



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**CURSO DE GEOLOGIA**

**CLÁUDIO ÂNGELO DA SILVA NETO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CANAIS DE MARÉ NA DINÂMICA COSTEIRA  
EM ICAPUÍ (CE) ATRAVÉS DE SENSORES REMOTOS ÓTICOS**

**FORTALEZA**  
**2019**

CLÁUDIO ÂNGELO DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CANAIS DE MARÉ NA DINÂMICA COSTEIRA EM  
ICAPUÍ (CE) ATRAVÉS DE SENSORES REMOTOS ÓTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Geologia da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção  
do título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Cynthia Romariz  
Duarte (UFC).

Co-orientador: Prof. Dr. Michael  
Vandesteem Silva Souto (UFRN).

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S579a Silva Neto, Cláudio Ângelo da.  
Avaliação da Influência de Canais de Maré na Dinâmica Costeira em Icapuí (CE) através de Sensores Remotos Óticos / Cláudio Ângelo da Silva Neto. – 2019.  
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Geologia, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.  
Coorientação: Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto.

1. Erosão costeira. 2. Canais de maré. 3. Sensoriamento remoto. 4. Icapuí. I. Título.

CDD 551

---

CLÁUDIO ÂNGELO DA SILVA NETO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE CANAIS DE MARÉ NA DINÂMICA COSTEIRA EM  
ICAPUÍ (CE) ATRAVÉS DE SENSORES REMOTOS ÓTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Geologia da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção  
do título de Bacharel em Geologia.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cynthia Romariz Duarte (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Junior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Wellington Ferreira da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

A meus avós, Cláudio e Mary, por tudo que fizeram por mim.

À minha mãe, Lindalva, pelo amor, compreensão e apoio que sempre me proporcionou.

À Universidade Federal do Ceará (UFC) pela infraestrutura de ensino e apoio a viagens de campo e participação em eventos durante a graduação.

Aos professores Dr<sup>a</sup>. Cynthia Romariz Duarte, Dr. Michael Vandesteem Silva Souto e Dr<sup>a</sup> Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro por todo o apoio, incentivo e conselhos que sempre me deram durante o período de graduação na UFC.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Junior e Dr. Wellington Ferreira da Silva Filho pelo tempo, valiosas colaborações e sugestões.

A Joyce pelo companheirismo, compreensão e apoio contínuo.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) pela convivência diária, em especial ao Allison, Eduardo, Mateus e Maykon.

Aos amigos Dominick, Eduardo, Letyicia e Nildo pela convivência durante estes anos e os mais que ainda virão.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Geologia da UFC.

Aos colegas de turma de turma pela convivência durante o período de graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro com a manutenção de bolsas de iniciação científica e tecnológica.

“Seu tempo é limitado, então não o desperdice vivendo a vida de outra pessoa. Não fique preso a um dogma – que é viver pelos resultados do que outras pessoas pensam. Não deixe o ruído da opinião dos outros diminuir a sua voz interior. E o mais importante, tenha a coragem de seguir seu coração e sua intuição. Eles de alguma forma já sabem o que você realmente quer se tornar. Todo o resto é secundário” (Steve Jobs).

## RESUMO

A erosão costeira tem afetado de forma severa algumas porções da linha de costa do município de Icapuí, localizado no extremo leste do litoral do estado do Ceará. Em particular, as praias de Barreiras de Cima e Barrinha, sofrem efeitos erosivos de marés desde o início dos anos 2010. Neste contexto, uma feição morfológica que também variou ao longo das últimas décadas é o conjunto de canais de maré localizados na desembocadura da planície estuarina de Icapuí. Através da análise temporal de imagens orbitais da série Landsat foram identificados os *hotspots* erosivos e deposicionais ao longo da linha de costa do município. A aplicação de realces no histograma das imagens e o MNDWI auxiliaram na identificação dos canais de maré. Percebeu-se que eles promovem um barramento hidráulico retendo os sedimentos da deriva litorânea e transportando-os para longe da linha de costa a sotamar, gerando déficit sedimentar e erosão localizada. Imagens do satélite RapidEye possibilitaram um melhor detalhamento dos canais de maré e seus bancos de areia adjacentes. A existência de ondas de areia com sentido de fluxo prevalecente de maré vazante pode aumentar o fator de confinamento das correntes de maré durante a enchente, amplificando sua energia e poder erosivo sobre a linha de costa a sotamar. Em meados de 2011, dois canais de maré se uniram, amplificando o efeito de molhe hidráulico. Este pode ter sido um dos processos que influenciaram no aumento dos efeitos da erosão costeira a partir deste ano. Após serem gerados, os canais de maré sofrem interação com as correntes de ondas, marés e deriva litorânea, migrando em sentido a sotamar ao longo do tempo. A disposição destes canais, se paralelos ou perpendiculares à linha de costa, pode influenciar na sazonalidade de *by-pass* sedimentar para as praias adjacentes. A avaliação de dados multifonte de sensores remotos propiciou um melhor entendimento da dinâmica dos canais de maré em Icapuí, evidenciando sua relação direta com a intensificação de processos de erosão costeira no município.

**Palavras-chave:** Erosão costeira. Canais de maré. Sensoriamento remoto. Icapuí.

## ABSTRACT

The coastal erosion has severely affected some portions of the coastline of the Icapuí, city, located on the eastern coast of the state of Ceará. In particular, the beaches of Barreiras de Cima and Barrinha have erosional effects of tides since the beginning of the 2010s. In this context, a morphological feature that also varied during the last decades is the set of tidal channels located at the mouth of the Icapuí estuarine plain. Through the temporal analysis of orbital images of the Landsat series, erosional and depositional hotspots were identified along the coastline of the city. The application of highlights in the histogram of images and the MNDWI helped to identify the tidal channels. It was noticed that they promote a hydraulic blockade retaining the sediments of the coastal drift and also transporting it away from the coastline, causing sedimentary deficit and localized erosion. Images from the RapidEye satellite provided a better detailing of tidal channels and their adjacent shoals. The existence of sand waves with a prevailing flow direction of ebb can increase the confinement factor of currents during flood tides, amplifying its energy and erosional power on the coastline downdrift. In the middle of 2011, two tidal channels were merged, amplifying the groine effect. This may have been one of the processes that influenced the increased effects of coastal erosion in that year. After being generated, the tidal channels interacted with waves and tides currents, and also coastal drift, migrating downdrift over time. The arrangement of these channels, whether parallel or perpendicular to the coastline, may influence in the sedimentary by-pass seasonality to the adjacent beaches. The evaluation of multisource remote sensing data provided a better understanding of the dynamics of tidal channels in Icapuí, evidencing its direct relationship with the intensification of coastal erosion processes in that city.

**Keywords:** Coastal erosion. Tidal channels. Remote sensing. Icapuí.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consequências dos processos erosivos entre as praias de Barreiras de Cima e Barrinhas, no município de Icapuí, no início dos anos 2000 .....	15
Figura 2 – Instalação de obra de contenção da erosão costeira na praia de Barrinha .....	16
Figura 3 – Erosão concentrada a sotamar da estrutura de contenção construída	17
Figura 4 – Mapa de localização do município de Icapuí (CE) .....	18
Figura 5 – Localização da área de estudo no contexto geológico da Bacia Potiguar .....	19
Figura 6 – Unidades geomorfológicas da planície costeira de Icapuí .....	20
Figura 7 – Visualização do proposto delta de maré em Icapuí .....	21
Figura 8 – Mosaico de imagens panorâmicas do delta de maré de Icapuí durante a baixa-mar, destacando morfologias associadas .....	21
Figura 9 – Fotografias mostrando o limite entre porção seca e molhada .....	25
Figura 10 – Modelo morfológico de um delta de maré vazante. As setas indicam o sentido de fluxo dominante das marés .....	28
Figura 11 – Curvas de tempo e velocidade de correntes de maré para um delta de maré vazante, ilustrando o princípio da assimetria tempo-velocidade .....	29
Figura 12 – Fluxograma com resumo da metodologia executada .....	30
Figura 13 – Representação dos dados necessários para calcular a variação temporal da linha de costa no DSAS .....	32
Figura 14 – Localização dos quatro setores propostos para avaliação dos métodos quantitativos e qualitativos .....	34
Figura 15 – Espacialização dos transectos gerados ao longo da linha de costa e suas taxas anuais de variação, classificando-as em função do EPR ..	36
Figura 16 – Aplicação do DSAS no setor leste da área de estudo .....	38

Figura 17 – Aplicação do DSAS no setor central leste da área de estudo .....	39
Figura 18 – Aplicação do DSAS no setor central oeste da área de estudo .....	40
Figura 19 – Aplicação do DSAS no setor oeste da área de estudo .....	41
Figura 20 – Espacialização dos polígonos de mudança gerados a partir da variação da linha de costa durante o período analisado .....	42
Figura 21 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor leste da área de estudo .....	43
Figura 22 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor central leste da área de estudo .....	44
Figura 23 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor central oeste da área de estudo .....	46
Figura 24 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor oeste da área de estudo .....	47
Figura 25 – Visualização dos sedimentos em suspensão dispersos a partir da ação dos canais de maré, capturando-os na planície de maré e transportando-os a barlamar, em posição mais afastada da linha de costa .....	49
Figura 26 – Visualização da capacidade de captura e redistribuição dos sedimentos em deriva litorânea por parte dos canais de maré. Realces no histograma da imagem possibilitaram um maior contraste deste processo .....	50
Figura 27 – Visualização das macroondulações existentes entre os canais de maré da região estudada. O fluxo canalizado entre elas está defronte as praias de Barreiras de Cima e Barrinhas, dois <i>hotspots</i> erosivos .....	51
Figura 28 – Modelos de <i>by-pass</i> sedimentar condicionados por canais de maré ..	52
Figura 29 – Imagens aéreas da década de 1980 indicam que as macroondulações já existiam naquele período .....	53

- Figura 30 – Série temporal de imagens orbitais exibindo o comportamento dos canais de maré durante o período de análise. A seta em vermelho destaca o sentido de migração dos canais de maré ..... 54
- Figura 31 – Mapa de entalhes da plataforma continental do Estado do Ceará. Detalhe para a porção destacada em azul defronte a posição da planície costeira de Icapuí, que parece atuar como um divisor dos entalhes ..... 56
- Figura 32 – Orientação da declividade da plataforma continental de Icapuí. Detalhe para a porção destacada em vermelho ..... 57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Visualização das taxas de variação da linha da costa, de oeste para leste, evidenciando as três porções mais dinâmicas da área .....	37
Gráfico 2 – Balanço sedimentar do setor leste em intervalos de anos .....	43
Gráfico 3 – Balanço sedimentar acumulado do setor leste .....	43
Gráfico 4 – Balanço sedimentar do setor central leste em intervalos de anos .....	45
Gráfico 5 – Balanço sedimentar acumulado do setor central leste .....	45
Gráfico 6 – Balanço sedimentar do setor central oeste em intervalos de anos .....	46
Gráfico 7 – Balanço sedimentar acumulado do setor central oeste .....	46
Gráfico 8 – Balanço sedimentar do setor oeste em intervalos de anos .....	48
Gráfico 9 – Balanço sedimentar acumulado do setor central oeste .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Imagens orbitais utilizadas na caracterização da linha de costa .....	31
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Localização e Vias de Acesso</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Contexto Geológico-Geomorfológico</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Aspectos Hidrodinâmicos</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Zona Costeira</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Linha de Costa</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>Erosão Costeira</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>Deltas de Maré</b> .....	<b>27</b>
<b>3.5</b>	<b>Canais de Maré</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Aquisição de Dados</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Processamento</b> .....	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Integração e Análise</b> .....	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS <i>HOTSPOTS</i> EROSIVOS E DEPOSICIONAIS</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1</b>	<b>Aplicação do DSAS</b> .....	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Aplicação do Método de Mudança do Polígono</b> .....	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>INFLUÊNCIA DOS CANAIS DE MARÉ NA DINÂMICA COSTEIRA LOCAL</b> .....	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>

## 1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O presente trabalho visa o cumprimento das normas curriculares da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Curso de Graduação Geologia da Universidade Federal do Ceará, necessária para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

### 1.1 Introdução

O município de Icapuí engloba uma área cujos uso e ocupação do solo aumentaram significativamente nas últimas décadas, influenciados pelo aumento da população local, instalação de indústrias (petrolífera, salineira, carcinicultura e eólica) e empreendimentos turísticos. Trabalhos recentes efetuados na área de estudo (MUEHE, 2006; XIMENES, 2013; FERNANDES *et al.*, 2015; SOUZA, 2016; e BARROS, 2018) indicam que o município de Icapuí passa por fortes modificações da linha de costa em curtos intervalos de tempos, promovidos por uma série de variáveis naturais e antrópicas.

A erosão costeira tem afetado de forma devastadora as comunidades que ficam situadas próximas à linha de costa do município. Conseqüentemente, várias famílias tiveram suas casas destruídas, principalmente as moradias de pescadores, ou seja, a camada social mais afetada com o problema.

