunas); a segunda classe, de intensidade “média”, foram praias com a presença dos indicadores III (árvores na face da praia ou com raízes expostas), IV (marcas de erosão na base de muros residenciais), V (pós praia estreita ou inexistente) e VI (obras não estruturais de proteção costeira), podendo apresentar ou não os indicadores da primeira classe; a terceira classe, de intensidade “alta”, foi formada por praias com a presença dos indicadores VII (obras estruturais de proteção costeira) e VIII (destruição de estruturas artificiais), podendo apresentar ou não os indicadores da primeira e segunda classe. As técnicas de proteção costeira têm a função de defender os sistemas naturais (como zonas úmidas e praias) contra a erosão e também proteger as obras civis (edifícios, infraestruturas e rodovias) contra possíveis inundações e alagamentos (ALFREDINI, 2005). Conforme Dias (1993), existem dois tipos de técnicas de proteção de zona costeiras: do tipo estruturais, também chamada de “pesadas”, que são: estruturas como esporões, muros de proteção, recifes artificiais, diques, molhes; e do tipo não estruturais (chamadas de “leves”) dentre elas a alimentação artificial de praias e proteção das dunas. A Figura 3 apresenta os indicadores de erosão costeira observados *in loco*, os quais foram utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira no litoral piauiense.

### Cálculo do índice de vulnerabilidade costeira

O IVC integrou três indicadores (Tabela 2): variação de linha de costa, cálculo do NDVI e observações *in loco*, resultando em uma classificação expressa nos seguintes graus de vulnerabilidade: alto (3), médio (2) e baixo (1).

Para o cálculo do índice de vulnerabilidade costeira, foi feito uma média de cada variável por setor. O produto final deste cálculo pode ser visualizado em um mapa, sendo resultante de um arquivo do tipo *shapefile* com a vulnerabilidade conforme o setor em análise. A equação (1) demonstra o cálculo do índice:

$$IVC = V\_LC + C\_NDVI + OBS\_ERO/3 \quad (1)$$

## Resultados e Discussão

### Indicadores de vulnerabilidade a erosão costeira

Os resultados foram separados em três classes de intensidade de erosão. Na Figura 4 encontram-se os três indicadores usados como parâmetros para o cálculo do índice de vulnerabilidade à erosão costeira. No que diz respeito à variação da linha de costa, o setor I, com extensão total de 12 km, apresentou 21,6% de seu total (2,6 km) com feições erosivas, observadas na praia da Pedra do Sal, a jusante do farol, enquanto que a progradação foi caracterizada em 45,9% da área (5,5 km), vista nas proximidades da foz do rio Parnaíba. Isso ocorre devido à foz dos rios ser local de deposição de sedimentos, caracterizando processos de progradação na praia das duas margens do rio (WRIGHT; THOM; HIGGINS, 1980); além disso, o setor I não apresentou alterações significativas nos processos erosivos, possuindo 32,5% (3,9 km) de praias estáveis numa área intermediária entre a foz do rio Parnaíba e a praia da Pedra do Sal. Na outra extremidade deste setor, a praia da Pedra do Sal, possui predominância de erosão costeira, a influência imposta pela presença de afloramentos graníticos nesta praia tem trazido como consequências o recuo da linha de costa a jusante deste afloramento.

O setor II, com extensão de 15 km, apresentou uma maior taxa de progradação entre as praias da Pedra do Sal e das Eólicas. Os 65,3% (9,8 km) de progradação na praia das Eólicas pode ser motivado por esta ser a praia menos urbanizada em relação às demais praias estudadas, onde também encontra-se uma usina eólica; a taxa de erosão obtida foi de 30% (4,5 km) observadas a jusante do espigão situado entre a praia das Eólicas e praia de Atalaia; e com 4,7% (0,7 km) de estabilidade na variação da linha de costa.