Para dar suporte a estudos que visam monitorar os processos de erosão costeira, faz-se necessário o emprego de bases de dados eficientes, que possibilitem a criação de modelos matemáticos precisos, permitindo quantificar e calcular a taxa de erosão em um dado período de tempo, de forma mais eficiente e rápida (SOUSA *et al.*, 2017).

Utilizando imagens de satélite e perfis praias, Barros (2018) realizou o monitoramento de alguns setores de Icapuí com conhecida tendência erosiva. Este mesmo autor também identificou, através do inventário de notícias de jornais cearenses, que o período entre 2011 e 2014 foi o mais crítico em relação a processos erosivos no município, em especial nas praias de Barreiras de Cima e Barrinha (Figura 1), destacando que a maré é o principal agente atuante nos trechos em questão, devido à sua amplitude que pode atingir até 4 metros em picos relacionados a eventos de sizígia, superluas e ressacas. Estes aspectos, associados à baixa

declividade do perfil praiar, seriam os principais responsáveis, de acordo com aquele autor, pela erosão costeira nas praias em questão.

Figura 1 – Consequências dos processos erosivos entre as praias de Barreiras de Cima e Barrinhas, no município de Icapuí, no início dos anos 2000.



Fonte: extraído de Barros (2018).

Meireles (2012) e Souza (2016) citam a ocupação desordenada de zonas de berma e *by-pass* de sedimentos como sendo os principais agentes responsáveis por potencializar os efeitos da erosão costeira nas áreas citadas.

Além dos fatores e processos naturais já citados, Souza (2016) relata que variações nos comportamentos climáticos, os processos oceanográficos e costeiros, a fisiografia da linha de costa e feições como estuários e promontórios podem contribuir para as variações da linha de costa de Icapuí. Este mesmo autor ainda cita a presença de um delta de maré, feição localizada no setor central da planície costeira do município, como possível contribuinte para o balanço sedimentar negativo das praias a sotamar, pois causaria a retenção de sedimentos em deriva provenientes de barlamar e do estuário Barra Grande.



A fim de minimizar os impactos causados pela erosão costeira, em especial nas praias de Barreiras de Baixo e Barrinha, em 2011 foi instalado um muro de contenção, do tipo enrocamento (Figura 2). Esta obra favoreceu localmente os efeitos erosivos imediatamente a sotamar (Figura 3), pois apesar da proteção que passou a exercer ela também teve um efeito de captura e retenção de sedimentos, aumentando ainda mais o déficit nas praias adjacentes (BARROS, 2018).

Figura 2 – Instalação de obra de contenção da erosão costeira na praia de Barrinha.



Fonte: extraído de Barros (2018).

Como se percebe, já existe uma variedade de estudos executados no âmbito de avaliação da dinâmica costeira recente de Icapuí. Porém, há um conjunto de feições morfológicas que, assim como a linha de costa, variou bastante ao longo das últimas décadas, e ainda carece de estudos mais aprofundados, a fim de determinar seu grau de influência nos processos erosivos e deposicionais da área. Tratam-se dos canais de maré localizados no centro da planície costeira de Icapuí e que, conforme Souza (2016) e outros autores, seriam a expressão de um delta de maré.

Neste contexto, a pesquisa desenvolvida apoiou-se na identificação dos setores com tendências erosivas e deposicionais mais críticas e avaliação da influência dos canais de maré na dinâmica costeira recente de Icapuí, subsidiando-se de dados de sensores remotos óticos e técnicas e ferramentas de geoprocessamento.

Figura 3 – Erosão concentrada a sotamar da estrutura de contenção construída.



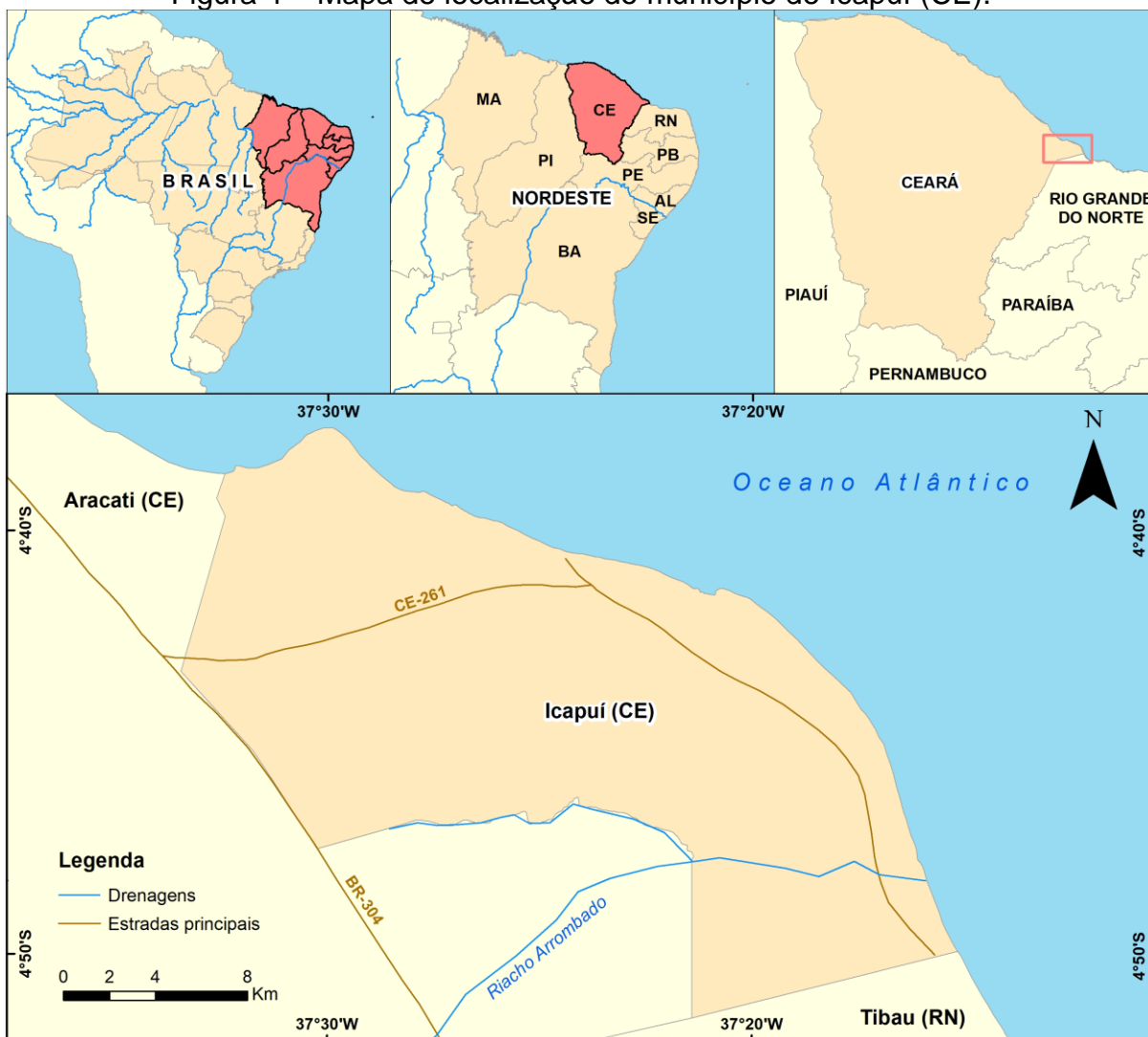
Fonte: extraído de Barros (2018).

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização e Vias de Acesso

A área de pesquisa proposta é o litoral do município de Icapuí, localizado no extremo leste do estado do Ceará (Figura 4), distante cerca de 190 km da sua capital, Fortaleza, fazendo fronteira com os municípios de Aracati (CE) e Tibau (RN).

Figura 4 – Mapa de localização do município de Icapuí (CE).



Fonte: elaborado pelo autor.

Icapuí possui uma linha de costa com aproximadamente 45 km de extensão, representando um dos mais complexos sistemas ambientais da zona costeira do Ceará. Seu litoral sofre influência do transporte eólico e da dinâmica costeira, que são responsáveis por variações na taxa de erosão e deposição sedimentar, promovendo mudanças no fluxo de canais de marés e variações de balanço sedimentar da linha de costa pela interação entre aporte sedimentar e espaço de acomodação, dando origem a processos de progradação e retrogradação da linha de costa (SANTOS *et al.*, 2011; AMARO *et al.*, 2012; DAMASCENO *et al.*, 2014).

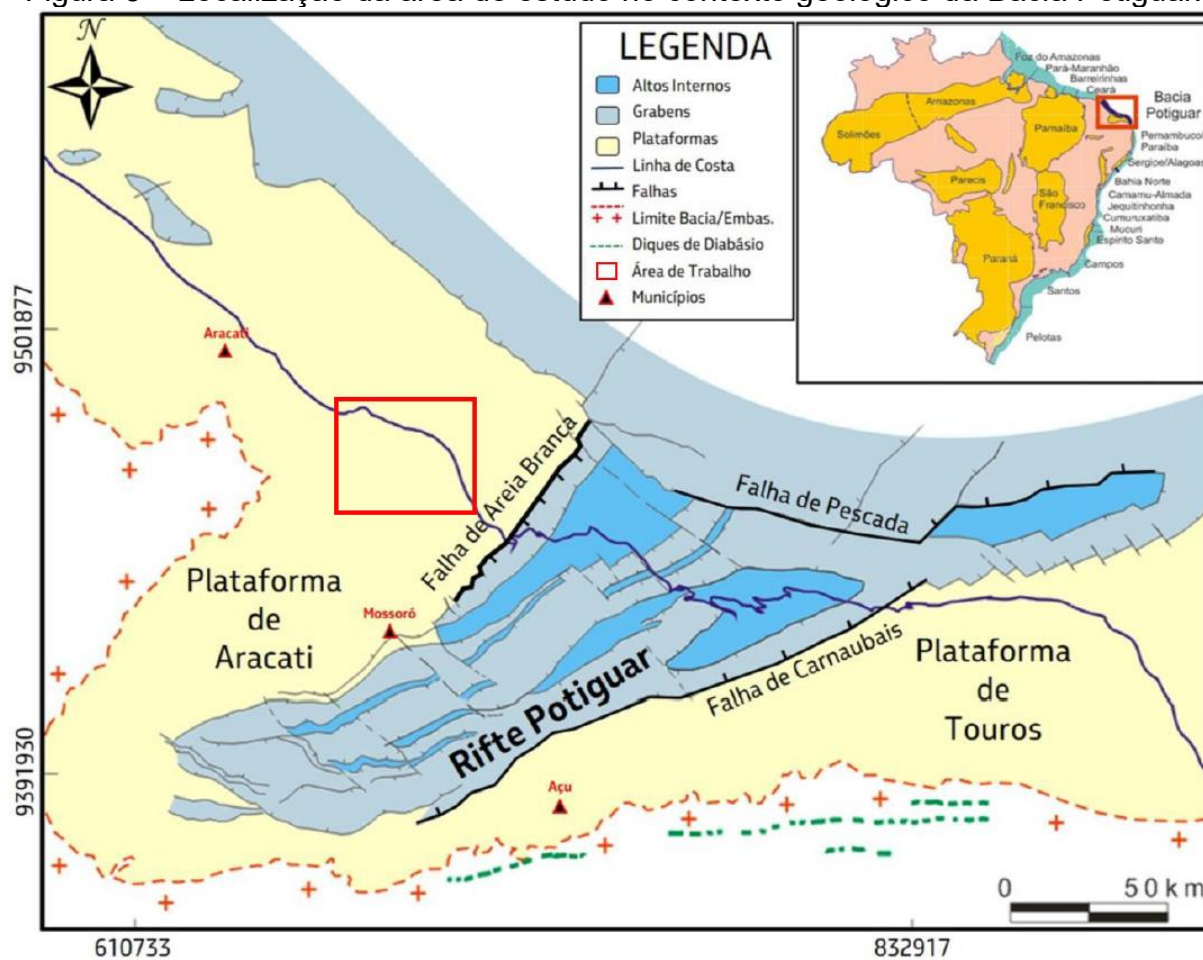
O acesso ao município pode ser feito, a partir de Fortaleza, através da rodovia CE-040 com sentido para leste. Ao chegar na sede do município de Aracati, segue-se pela rodovia BR-304. Em seguida, após cerca de 30 km, faz-se uma curva para a esquerda, entrando na rodovia CE-261, nas proximidades dos campos de

petróleo da Fazenda Belém. Esta última estrada dá acesso à sede do município de Icapuí e demais acessos secundários.

## 2.2 Contexto Geológico-Geomorfológico

A área em estudo está inserida regionalmente no contexto tectono-estratigráfico da Bacia Potiguar (Figura 5), cuja gênese está relacionada a esforços distensivos durante o Cretáceo Inferior gerados a partir da separação das placas sul-americana e africana, culminando no rifteamento que condicionou a formação e sedimentação da bacia (OLIVEIRA, 2009).