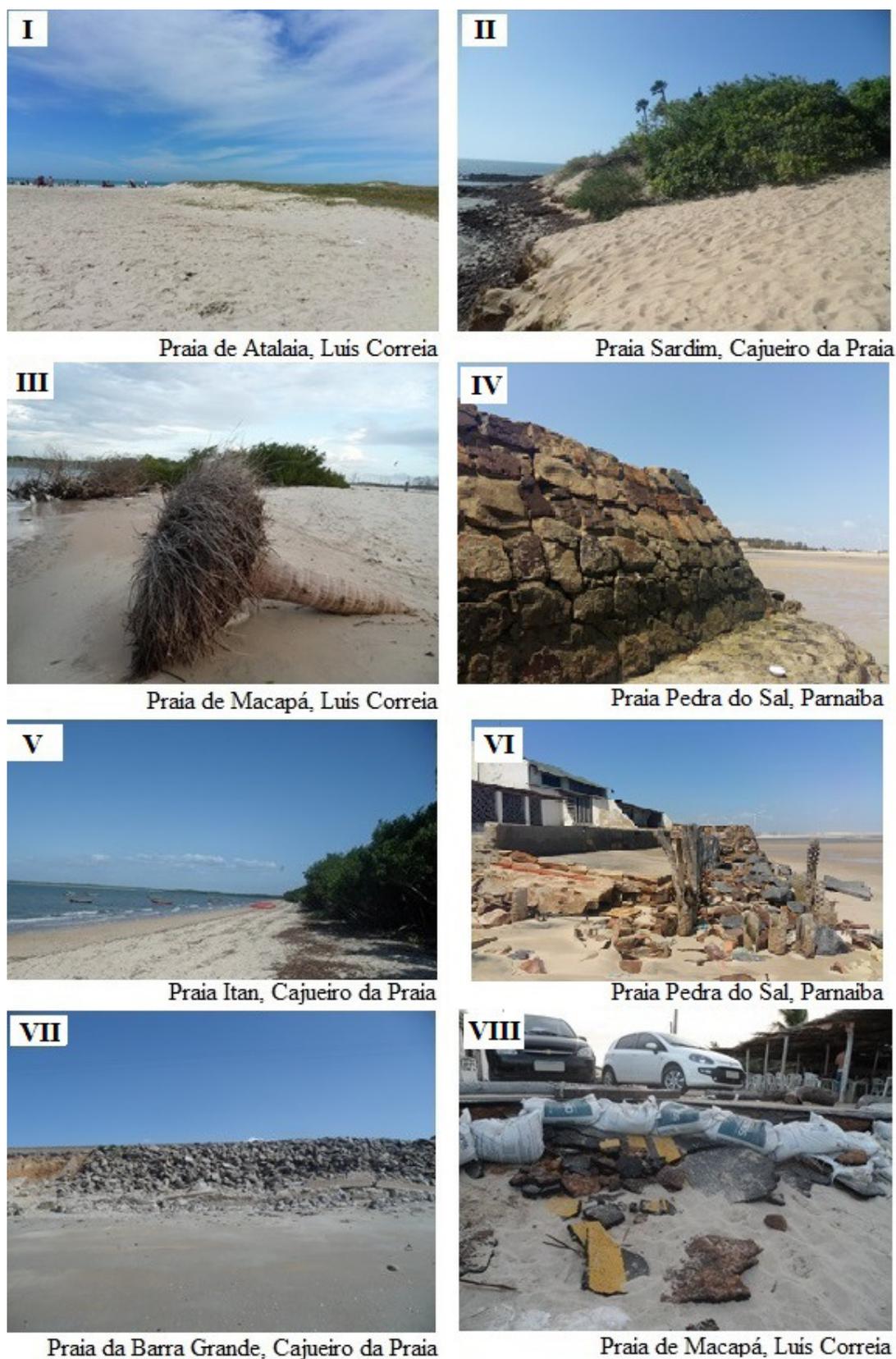


Figura 3 - Exemplos de indicadores visuais utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira: I (vegetação rasteira de duna ou restinga soterrados com raízes expostas), II (escarpa erosiva nas dunas), III (árvores na face da praia ou com raízes expostas), IV (marcas de erosão na base de muros residenciais), V (pós praia estreita ou inexistente), VI (obras não estruturais de proteção costeira), VII (obras estruturais de proteção costeira) e VIII (destruição de estruturas artificiais)