Figura 5 – Localização da área de estudo no contexto geológico da Bacia Potiguar.



Fonte: adaptado de Braga Junior, 2016

Partindo para um contexto local, Pedrosa (2016) relata que o litoral de Icapuí é constituído, fundamentalmente, por rochas sedimentares (formações Tibau e Barreiras) e sedimentos Quaternários (faixas de praia, dunas e depósitos flúvio-

marinhos). Meireles (1991) salienta que a Formação Jandaíra pode ser encontrada na região da praia de Ponta Grossa, compondo parte de falésias ativas que sofrem influência da abrasão marinha.

Na área, uma feição que se destaca é a planície costeira de Icapuí, cuja gênese é relacionada a eventos transgressivos e regressivos do nível do mar durante o Quaternário. Esta dinâmica, em conjunto com variações climáticas e energias modeladoras do ambiente costeiro (ondas, ventos, marés, chuvas, gravidade e hidrodinâmica superficial e subterrânea), teria influenciado na produção, distribuição e deposição de sedimentos na área (MEIRELES; SANTOS, 2012).

Sob o ponto de vista geomorfológico, estes autores ainda listam as seguintes unidades presentes na área: praia, terraços marinhos, planície lagunar, tabuleiro pré-litorâneo e falésias ativas e inativas (Figura 6).

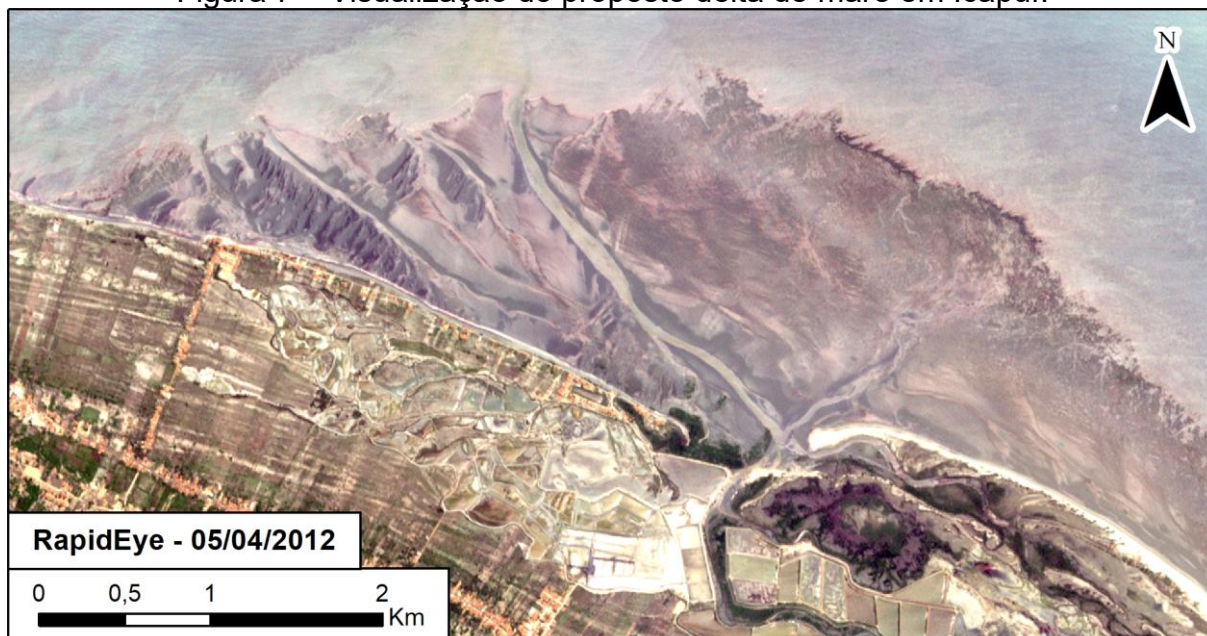
Figura 6 – Unidades geomorfológicas da planície costeira de Icapuí.



Fonte: extraído de Barros (2018); adaptado de *frames* retirados de imagens obtidas com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) e fornecidas pela Prefeitura Municipal de Icapuí.

Meireles, Raventos e Thiers (2006) apontam a existência de um delta de maré vazante defronte a desembocadura do estuário Barra Grande, no setor central do litoral de Icapuí (Figura 7). Este sistema constitui uma extensa planície de até dois quilômetros de distância da linha de costa, expondo bancos de areia e canais de maré durante a baixa-mar (Figura 8).

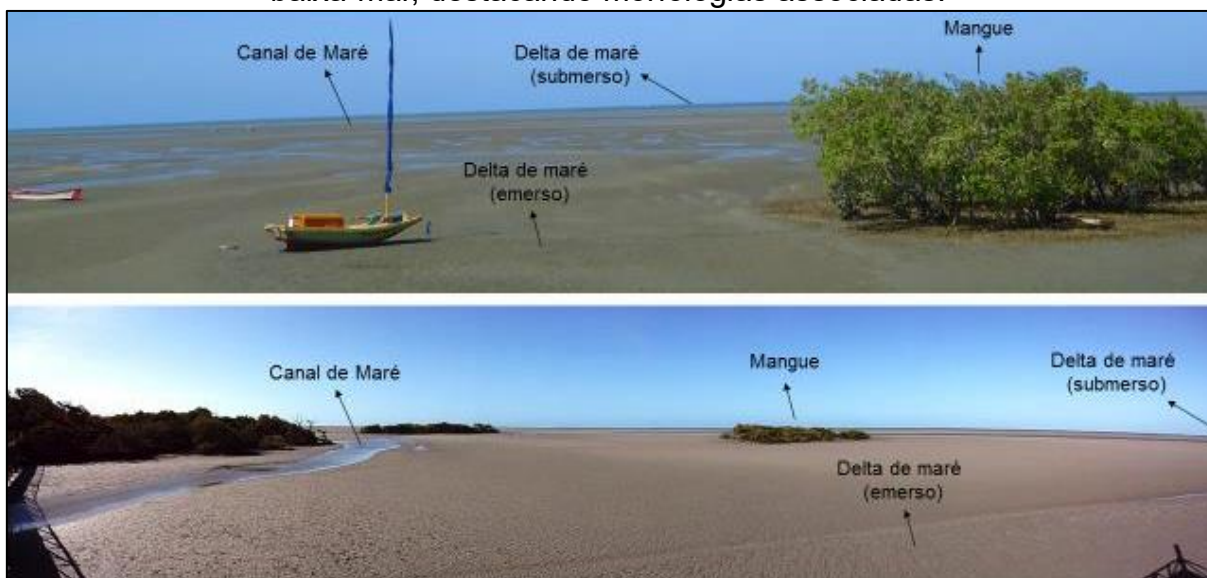
Figura 7 – Visualização do proposto delta de maré em Icapuí.



Fonte: elaborado pelo autor; imagem do satélite RapidEye de 05/04/2012.

Segundo Souza (2016), esta estrutura regula localmente a dinâmica das ondas e balanço de sedimentos entre a planície de maré, faixa de praia e plataforma continental.

Figura 8 – Mosaico de imagens panorâmicas do delta de maré de Icapuí durante a baixa-mar, destacando morfologias associadas.



Fonte: extraído de Souza (2016).

## 2.3 Aspectos Hidrodinâmicos

O vento é um dos principais agentes de transporte de material na área, atuando na formação e modificação da paisagem, e de fundamental importância para o controle das chuvas, provocadas pela variação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre a região Nordeste, além de influenciar na direção de ondas e correntes.

Meireles (2012) indica que as direções predominantes dos ventos incidentes no litoral cearense são provenientes de SE, ESE, E e NE. As médias de velocidade alcançam cerca de 4,5 m/s, e nos meses mais secos, entre julho e novembro, podem alcançar 11 m/s.

No Ceará, as marés são do tipo semi-diurna com características de ambientes de mesomaré, com amplitude média de aproximadamente 3,2 m (MORAIS, 1981; MAIA 1998; PINHEIRO *et al* 2016). Em Icapuí, as marés na área podem chegar aos 4 m na sizígia, com média de 3,7 m, conforme registrado nos meses de abril e novembro de 2016, nas marés de quadratura os valores atingem um máximo de variação de 1,9 m, com média de 1,61 m, registrado no mês de outubro de 2015 (BARROS, 2018).

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

### 3.1 Zona Costeira

As zonas costeiras apresentam grande importância para a sociedade pois, embora compreendam menos de 0,1% das massas continentais combinadas, concentram mais da metade da população mundial, muito devido aos inúmeros benefícios à população como acesso facilitado à navegação, pesca, turismo e atividades de lazer. Tratam-se de áreas dinâmicas, com uma grande diversidade de feições e processos, como falésias, praias, dunas, estuários lagunas e deltas (DAVIS JR; FITZGERALD, 2004; BIRD, 2011). Tais ambientes são muito dinâmicos e sensíveis às interferências e variações provocadas por inúmeros agentes naturais e antrópicos, alterando a geomorfologia costeira em diferentes escalas temporais, desde eventos episódicos – como tempestades – a processos cíclicos e tendências em longo prazo (TRENHAILE, 1997).

Segundo Bijlsma *et al.* (1996), na faixa costeira as populações estão crescendo o dobro da média global, o que torna os potenciais impactos da subida do nível do mar um foco importante nas avaliações de gestão costeira. Neste contexto, dois terços das maiores cidades do mundo, que contêm 60% da população mundial e têm maiores níveis de desenvolvimento econômico, estão localizados nas zonas costeiras (CHEN; CHEN, 2002). Em alguns países este percentual é ainda maior, potencializando os impactos na zona costeira, como na Austrália, onde cerca de 85% da população vive em uma distância de até 50 km da linha de costa (AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS, 2002). No Brasil, segundo IBGE (2015), cerca de 25% da população vive em municípios da zona costeira. No Nordeste, este valor alcança 37,8%, e no Ceará a concentração populacional chega a 50,8%.

Estudos relacionados ao mapeamento e monitoramento de zonas costeiras com base em dados de sensoriamento remoto multitemporais têm sido amplamente realizados em várias partes do mundo (GREEN *et al.*, 2000; GUO *et al.*, 2016). Em complemento, Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) têm tido sucesso em analisar mudanças na linha de costa, utilizando desde simples até complexas ferramentas de modelagem e análise. Para avaliação e monitoramento da erosão costeira, imagens de satélites são úteis na extração de linhas de costa, e SIG's têm sido usados exaustivamente para criar mapas temporais de sobreposição de linhas de costa para detectar e visualizar mudanças ao longo do tempo (CHOWDHURY; TRIPATHI, 2013).

No Brasil, o sensoriamento remoto, em conjunto com SIG's, têm sido sistematicamente utilizados em estudos relacionados ao ambiente costeiro, em especial na porção setentrional do litoral nordestino, vide os trabalhos de Souto *et al.* (2006), Souto (2009), Santos *et al.* (2011), Santos e Amaro (2013), Castro *et al.*, (2016) e Maia (2017). O uso dessas geotecnologias, associado à variedade de imagens de sensores orbitais disponíveis, tem sido essencial aos estudos de ambientes costeiros devido à sua capacidade de registrar as suas mudanças ao longo do tempo geológico mais recente, promovendo uma maior compreensão dos processos que envolvem a sua dinâmica. Assim, o sensoriamento remoto, juntamente com dados multifonte e ferramentas de SIG, têm subsidiado o desenvolvimento das ciências costeiras (COSTA *et al.*, 2017).



### 3.2 Linha de Costa

Devido às profundas consequências sociais e econômicas que a dinâmica costeira, em especial os seus efeitos erosivos, pode causar, estudos relacionados a ela têm tido muita atenção. Neste contexto, a linha de costa é uma das feições que variam mais rapidamente em áreas costeiras. A demarcação acurada e monitoramento da linha de costa ao longo de tempo curto e longo é necessário para entender processos costeiros (CHOWDHURY; TRIPATHI, 2013). Técnicas de sensoriamento remoto são usadas para investigar mudanças nas regiões costeiras devido às suas propriedades favoráveis, como baixo custo e alta eficiência. Além disso, a aquisição repetitiva de imagens de sensores remotos, gerando séries temporais, pode ser explorada para fornecer dados espaciais, compondo um banco de dados adequado para modelagem de cenários e prognósticos (LIU, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2014).

A definição mais simples de linha de costa refere-se ao ponto de encontro entre o continente e a água (DOLAN *et al.*, 1980). Esta posição varia continuamente no tempo, pois a dinâmica sedimentar ao longo da costa – influenciada por ondas, marés, ventos e outros fatores – reformata a morfologia costeira por meio de processos erosivos e deposicionais (BOAK; TURNER, 2005).