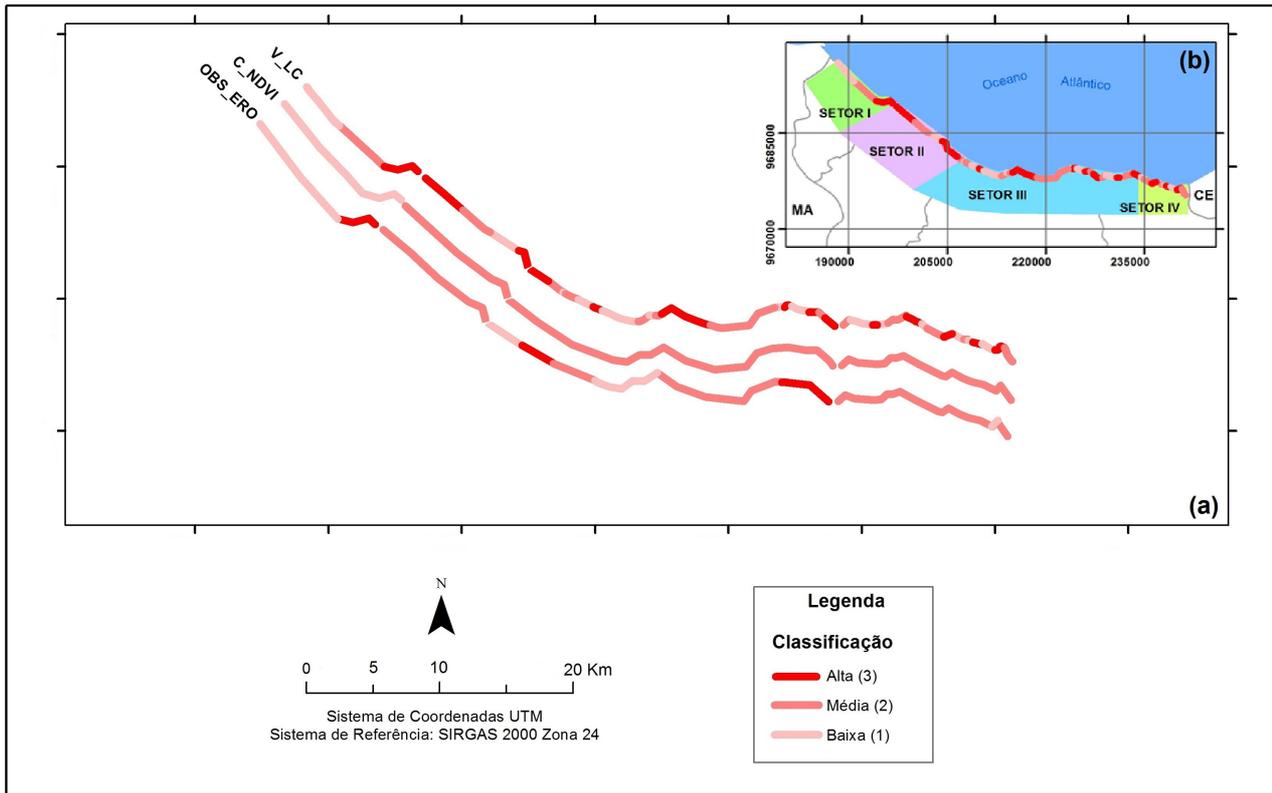


Figura 4 – (a) Indicadores avaliados e classificados de acordo com três graus de vulnerabilidade para cada indicador, onde V\_LC é a variação da linha de costa, C\_NDVI é o cálculo do NDVI e OBS\_ERO são as observações in loco (b) Área estudada com a variação da linha de costa

Tabela 2: Nome dos identificadores que foram utilizados para calcular a vulnerabilidade à erosão costeira

Indicador	Identificador	Classe	Identificador do Grau de Vulnerabilidade
Variação da Linha de Costa	V_LC	<b>Erosão</b>	<b>3</b>
		<b>Progradação</b>	<b>2</b>
		<b>Estabilidade</b>	<b>1</b>
Cálculo do NDVI	C_NDVI	<b>Alto</b> ( $0,5 < NDVI < 1$ )	<b>3</b>
		<b>Médio</b> ( $0,2 < NDVI < 0,5$ )	<b>2</b>
		<b>Baixo</b> ( $NDVI < 0,2$ )	<b>1</b>
Observação <i>in loco</i> de erosão	OBS_ERO	<b>Alto</b>	<b>3</b>
		<b>Médio</b>	<b>2</b>
		<b>Baixo</b>	<b>1</b>

Já o setor III tem uma extensão de 29 km, possuindo 27,5% (8 km) de linha de costa estável, sendo mais acentuada na praia Peito de Moça; com 48% (13,9 km) de recuo de linha de costa, apresentou o resultado mais negativo dos setores estudados, ou seja, uma maior taxa de erosão, a qual tornou-se mais evidente na praia

do Coqueiro e na praia de Macapá. Este último setor possui algumas obras de proteção costeira ao longo de praticamente toda a costa, dentre elas obras não estruturais, como por exemplo, muros com sacos de areia. Essas obras podem ser eficientes, entretanto a forma errônea de instalação e a falta de manutenção

inviabilizaram a finalidade de conter a erosão; e com 24,5% (7,1 km) de progradação observados na praia de Maramar e de Barra Grande como também na praia da Barrinha, este setor é bastante influenciado pelos recifes de arenito que de acordo com Baptista (2010), são considerados definidores de linha de costa, uma vez que podem influenciar a morfologia das praias, protegendo-as contra a erosão costeira.

O setor IV mostrou-se o mais positivo com maior estabilidade da linha de costa, apresentando 37% (3,7 km) de estabilidade; por outro lado, apresentou 28% (2,8 km) de erosão de linha de costa e 35% (3,5 km) de progradação, respectivamente na praia Sardim e na desembocadura do rio Timonha, praia Itan, as quais são praias pouco urbanizadas e influenciadas pela descarga fluvial, que ao entrar em contato com o mar geram a deposição de sedimentos.

A cobertura vegetal é outro fator importante no processo de erosão. Neste estudo, o indicador  $C_{NDVI}$  calculou, pelo valor do píxel, numa análise temporal de 10 anos, o valor médio de cada setor, numa faixa de 10km, no qual o setor I obteve no ano de 2005 a média de 0,15, em 2010 a média foi de 0,12 e em 2015 a média foi de 0,19, apresentando uma classificação (baixo: média = 0,15). Já no setor II apresentou para o ano de 2005 a média de 0,28, em 2010 a média foi de 0,3 e em 2015 a média foi de 0,25, obtendo uma classificação (médio: média = 0,27); o setor III em sua média de 2005 apresentou 0,27, em 2010 foi de 0,21 e em 2015 obteve 0,2, apresentando, por sua vez, uma classificação (médio: média=0,22); e, por fim, o setor IV apresentou no ano de 2005 a média de 0,31, em 2010 foi de 0,17 e em 2015 obteve a média de 0,18, no qual identificou-se uma classificação (médio: média=0,2). Analisando os resultados o setor I, através do NDVI, apresentou uma menor presença de vegetação ao longo de 10 anos, possivelmente afetando a estabilidade da linha de costa. Conforme Muehe (2001), quando o processo de transporte de sedimentos é alterado por destruição da vegetação, o resultado é o desequilíbrio do balanço sedimentar e assim, gerando riscos potencialmente elevados de perda por erosão.

O último indicador analisado,  $OBS_{ERO}$  representa as evidências de erosão, que estão presentes em toda a costa na forma de impactos visuais, sendo os casos mais graves relacionados à presença de obras de proteção costeira não estruturais e destruição de estruturas artificiais. O

setor I inicia-se na desembocadura do Rio Parnaíba e segue em direção leste até o afloramento granítico da praia da Pedra do Sal, com uma extensão de 12 km. É caracterizado por presença de dunas móveis que atingem o curso do Rio Parnaíba, através do seu afluente, o rio dos Morros, permitindo que o sistema fluvial leve os sedimentos de volta ao litoral.

O setor II inicia-se na praia das Eólicas em direção ao enroncamento até a praia de Atalaia, com uma extensão de 15 km. É caracterizado por uma pós-praia com vegetação rasteira e afloramentos de depósitos de paleomangue na praia das Eólicas. Esses afloramentos são encontrados em marés de sizígia dos perfis de inverno (PAULA, 2013). Ocorrem depósitos de sedimentos a montante e a jusante do enroncamento, com intensa progradação da praia e assoreamento do futuro porto.

O setor III inicia-se na praia do Peito de Moça segue em direção à praia do Coqueiro até a desembocadura do Rio Camurupim na praia de Macapá, terminando na praia de Barrinha, com uma extensão de 29 km. É caracterizado por presença de dunas móveis, vegetação de restinga, raízes expostas e afloramentos de arenitos de praia (*beachrocks*) e depósitos de paleomangue. Há presença de erosão costeira, principalmente na praia de Macapá. De acordo com Paula (2013), na praia de Macapá o afloramento de paleomangue está associado à migração da desembocadura fluvial, tendo causado recuo na linha de costa superior a 150 m. A linha de costa junto às desembocaduras é um exemplo de áreas de extrema dinâmica e que mudam, em curto espaço de tempo, independente de intervenções antrópicas. A praia de Barra Grande apresenta uma progradação da praia para oeste, com o crescimento da barra arenosa, dificultando as águas do rio de chegarem ao mar e propiciando a deposição de sedimentos arenosos e argilosos carregados pelo rio Camurupim na foz do mesmo, protegidos pela barra. Logo após o povoado Barrinha, são encontrados grandes afloramentos de *beachrocks*, com erosão costeira e vegetação costeira típica de restinga.