A escolha do referencial indicador de linha de costa pode variar dependendo das informações que se pretende extrair, da disponibilidade de dados, dos equipamentos utilizados, das escalas de trabalhos escolhidas e do processamento de imagens (BOAK; TURNER, 2005). Feições como a linha da vegetação costeira, a base ou crista de dunas frontais ou mesmo falésias já foram sugeridas como indicadores. Em geral, o indicador mais utilizado é o contraste entre areia seca e molhada, facilmente identificável em campo e em imagens aéreas e orbitais (Figura 9). Este referencial indica a máxima linha d'água que foi atingida em determinada posição na linha de costa (MORTON; SPEED, 1998; PAJAK; LEATHERMAN, 2002).

A determinação da posição da linha de costa e sua variação ao longo do tempo são importantes para atividades de pesquisa, engenharia e planejamento (NRC, 1990). Projetos de proteção da zona costeira, por exemplo, necessitam de informações a respeito do comportamento da linha de costa no passado, atualmente e sua tendência para o futuro. Neste contexto, são importantes os estudos sobre

variação do nível relativo do mar (LEATHERMAN, 2001), determinação de zonas de risco (FREITAS, 2008), além de morfodinâmica, erosão costeira e monitoramento ambiental (ARAUJO, 2008).

Figura 9 – Fotografias mostrando o limite entre porção seca e molhada.



Fonte: extraído de Souto (2009).

Ao longo de um período de 100 anos, a posição de uma linha de costa tem o potencial de variar centenas de metros ou mais (KOMAR, 1998). Portanto, a determinação dos padrões de modificação na largura e volume de praias, além da quantificação de taxas de variação da linha de costa, são importantes para formular políticas de gerenciamento costeiro (MOORE, 2000; ARAUJO, 2008).

### 3.3 Erosão Costeira

A morfogênese das regiões costeiras é regida por dinâmicas globais e locais. Os fatores de ordem planetária são caracterizados pela tectônica de placas e variações climáticas que afetam o nível relativo do mar. Já a dinâmica costeira é mais restrita às zonas litorâneas, sendo a principal responsável pelos processos erosivos e deposicionais que influenciam na constante transformação desses ambientes. Tais fatores são representados pelas ondas, correntes litorâneas e seus mecanismos de transporte sedimentar, pelo regime de marés e ventos, que atuam tanto na geração das ondas como na mobilização de sedimentos inconsolidados nos litorais (VILLWOCK *et al.*, 2005).

Amaro (1998) e Amaro e Araújo (2008) também citam como fatores que influenciam na morfologia da zona costeira aspectos como: as características da geologia das faixas litorâneas e da plataforma continental adjacente; a geometria

predominante das discontinuidades, incluindo a influência da geometria dos lineamentos topográficos e geológicos, dos planos de acamamento e ângulos de mergulhos das camadas das unidades sedimentares que alcançam a costa; e outros fatores como os níveis do lençol freático, os processos sedimentares recentes e os impactos de uso e ocupação da zona costeira. Além disso, os fatores hidrodinâmicos e meteorológicos influenciam constantes mudanças observadas nas zonas costeiras.

A erosão costeira é um problema global, principalmente quando se trata dos efeitos lesivos sobre as atividades antrópicas instaladas na zona costeira (SOUTO, 2009; BOORI; AMARO, 2010; BOORI; AMARO, 2011). Após a última transgressão pós-glacial, o aporte de sedimentos proveniente da plataforma continental ficou muito reduzido – tendo como referência a linha de costa durante o último máximo glacial – ao mesmo tempo em que os baixos cursos fluviais foram afogados e se transformaram em estuários, que tendem a reter os sedimentos arenosos (MUEHE, 2013). Neste contexto, Bird (1985) identificou a existência de um déficit generalizado de sedimentos globalmente, com, no mínimo, 70% das praias arenosas do mundo apresentando tendência erosiva já na época de seu estudo.

Mais recentemente, Muehe (2006) chegou a constatações semelhantes no litoral brasileiro, apontando que os segmentos de linha de costa sob efeito de erosão predominam em relação aos trechos em processo de progradação, com maior déficit sedimentar nas praias, seguidos por falésias e estuários. Muehe (2013) aponta que a construção de barragens e a tendência mais recente de aceleração da taxa de elevação do nível do mar, em paralelo ao aumento da ocupação da zona costeira, intensificam esse fenômeno.

Conforme relatado por IPCC (2018), o aumento do nível do mar tem sido considerado um dos principais fatores condicionantes da erosão costeira. Projeções baseadas em modelos de variação do nível relativo do mar sugerem um aumento entre 0,26 m e 0,77 m até 2100. Tais mudanças têm potencial para causar inúmeras modificações na linha de costa, conseqüentemente afetando a ocupação das zonas costeiras. Warrick (1993) já ponderava que, em longo prazo, uma tendência de elevação do nível do mar promoveria intensos efeitos de erosão costeira. Apesar dos processos de erosão costeira não estarem associados apenas à elevação do nível do mar, ela representa uma força que desencadeia um ajustamento morfodinâmico, cujo resultado é, na maioria das vezes, um recuo da linha de costa (MUEHE, 2013).

O aumento do nível do mar e os impactos ambientais negativos causados pelas atividades humanas agravam a problemática. Neste contexto, instituições de pesquisa, organizações de gestão da zona costeira e departamentos locais em áreas costeiras têm focado suas atenções na erosão costeira e prevenção de desastres (CAI *et al.*, 2009). Porém, a fim de apoiar os estudos voltados para o monitoramento dos processos de erosão costeira, é necessária uma estrutura que possibilite a quantificação e cálculo da taxa de erosão ou acréscimo durante determinado tempo. Outro aspecto a ser considerado é a dificuldade em monitorar e medir exaustivamente a dinâmica costeira através de apenas dados de pesquisa de campo, devido à grande extensão espacial da região costeira (GE *et al.*, 2013). Taxas de erosão não são utilizadas para estudar somente o balanço sedimentar ou processos naturais em linhas de costa, mas também são usadas para determinar o zoneamento ambiental com vistas ao ordenamento territorial e estudar a eficácia de estruturas protetoras da linha de costa, além de fornecer subsídios para a tomada de decisões de uso da terra, (CAMFIELD; MORANG, 1996).

Devido às profundas consequências sociais e econômicas que a erosão costeira pode causar, estudos relacionados a ela têm tido muita atenção. A linha de costa é uma das feições que variam mais rapidamente em áreas costeiras. A demarcação acurada e monitoramento da linha de costa ao longo de tempo curto e longo é necessário para entender processos costeiros (CHOWDHURY; TRIPATHI, 2013). Neste contexto, técnicas de sensoriamento remoto são usadas para investigar mudanças nas regiões costeiras devido às suas propriedades favoráveis, como baixo custo e alta eficiência. Além disso, a aquisição repetitiva de imagens de sensores remotos, gerando séries temporais, pode ser explorada para fornecer dados espaciais, compondo um banco de dados adequado para modelagem de cenários e prognósticos (LIU, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2014).

### **3.4 Deltas de Maré**

Hayes (1980) destaca que sedimentos de canais de maré podem constituir deltas de maré vazante (com bancos de areia no sentido do mar), deltas de maré enchente (com bancos de areia na direção do continente) e sucessões de preenchimento de canal criadas por sua migração e crescimento de esporões arenosos recurvados.

Segundo este mesmo autor, os componentes morfológicos de deltas de maré vazante incluem um canal principal flanqueado por barras lineares em ambos os lados – construídas pela interação entre as correntes de maré de enchente e vazante e as ondas – e um lobo terminal em sentido ao mar no seu fim. Este canal é bordejado por uma plataforma arenosa dominada por barras de espraiamento (*swash bars*). Canais de maré marginais dominados por correntes de maré enchente, denominados de canais marginais de enchente, ocorrem usualmente entre as plataformas de espraiamento e as praias a barlar e sotamar do canal de maré principal (Figura 10).

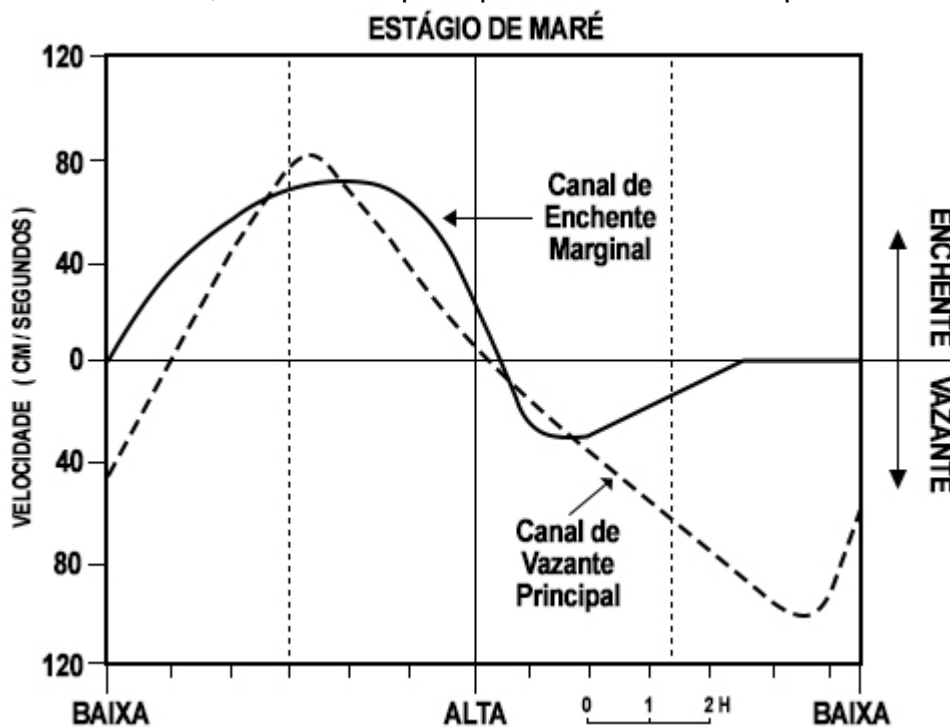
Figura 10 – Modelo morfológico de um delta de maré vazante.  
As setas indicam o sentido de fluxo dominante das marés.



Fonte: adaptado de Hayes (1980).

A morfologia geral do delta de maré vazante é função da interação entre correntes de marés e ondas. Neste contexto, é destacado o fenômeno denominado “assimetria tempo-velocidade” entre correntes de maré. Postma (1967) explica que esta variação ocorre devido ao fato de que as máximas velocidades de correntes de enchente e vazante não correm na meia-maré (Figura 11). As máximas de vazante ocorrem tarde no ciclo de maré, próximo à baixa-mar. Isto significa que na maré baixa, conforme ela alterna seu fluxo para enchente, fortes correntes ainda estão fluindo em sentido ao mar no canal de maré principal. Conforme o nível do mar aumenta, as correntes procuram caminhos de menor resistência na margem do delta de maré. Isto cria uma segregação entre correntes de enchente e vazante nos canais de maré.

Figura 11 – Curvas de tempo e velocidade de correntes de maré para um delta de maré vazante, ilustrando o princípio da assimetria tempo-velocidade.



Fonte: adaptado de Postma (1967).

### 3.5 Canais de Maré

Canais de maré ocorrem ao longo de grande parte das praias arenosas do mundo. Tratam-se de uma abertura na linha de costa através da qual água e sedimentos são transportados entre uma porção em mar aberto e outra no continente, geralmente um estuário ou laguna. (ELIAS; VAN DER SPEK, 2006).

As correntes de maré se tornam altamente distorcidas conforme se propagam em sistemas estuarinos rasos, interagindo com ondas e promovendo a evolução de canais de maré. Neste contexto, marés de enchente ou vazante têm papel central no transporte de sedimentos em tais ambientes (AUBREY; SPEER, 1985; BROWN; DAVIES, 2010)

Herrling e Winter (2018) salientam a capacidade de canais de maré em interromperem a deriva litorânea de sedimentos em larga escala, atuando de forma relevante no balanço sedimentar costeiro entre as praias a barlar e sotamar dos canais. Este fenômeno é chamado de *by-pass* sedimentar em canais de maré. Neste contexto, Fitzgerald *et al* (2015) destacam que as maiores variações da linha de costa ao longo de ambientes compostos por barras arenosas ocorrem na proximidade de canais de maré, sendo uma consequência direta dos processos associados a eles.