Seguindo ao setor IV na direção leste até desembocadura do Rio Timonha divisa dos estados do Piauí e Ceará, com extensão de 10 km. Este setor, por fim, apresenta uma vegetação rasteira e escarpa erosiva, possuindo uma erosão moderada

em suas praias. Foram verificados afloramentos de *beachrocks* na praia de Sardim, que são provas de antigas faixas praias.

**Vulnerabilidade à erosão costeira**

A fim de obter a vulnerabilidade à erosão costeira do litoral do Piauí, foi realizado uma média das variáveis estudadas em cada setor através dos segmentos da linha de costa utilizando a ferramenta *Field Calculator* do *software* ArcGIS. Os valores do cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira calculados para toda a área de estudo estão situados dentro do intervalo de 1 a 2,66. A partir dessa média foram definidos, utilizando o valor do *IVC* de Martins (2015), três intervalos correspondentes ao nível de vulnerabilidade (Tabela 3).

**Tabela 3: Relação entre os intervalos do IVC e os graus de vulnerabilidade**

Valor <i>IVC</i>	Grau de Vulnerabilidade
<1,70	Baixa
1,70 – 2,19	Médio
>2,19	Alta

Fonte: Martins (2015)

A seguir um exemplo, da inserção dos indicadores da equação (1) na composição dos índices finais, para o setor I no seguimento de número 3: localiza-se a praia da Pedra do Sal, para o qual foi encontrado o seguinte resultado: *V\_LC*= 3; *C\_NDVI*=1; *OBS\_ERO*=3; e *IVC*=2,33. Com este valor de *IVC* o segmento foi classificado com o grau de vulnerabilidade Alta (Tabela 3).

**Tabela 4: Exemplo da inserção dos indicadores de vulnerabilidade à erosão costeira do segmento 3**

INDICADOR	CLASSE	IDENTIFICADOR
<i>V_LC</i>	Erosão	3
<i>C_NDVI</i>	Baixo	1
<i>OBS_ERO</i>	Alto	3

E na figura 5 é possível observar que a praia da Pedra do Sal possui indicador visual de erosão alto, como por exemplo, destruição de estruturas artificiais. Paula (2013) comenta que a destruição destas estruturas artificiais foi intensificada pela difração gerada nas ondas pelo afloramento de rochas graníticas no local, o que fez recuar em mais de 100m o setor a jusante, fazendo assim desaparecer parte da estrada de acesso à praia.



Figura 5 - Indicador visual de erosão: destruição de estruturas artificiais – vulnerabilidade alta

Os resultados apresentados no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira, mostraram que, em geral, o grau de vulnerabilidade à erosão no litoral do estado do Piauí é alta em 31,44%, médio em 33,45% e baixa em 30,6% da região costeira. Destaca-se como vulnerabilidade baixa principalmente o setor I, tendo como resultados

o grau de vulnerabilidade baixo em 54,2%, médio em 19,1% e alto em 26,7%. A Figura 6 apresenta os resultados detalhados para cada setor destacando o percentual alto encontrado na faixa da praia da Pedra do Sal, por conta da erosão da linha de costa e do indicador visual, que prevaleceu a destruição de estruturas artificiais.