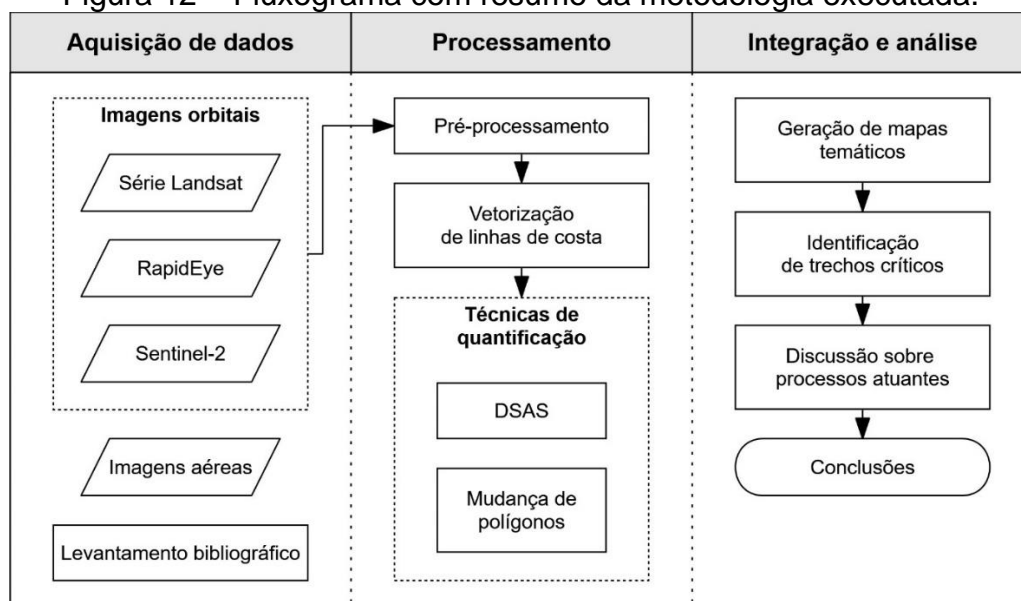
Bruun e Gerritsen (1959) classificam o *by-pass* natural de sedimentos em canais de maré em dois tipos: (1) *by-pass* de barras; e (2) *by-pass* de fluxo. O primeiro ocorre através de migração de barras arenosas induzida por ondas ao longo da porção periférica do lobo terminal de um delta de maré vazante e sua plataforma de *swash*. Já o *by-pass* de fluxo ocorre através de um canal de maré principal, onde fortes correntes de vazante capturam e transportam os sedimentos mar a dentro.

Aubrey e Speer (1984) destacam a importância de três mecanismos como os responsáveis pela migração de um canal de maré para barlar: (1) estabelecimento de um delta de maré vazante; (2) quebra de barreiras induzida por tempestades; e (3) descarga de maré vazante no entorno de um canal criando um padrão de fluxo tridimensional que erode o banco externo do canal e acresce o seu banco interno.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta visa a utilização de produtos multitemporais e multifontes de sensores remotos óticos na identificação dos processos relacionados à dinâmica costeira atuante no litoral do município de Icapuí (CE), sobretudo nas questões ligadas à erosão. O fluxograma da Figura 12 sintetiza as etapas desenvolvidas nesta pesquisa.

Figura 12 – Fluxograma com resumo da metodologia executada.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1 Aquisição de Dados

A fim de avaliar a tendência erosiva ou deposicional ao longo da linha de costa da área de estudo e quantificar em o balanço sedimentar em área foi feita uma análise temporal utilizando imagens orbitais da série Landsat com resolução espacial de 30 metros, compondo intervalos de cerca de cinco anos entre cada cena (Tabela 1).

A fim de avaliar visualmente os processos costeiros atuantes na área e identificar suas feições sedimentares características, também foram utilizadas imagens orbitais do satélite RapidEye, cuja resolução espacial de 5 metros proporciona este maior detalhamento. Fotografias aéreas da década de 1980 disponibilizadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) também subsidiaram esta interpretação.

Tabela 1 – Imagens orbitais utilizadas na caracterização da linha de costa.

Data	Satélite	Sensor
23/09/1988	Landsat 5	TM
04/08/1993	Landsat 5	TM
19/09/1998	Landsat 5	TM
01/09/2003	Landsat 5	TM
14/09/2008	Landsat 5	TM
12/09/2013	Landsat 8	OLI
10/09/2018	Landsat 8	OLI

#### 4.2 Processamento

Os dados oriundos de sensores orbitais passaram por etapas de pré-processamento para correção atmosférica e geométrica das imagens. Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), como o *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI), foram aplicadas a fim de ressaltar o contraste terra-água, facilitando a identificação da linha de costa e sua posterior vetorização, além de técnicas de realces no histograma das imagens, variando o contraste e realçando feições de interesse.

Técnicas de quantificação foram utilizadas para avaliar a mobilidade na linha de costa. Neste contexto, foram empregados o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) e o Método de Mudança do Polígono na avaliação e quantificação da

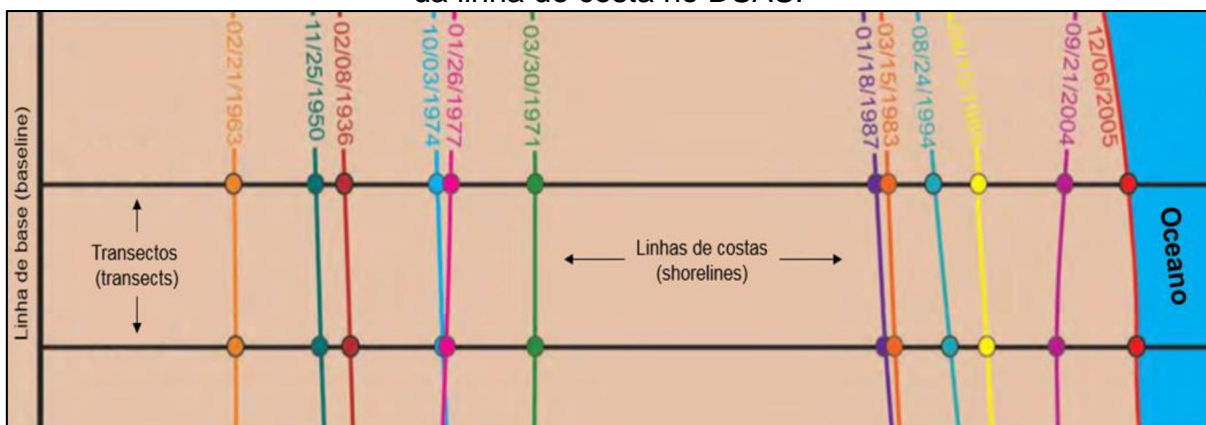


modificação da linha de costa.

O DSAS é uma extensão do *software* ArcGIS que quantifica e analisa a evolução do processo de erosão e deposição costeiras ao longo da linha de costa (Figura 13). O método consiste na geração de transectos ao longo da linha de costa, calculando estatisticamente as modificações temporais, expressas de acordo com diferentes critérios de análise (HIMMELSTOSS, 2009).

O método foi aplicado por Farias e Maia (2010) em vários segmentos do litoral do Ceará, identificando modificações na linha de costa e taxas de erosão e progradação associadas. A técnica já é amplamente difundida para estudos desta natureza, cabendo citar os trabalhos de Araujo (2008), Marino *et al.* (2013), Santos e Amaro (2013), além de Souza (2016) e Barros (2018). Estes dois últimos aplicaram o DSAS em setores da linha de costa de Icapuí.

Figura 13 – Representação dos dados necessários para calcular a variação temporal da linha de costa no DSAS.



Fonte: adaptado de Himmelstoss (2009)

Outra técnica para medir as variações da área da linha costeira emprega o Método de Mudança de Polígonos (SMITH; CROMLEY, 2012), que considera as áreas, em vez de valores pontuais, para calcular os percentuais de erosão ao longo da linha costeira em cada imagem. Este método usa duas linhas de costa de períodos diferentes para a avaliação e quantificação das áreas de erosão e deposição.

### **4.3 Integração e Análise**

Todos os dados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho foram consolidados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para fins de análise e geração de mapas temáticos. Estes produtos possibilitaram a identificação dos setores críticos em termos de erosão ou deposição ao longo da linha de costa de Icapuí.

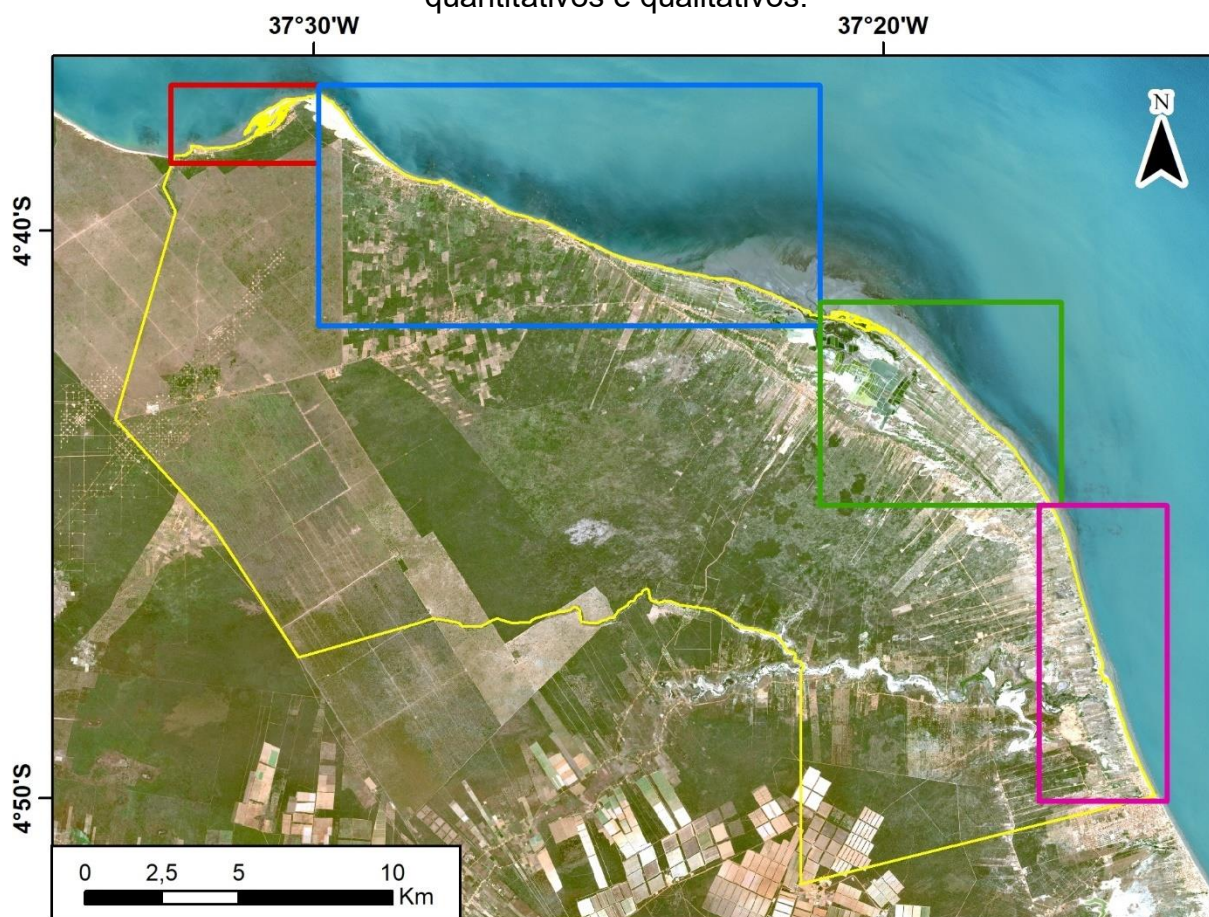
A geração de todos estes produtos possibilitou a discussão acerca dos processos que atuam ao longo da linha de costa de Icapuí, além dos fatores que influenciam uma maior dinâmica nos trechos críticos, em especial em relação aos canais de maré existentes na área.

## **5 CARACTERIZAÇÃO DOS *HOTSPOTS* EROSIVOS E DEPOSICIONAIS**

Para este trabalho foi considerada a setorização da área de estudo, a fim de promover uma melhor interpretação dos processos de erosão e deposição ao longo da costa de Icapuí. Deste modo, é possível entender de forma isolada cada setor e fazer correlações entre eles, com destaque para avaliar os eventuais efeitos que uma porção a barlamar pode exercer em uma outra a sotamar.

Neste contexto, a morfologia costeira foi utilizada como critério de segmentação da área de estudo em quatro setores, levando em consideração a orientação da linha de costa e a existência dos canais de maré na porção central do litoral de Icapuí (Figura 14).

Figura 14 – Localização dos quatro setores propostos para avaliação dos métodos quantitativos e qualitativos.



### SETORES PROPOSTOS

Setor Oeste
  Setor Central-Oeste
  Setor Central-Leste
  Setor Leste

Fonte: elaborado pelo autor.

## 5.1 Aplicação do DSAS

Diante de trabalhos recentes que também aplicaram o DSAS na área em estudo, é necessário destacar as diferenças desta pesquisa em relação às previamente citadas.

Embora tenha aplicado o método ao longo de toda a linha de costa de Icapuí, Souza (2016) utilizou uma série temporal irregular entre os anos de 1987 e 2014, com intervalos de até 14 anos entre imagens. Além disso, utilizou produtos oriundos de diversas fontes e resoluções espaciais, justificando sua escolha na necessidade de grande nível de detalhe para destacar a evolução de uma linha de costa. A ausência de um intervalo fixo entre as imagens analisadas pode influenciar em conclusões menos acuradas, pois a sazonalidade da influência dos processos

costeiros pode ser mascarada nos resultados, além de prejudicar eventuais prognósticos de posição da linha de costa. Outro aspecto metodológico da aplicação feita por este autor foi o estabelecimento de intervalos de 500 metros entre os transectos. Tal espaçamento pode gerar na perda de importantes dados contínuos da linha de costa em análise.