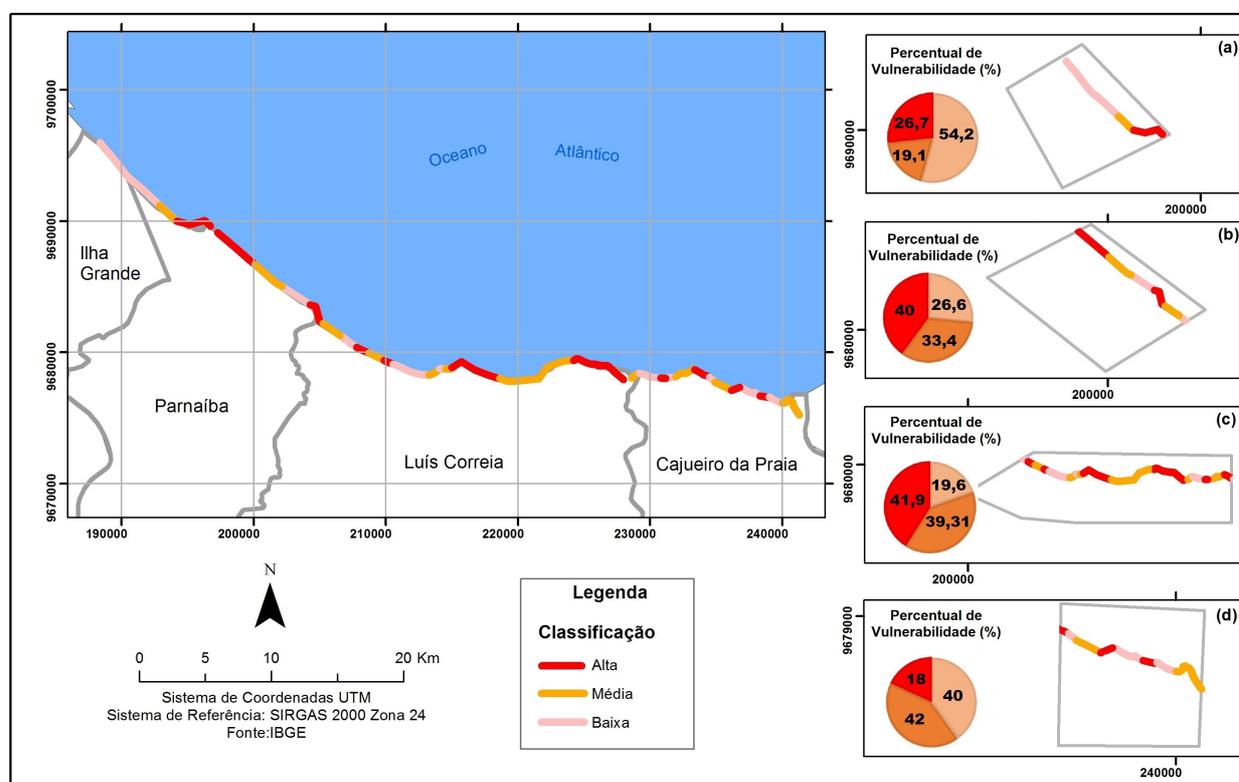


Figura 6 - Mapa de vulnerabilidade à erosão costeira do litoral do estado do Piauí (a) Setor I (b) Setor II (c) Setor III (d) Setor IV

Constatou-se, pois, que os setores II e III principalmente nas praias do Coqueiro e Macapá vêm sofrendo com processos erosivos e possuem indicadores de erosão graves, como por exemplo, obras de proteção costeira não estruturais e destruição de estruturas artificiais, com uma alta vulnerabilidade de 40% e 41,09% respectivamente, apresentando o grau de vulnerabilidade médio em 33,4% e 39,31% e baixa vulnerabilidade 26,6% e 19,6%, respectivamente. Já no setor IV, o grau de vulnerabilidade à erosão está moderado com 42%, apresentando uma baixa de 40% e alta 18%, além de a maioria das praias desse setor estarem bem conservadas, apresentando assim uma considerável estabilidade da linha de costa.

## Conclusão

Este estudo teve como produto o mapeamento da vulnerabilidade à erosão costeira para o estado

do Piauí, sendo o menor litoral em extensão do Brasil (66km) apresentando alto risco à erosão costeira em 31,44% das suas praias. Isso corrobora a importância de tais informações para aprimorar planos de manejo costeiro, que por sua vez, podem afetar o cotidiano das pessoas que residem no ambiente costeiro, e principalmente o setor econômico ligado ao turismo.

Os indicadores ambientais na observação *in loco* em maior número na zona costeira do estado do Piauí foram: obras de proteção costeira não estruturais e destruição de estruturas artificiais, mais presentes na praia da Pedra do Sal e praia do Macapá, setores I e III, respectivamente. O setor I apresentou a menor presença de vegetação durante os anos estudados, devido ao possível fato de ser o mais urbanizado. Foi observado que no indicador da variação da linha de costa, o setor III apresentou

o resultado mais negativo, no que se refere ao recuo de linha de costa, com a taxa de erosão de 48%, acentuada principalmente na praia de Macapá, na qual **há uma tendência generalizada** ao processo de avanço das águas oceânicas sobre o continente, que pode estar relacionado com a dinâmica costeira e com a intensa retirada de sedimentos, através do trabalho de deposição e transporte dos rios Cardoso e Camurupim, que deságuam no oceano em forma de estuário. Já o setor II apresentou a maior taxa de progradação da linha de costa, com 65,3%, entre a praia da Pedra do Sal e praia das Eólicas visto que a linha de costa junto às desembocaduras é um exemplo de áreas de extrema dinâmica. O setor IV apresentou o cenário mais positivo com 37% de estabilidade da linha de costa, onde encontram-se praias de baixa ocupação e uso sazonal.