Já Barros (2018) aplicou o DSAS no trecho de linha de costa compreendido entre as praias de Barrinha e Barreiras de Baixo, limitando-se a avaliar a variação deste setor entre os anos de 2002 e 2016, também utilizando imagens orbitais multifonte de diferentes resoluções espaciais e com intervalos irregulares.

Neste contexto, a análise temporal da série de imagens Landsat proposta neste trabalho buscou evidenciar os setores da linha de costa com maiores taxas anuais de erosão e deposição em um espectro temporal maior – entre os anos de 1988 e 2018 – utilizando intervalos fixos de cinco anos, conforme a Tabela 1. A fim de promover uma melhor visualização destas porções, a aplicação do DSAS envolveu a geração de transectos com espaçamento de 10 metros – gerando um adensamento das informações da variação da linha de costa – cuja posterior simbologia em mapas temáticos facilitou a identificação dos setores mais críticos (Figura 15).

Neste trabalho, o foi adotado o método estatístico *End Point Rate* (EPR), cuja taxa de variação anual é calculada dividindo a distância entre as linhas de costa mais antiga e mais recente pelo tempo total decorrido entre esta movimentação em cada transecto. Trata-se de um método simples e que pode fornecer indícios à interpretação dos processos costeiros existentes na área.

Levando em conta a precisão gráfica da vetorização a partir de uma imagem da série Landsat, um erro mínimo de um *pixel* resultaria em uma escala apropriada para vetorização de até 1:150.000. Como o referencial de linha de costa adotado neste trabalho é uma feição de alta frequência, ela acaba sendo visível nas imagens. Porém, variações de maré em relação ao horário de imageamento, em particular em uma planície de maré tão extensa e heterogênea em determinadas porções, pode tornar esta identificação mais difícil, podendo acarretar em interpretações errôneas da linha de costa. Deste modo, neste trabalho adotou-se como referencial de equilíbrio da linha de costa uma variação anual entre -1 e +1 metro, minimizando estas problemáticas e promovendo um contraste visando identificar melhor os *hotspots* erosivos e deposicionais. Este intervalo de dois metros foi replicado para determinar as seguintes classes aos transectos: deposição severa

(maior que +3 m/ano); deposição (entre +3 e +1 m/ano); erosão (entre -1 e -3 m/ano); e erosão severa (menor que -3 m/ano).

Figura 15 – Espacialização dos transectos gerados ao longo da linha de costa e suas taxas anuais de variação, classificando-as em função do EPR.



### TAXAS DE VARIAÇÃO ANUAL (1988 - 2018)

#### EPR

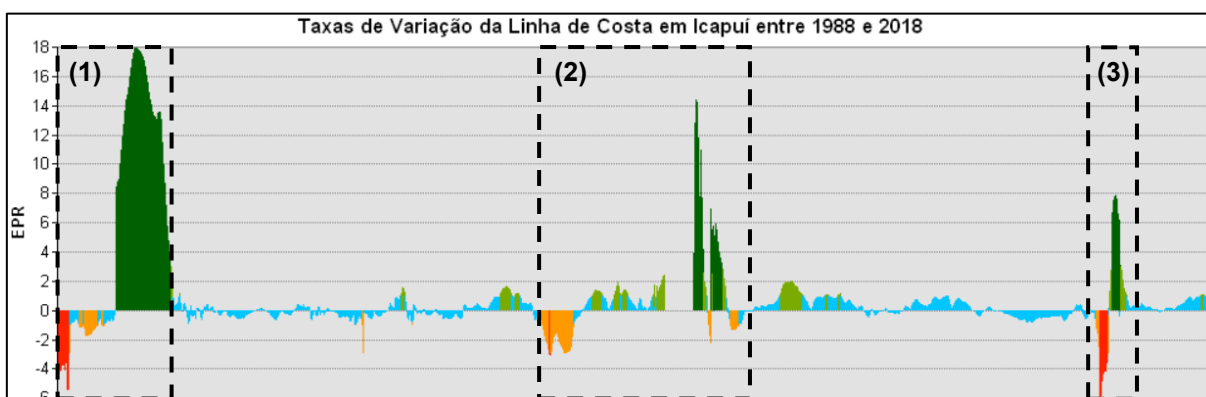
- > +3 m (Deposição Severa)
- +1 a +3 m (Deposição)
- +1 a -1 m (Equilíbrio)
- -1 a -3 m (Erosão)
- < -3 m (Erosão Severa)

Fonte: elaborado pelo autor.

Percebe-se que a maior parte da linha de costa está em equilíbrio, levando em consideração os critérios adotados para estabelecer esta qualificação, com algumas porções mais destacadas em termos de condições mais erosivas ou deposicionais. De modo geral, tais porções estão localizadas nas proximidades em que a linha de costa apresenta importantes variações morfológicas, a destacar três feições em particular, de leste para oeste: (1) a desembocadura do riacho Arrombado, no setor leste; (2) a extensa planície de maré seus canais que separam os setores centrais leste e oeste; e (3) o promontório de Ponta Grossa, que condiciona uma inflexão da linha de costa no setor oeste (Gráfico 1).

A fim de proporcionar um maior detalhamento, cada setor será discutido separadamente, de leste a oeste, seguindo o sentido da deriva litorânea na área.

Gráfico 1 – Visualização das taxas de variação da linha da costa, de oeste para leste, evidenciando as três porções mais dinâmicas da área.

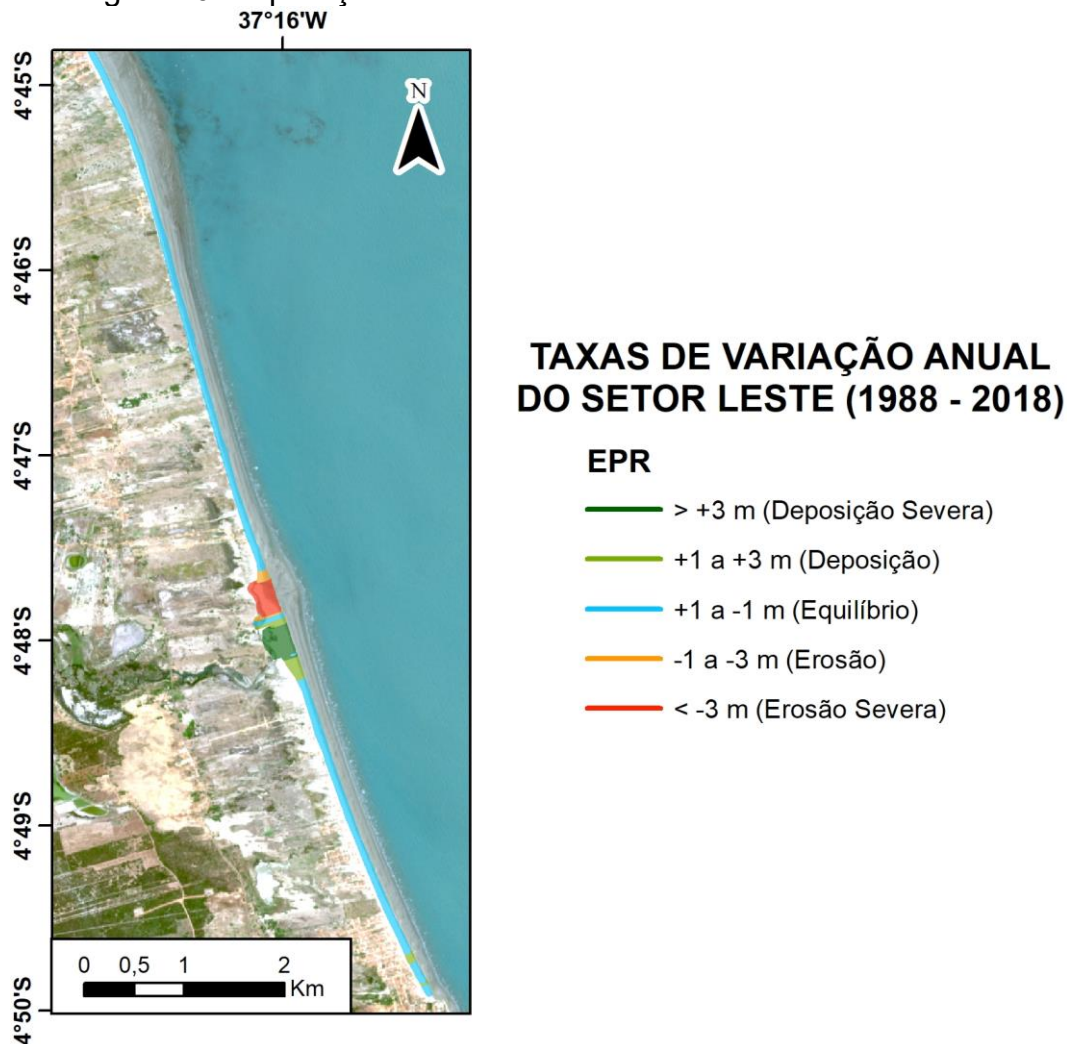


Fonte: elaborado pelo autor.

Iniciando pelo setor leste, ele apresenta uma relativa estabilidade em praticamente toda a área, excetuando a dinâmica condicionada pela desembocadura do Riacho Arrombado. Visivelmente, percebe-se no mapa temático a acreção lateral da barra adjacente a barlar da desembocadura e erosão da porção a sotamar ao longo do período de análise, migrando o canal da desembocadura conforme o sentido da deriva litorânea. Esta dinâmica parece não influenciar diretamente os processos erosivos mais proeminentes em Icapuí, sendo a relativa estabilidade da área relacionada ao baixo ângulo de incidência das ondas na linha de costa, além do menor desenvolvimento de planície de maré (Figura 16).

Souza (2016) reforça que a orientação da linha de costa neste setor e sua relação com a incidência das ondas promove a fixação de dunas frontais, o que manteria a relativa estabilidade desta porção.

Figura 16 – Aplicação do DSAS no setor leste da área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

O setor central-leste está localizado a barlamar da desembocadura estuarina da planície costeira de Icapuí. Conforme aumenta a proximidade com esta feição morfológica e seus canais de maré, ocorre um *hotspot* deposicional relacionado à acreção lateral de uma sequência de barras arenosas, limitadas a oeste pelo canal de maré principal (Figura 17).

Figura 17 – Aplicação do DSAS no setor central leste da área de estudo.



### TAXAS DE VARIAÇÃO ANUAL DO SETOR CENTRAL- LESTE (1988 - 2018)

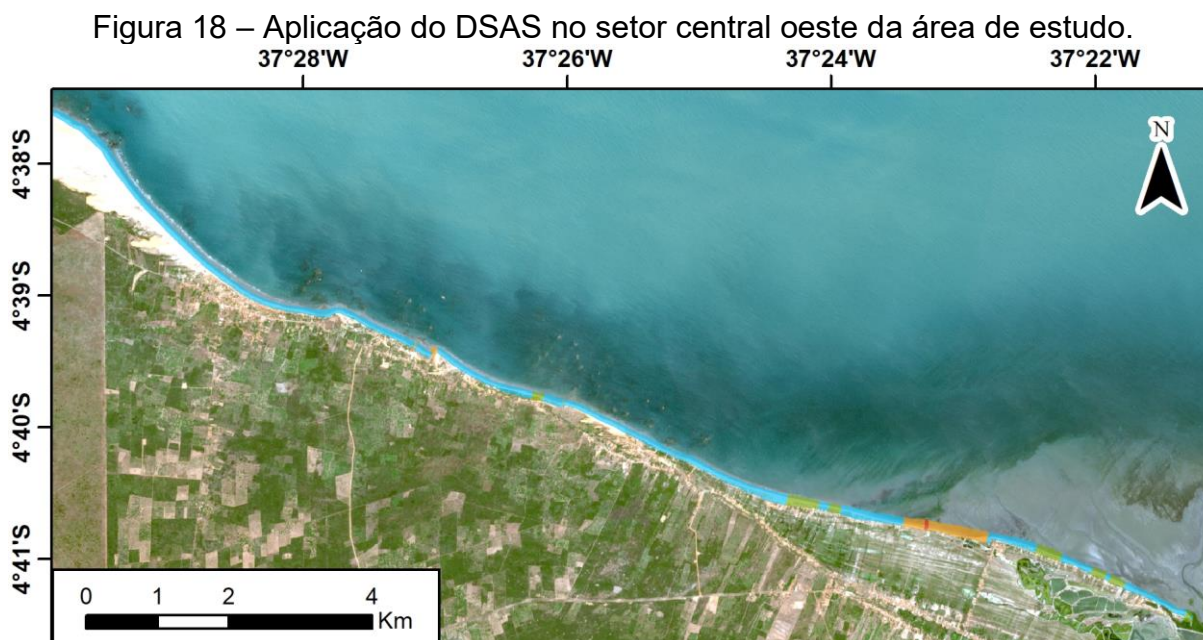
#### EPR

- > +3 m (Deposição Severa)
- +1 a +3 m (Deposição)
- +1 a -1 m (Equilíbrio)
- -1 a -3 m (Erosão)
- < -3 m (Erosão Severa)

Fonte: elaborado pelo autor.