Entre as vantagens da aplicação do índice de vulnerabilidade costeira (IVC) encontram-se: (i) facilidade de aplicação da fórmula analítica e posterior classificação em três intensidades: *alta*, *média* ou *baixa*; (ii) possibilidade de adaptação das variáveis de entrada conforme os indicadores de erosão costeira observados *in loco*, ou seja, é possível aplicar a mesma metodologia para diferentes regiões; e (iii) integração de informações extraídas a partir de imagens de satélites, tanto para extração do NDVI como para o estudo da variação da linha de costa.

Como recomendações para estudos futuros, indica-se a importância do monitoramento costeiro, bem como a aquisição de informações espaciais temporais, destacando-se que a qualidade dos dados de entrada para o cálculo da vulnerabilidade costeira à erosão depende diretamente destes produtos. Ressalta-se a aquisição e uso de imagens de satélites totalmente gratuitas, contudo, por outro lado recorda-se que a parte de campo foi a mais laboriosa, exigindo-se que fosse percorrida toda a extensão da área de estudo.

### Agradecimentos

Ao Instituto Federal do Piauí e a CAPES.

### Referências Bibliográficas

ALATORRE, L.; SÁNCHEZ-CARRILLO, S.; MIRAMONTES-BELTRÁN, S. Temporal changes of NDVI for qualitative

environmental assessment of mangroves: shrimp farming impact on the health decline of the arid mangroves in the Gulf of California (1990–2010). **Journal of Arid Environments**, v. 125, p. 98-109, 2016.

ALFREDINI, P. **Obras e gestão de portos e costas, a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BAPTISTA, E. M. C. **Estudo morfossedimentar dos recifes de arenito da zona litorânea do estado do Piauí, Brasil**. 305p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

BAPTISTA, J. G. **Geografia física do Piauí**. 2 ed. Teresina: COMEPI. 366p, 1981.

BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: A review. **Journal of Coastal Research**, v.21(4), 688–703, 2005.

BUSH, D.M.; NEAL, W.J.; YOUNG, R.S.; PILKEY, O.H. - Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. **Ocean & Coastal Management**, V. 42, N. 8, p. 647-670, 1999.

CARVALHO, DÉLTON WINTER. A zona costeira brasileira e o gerenciamento dos danos ambientais futuros. **Revista Lusíada: Direito e Ambiente**, v. esp, p. 97-111, Portugal, 2011.

CENCI, L.; DISPERATI, L. PERSICILLO, M. G.; OLIVEIRA, E.R.; ALVES, F.L.; PHILLIPS, M. Integrating remote sensing and GIS techniques for monitoring and modeling shoreline evolution to support coastal risk management. **GIScience & Remote Sensing**, p. 1-21, 2017.

CHOUHAN, R; RAO, N. Vegetation Detection in Multispectral Remote Sensing images: Protective Role-Analysis of Vegetation i. 0042 **Indian Ocean Tsunami**. PDPM Indian Institute of Information Technology. 2011. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/2011/gi4dm/pdf/op37.pdf>>. Acesso em: 07 nov 2016.

CODEVASF. **Plano de ação para o desenvolvimento integrado da bacia do Parnaíba**:

(PLANAP – Projeto CODEVASF/OEA/BRA/02/001. 2006. Disponível em: <[http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoes-atuais/pdf/livro\\_01.pdf](http://www.codevasf.gov.br/principal/publicacoes/publicacoes-atuais/pdf/livro_01.pdf)>. Acesso em: 24 jan 2017.

DENNER, K.; PHILLIPS, M.R.; JENKINS, R.E.; THOMAS, T. A coastal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales. **Ocean and Coastal Management**, v. 116, 478–490, 2015.