O setor central-oeste está localizado a sotamar dos canais de maré da planície costeira. Em geral, trata-se de um setor em equilíbrio, com exceção de um *hotspot* erosivo situado nas praias de Barreiras de Cima e Barrinhas. Estes resultados reforçam as avaliações recentes de Souza (2016) e Barros (2018), que também aplicaram o método do DSAS caracterizaram fortes tendências erosivas nestas posições da linha de costa de Icapuí (Figura 18).





### TAXAS DE VARIAÇÃO ANUAL DO SETOR CENTRAL- OESTE (1988 - 2018)

#### EPR

- > +3 m (Deposição Severa)
- +1 a +3 m (Deposição)
- +1 a -1 m (Equilíbrio)
- -1 a -3 m (Erosão)
- < -3 m (Erosão Severa)

Fonte: elaborado pelo autor.

O último setor analisado é a porção oeste da linha de costa de Icapuí, limitada a oeste pelo promontório de Ponta Grossa. É nesta região que estão concentradas as maiores taxas de variação da linha de costa no município, especialmente com uma dinâmica deposicional adjacente às falésias da praia de Ponta Grossa. Barlamar a esta porção, está a praia de Retiro Grande, cujas taxas de variação da linha de costa indicaram tendências fortemente erosivas, possivelmente em função da severa deposição em Ponta Grossa, gerando um déficit de sedimentos a sotamar e, conseqüentemente, promovendo a erosão até o alcance de uma nova condição de equilíbrio do ambiente (Figura 19).

Figura 19 – Aplicação do DSAS no setor oeste da área de estudo.



### TAXAS DE VARIAÇÃO ANUAL DO SETOR OESTE (1988 - 2018)

#### EPR

- > +3 m (Deposição Severa)
- +1 a +3 m (Deposição)
- +1 a -1 m (Equilíbrio)
- -1 a -3 m (Erosão)
- < -3 m (Erosão Severa)

Fonte: elaborado pelo autor.

## 5.2 Aplicação do Método de Mudança do Polígono

Ao quantificar em área o balanço sedimentar de cada um dos setores é possível avaliar a possível influência entre eles. Em uma visão geral, percebe-se que os mesmos *hotspots* erosivos e deposicionais previamente caracterizados com o DSAS também foram identificados visualmente com esta aplicação (Figura 20). Como forma de análise, novamente cada setor foi analisado individualmente, apresentando gráficos de balanço sedimentar em área para os intervalos de anos em conjunto com uma linha de tendência polinomial de segunda ordem. Posteriormente, seguirá discussão integrando e interpretando todos as áreas e processos identificados.

Figura 20 – Espacialização dos polígonos de mudança gerados a partir da variação da linha de costa durante o período analisado.

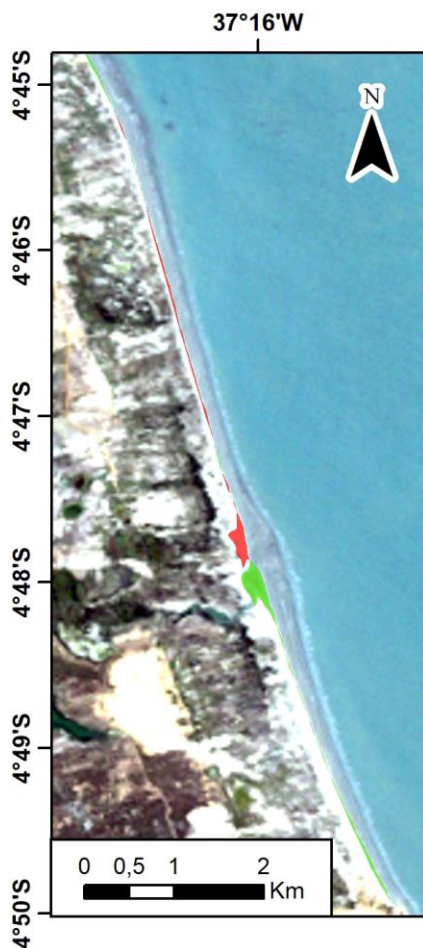


### BALANÇO SEDIMENTAR EM ÁREA (1988 - 2018)

■ Erosão    ■ Acreção  
Fonte: elaborado pelo autor.

O setor leste apresenta uma certa sazonalidade na variação nos últimos anos, com intercalação periódica entre perdas e incrementos em área na costa (Tabelas 2 e 3). De modo geral, o balanço sedimentar em área é levemente positivo, em função da dinâmica de acreção e erosão lateral condicionada pela migração lateral da desembocadura do Riacho Arrombado de sudeste para noroeste, coincidindo com o sentido da deriva litorânea (Figura 21).

Figura 21 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor leste da área de estudo.



### BALANÇO SEDIMENTAR EM ÁREA DO SETOR LESTE (1988 - 2018)

Erosão Acreção

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Balanço sedimentar do setor leste em intervalos de anos.

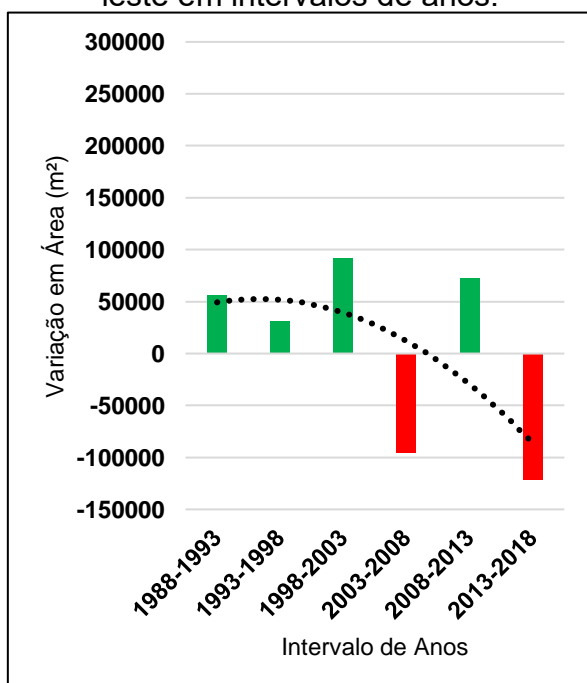
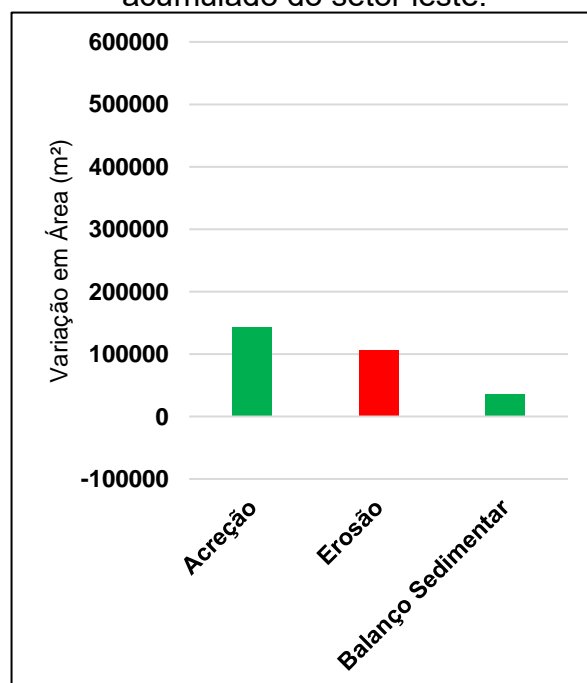
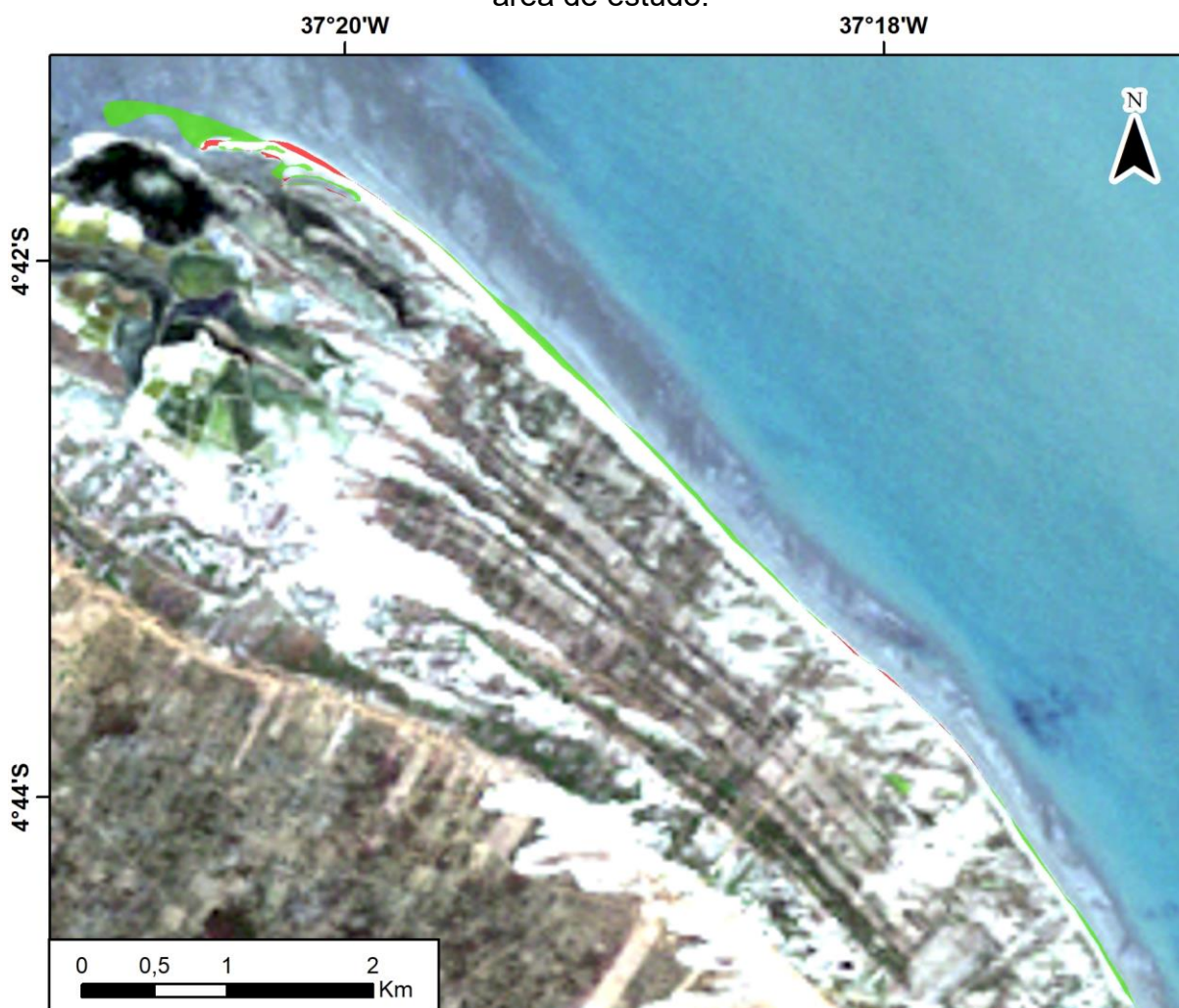


Gráfico 3 – Balanço sedimentar acumulado do setor leste.



O setor central-leste também apresenta uma certa sazonalidade na predominância de processos erosivos e deposicionais (Tabelas 4 e 5). Porém, o balanço sedimentar que prevalece é fortemente positivo, influenciado pela grande acreção lateral de barras arenosas a barlar das barras de maré da planície costeira (Figura 22).

Figura 22 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor central leste da área de estudo.



### BALANÇO SEDIMENTAR EM ÁREA DO SETOR CENTRAL LESTE (1988 - 2018)

■ Erosão    ■ Acreção

Fonte: elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Balanço sedimentar do setor central leste em intervalos de anos.