- DIAS, J. M. A. Estudo de avaliação da situação ambiental e propostas de medidas de salvaguarda para a faixa costeira portuguesa (parte de geologia costeira). **Liga para a Proteção da Natureza / Ministério do Ambiente**. Lisboa, 137p. 1993. Disponível em: <[http://w3.ualg.pt/%7Ejldias/JAD/eb\\_Ambicost.html](http://w3.ualg.pt/%7Ejldias/JAD/eb_Ambicost.html)> Acesso em: 15 ago 2017.
- DŽUBÁKOVÁ, K.; MOLNAR, P.; SCHINDLER, K.; TRIZNA, M. Monitoring of riparian vegetation response to flood disturbances using terrestrial photography. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 195-208, 2015.
- GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 89, n. 4, p. 379-398, 1991.
- GONÇALVES, R. M. **Modelagem de tendência a curto-prazo da linha de costa através de dados geodésicos temporais utilizando regressão linear, estimativa robusta e redes neurais artificiais**. Curitiba, UFPR. Tese de doutorado, programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas, 152p, 2010.
- GONCALVES, R. M.; AWANGE, J. L. Three Most Widely Used GNSS-Based Shoreline Monitoring Methods to Support Integrated Coastal Zone Management Policies. **Journal of Surveying Engineering**, v. 143, p. 05017003-05017003-11, 2017.
- IBGE. **Dados do Censo 2010** - publicados no sítio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<http://http://cidades.ibge.gov.br>> Acesso em: 18 mar 2017.
- JACOBSON, C.; CARTER, R. W.; THOMSEN, D. C.; SMITH, T. F. Monitoring and evaluation for adaptive coastal management. **Ocean and Coastal Management**, v. 89, 51–57, 2014.
- LINS-DE-BARROS, F. M. **Contribuição metodológica para análise local da vulnerabilidade costeira e riscos associados: estudo de caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, 2010.
- MAIA, L.P.- Projeto Nordeste – **Definição e quantificação dos processos costeiros no litoral do estado do ceará: implicações para a gestão adequada da zona litorânea**. 2005.
- MALLMANN, D. L. B. **Vulnerabilidade do litoral sul de Pernambuco à erosão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 125p. Recife, 2008.
- MARTINS, K. **Vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas através de indicadores em Pernambuco, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 107p. Recife, 2015.
- MENDONÇA, F. J. B. **Posicionamento de alta resolução: adequação e aplicação à morfologia costeira**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 96p. Recife, 2005.
- MENEZES, A. F. **Análise da vulnerabilidade à erosão costeira no estado de Pernambuco através de indicadores ambientais e antrópicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 95p. Recife, 2015.
- MUEHE, D. Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 35-44, 2001.
- NARDEZ, N. N.; GONÇALVES, R. M.; SOARES, C. R.; KRUEGER, C. P. Classificação fuzzy da vulnerabilidade aos processos costeiros em Pontal do Paraná, Brasil. **Revista Pesquisas em Geociências**, ISSN 1518-2398, p. 169-181, 2016.
- PAULA, J. E. A. **Dinâmica morfológica da planície costeira do estado do Piauí: evolução, comportamento dos processos costeiros e a variação da linha de costa**. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 247 p, 2013.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos. 176p, 2012.
- QUEIROZ, H. A. A. **Classificação da faixa litorânea através do índice de vegetação NDVI e sua correlação com a vulnerabilidade à erosão costeira**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 68p. Recife, 2017.
- RAMOS, J. M. F. O índice de vulnerabilidade costeira para a costa central do estado da Bahia. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 2004. **Anais...** Disponível em: <[http://www.abequa.org.br/trabalhos/0269\\_o\\_indice\\_de\\_vulnerabilidade\\_costeira\\_para\\_a\\_costa.pdf](http://www.abequa.org.br/trabalhos/0269_o_indice_de_vulnerabilidade_costeira_para_a_costa.pdf)> Acesso em: 01 nov. 2016.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SHELL, J.A., DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS-1**. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. 1. NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., p. 309–317. 1974.
- SILVA, L. M.; GONÇALVES, R. M.; LIRA, M. M. S.; PEREIRA, P. S. Modelagem Fuzzy aplicada na detecção da vulnerabilidade à erosão costeira. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 19, nº4, p.746-764, 2013.
- SOUZA, C. R. D. G. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 1, p. 17–37, 2009.

WAMSLEY, T.; COLLIER, Z.; BRODIE, K.; *et al.* Guidance for Developing Coastal Vulnerability Metrics. **Journal of Coastal Research**, v. 31, n. 6, 2015.

WRIGHT, L. D.; THOM, B. G.; HIGGINS, R. J. Wave influences on river-mouth depositional process: examples from Australia and Papua New Guinea. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 11, n. 3, p. 263–277, 1980.