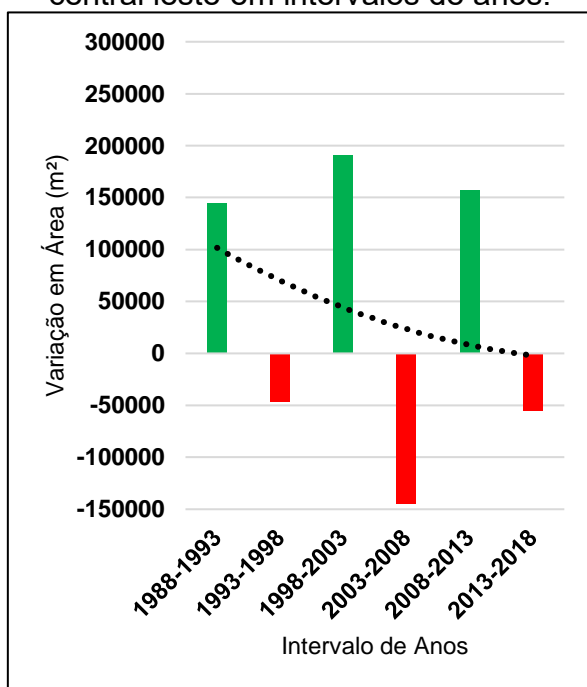
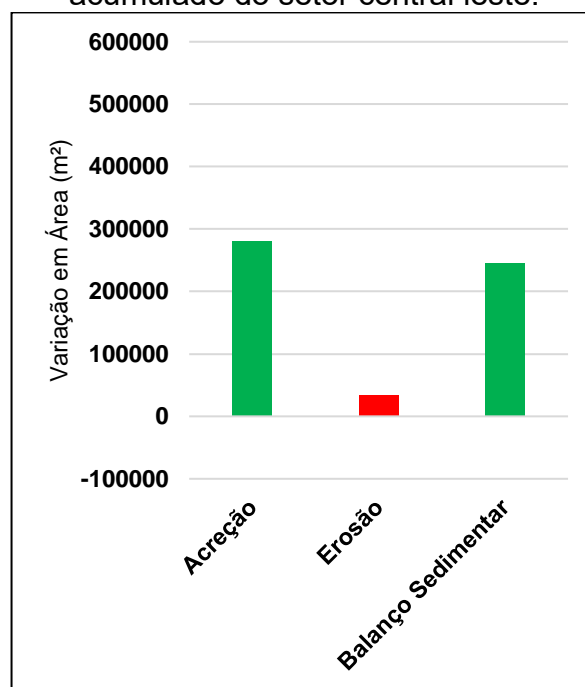


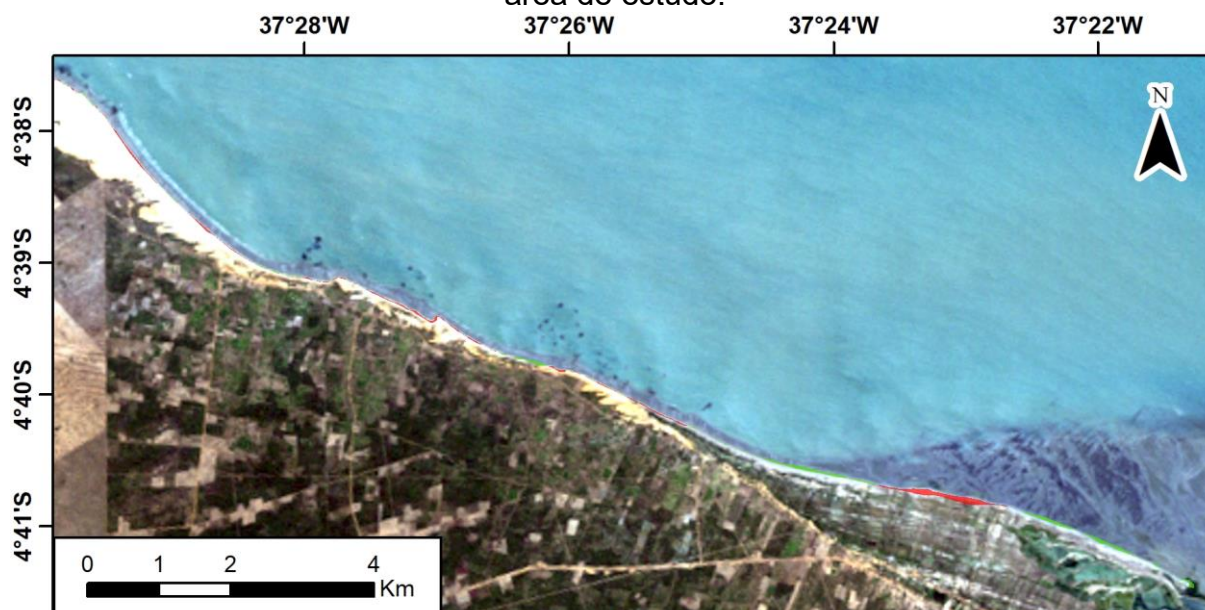
Gráfico 5 – Balanço sedimentar acumulado do setor central leste.



A sotamar dos canais de maré está o setor central oeste, cujos resultados também foram bem similares aos da aplicação do DSAS, reforçando o caráter de erosão costeira mais expressiva nas praias mais próximas a este trecho, com destaque para Barrinhas de Cima e Barreiras, como previamente citado (Figura 23).

Em geral, a dinâmica é predominantemente erosiva neste setor, com exceção de um dos períodos quantificados. Como este método trabalha com números absolutos, eventuais porções que apresentaram dificuldades na interpretação da linha de costa – como variação de maré em uma praia de baixo gradiente batimétrico, ou ainda baixo contraste entre as porções seca e úmida no ambiente praiar – podem gerar discrepâncias como essas nos resultados, podendo ser uma explicação deste comportamento anômalo no período entre 1998 e 2003 (Tabelas 6 e 7).

Figura 23 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor central oeste da área de estudo.



### BALANÇO SEDIMENTAR EM ÁREA DO SETOR CENTRAL OESTE (1988 - 2018)



Gráfico 6 – Balanço sedimentar do setor central oeste em intervalos de anos.

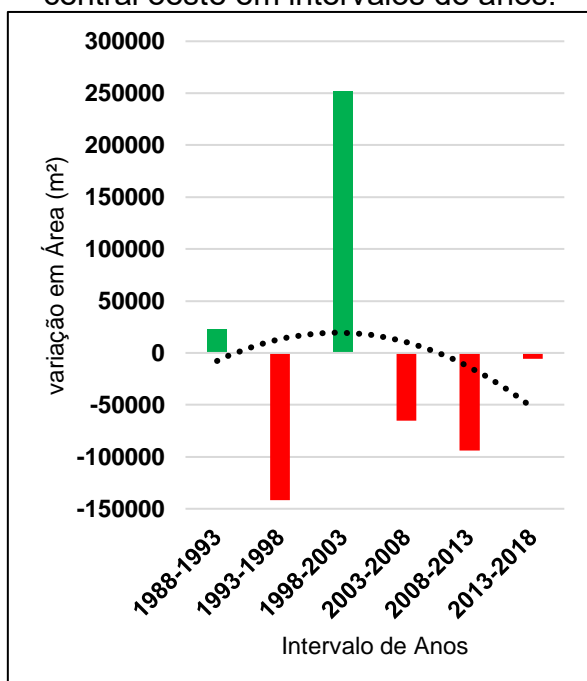
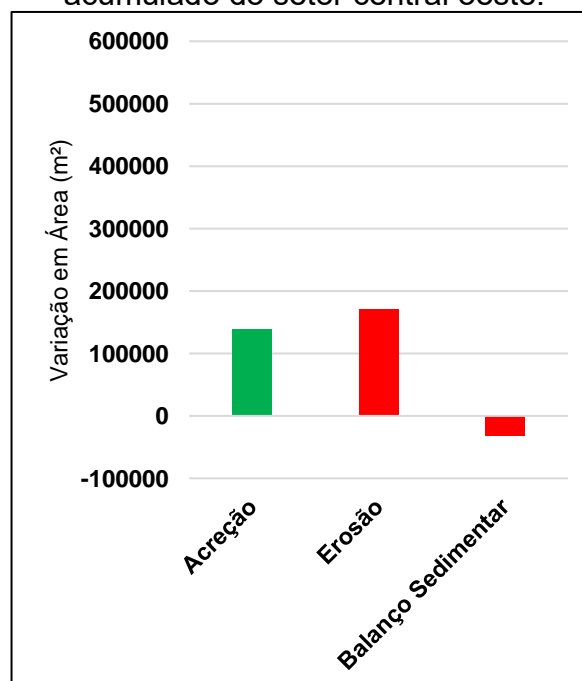
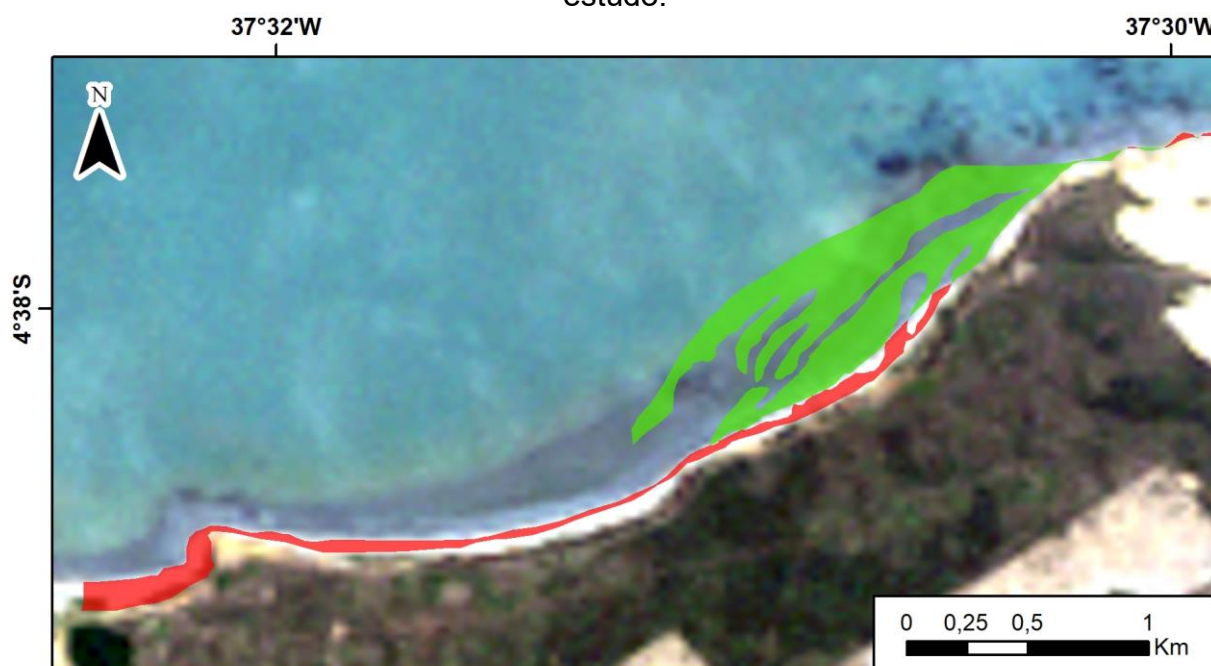


Gráfico 7 – Balanço sedimentar acumulado do setor central oeste.



Por fim, o setor oeste é o que apresenta as maiores variações em erosão e deposição, sendo que os processos acrecionários se concentram na forma de crescimentos de barras arenosas anexadas ao promontório de Ponta Grossa e, a sotamar, predomina o processo erosivo da linha de costa, possivelmente condicionado pela intensa captura de sedimentos a barlar, afetando a praia de Retiro Grande (Figura 24). De modo geral, o balanço sedimentar é fortemente positivo, e apresenta tendência de continuidade até o futuro alcance de um novo estado de equilíbrio deste setor. (Tabelas 8 e 9).

Figura 24 – Aplicação do Método de Mudança do Polígono no setor oeste da área de estudo.



### BALANÇO SEDIMENTAR EM ÁREA DO SETOR OESTE (1988 - 2018)

■ Erosão    ■ Acreção  
Fonte: elaborado pelo autor.



Gráfico 8 – Balanço sedimentar do setor oeste em intervalos de anos.

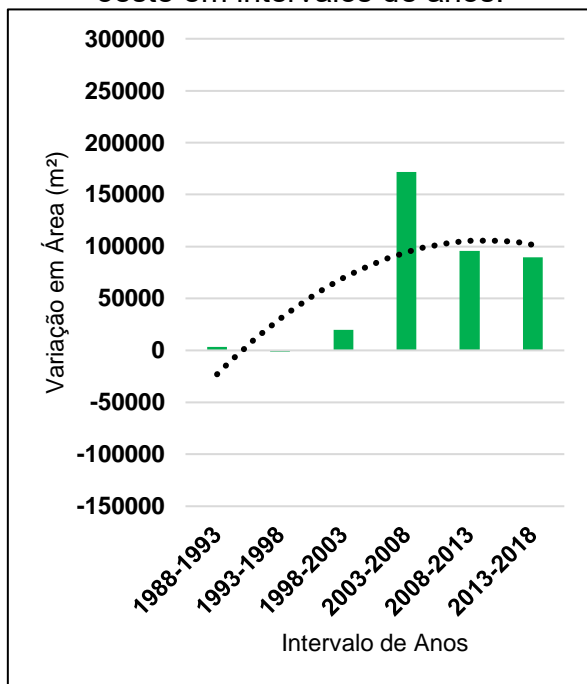
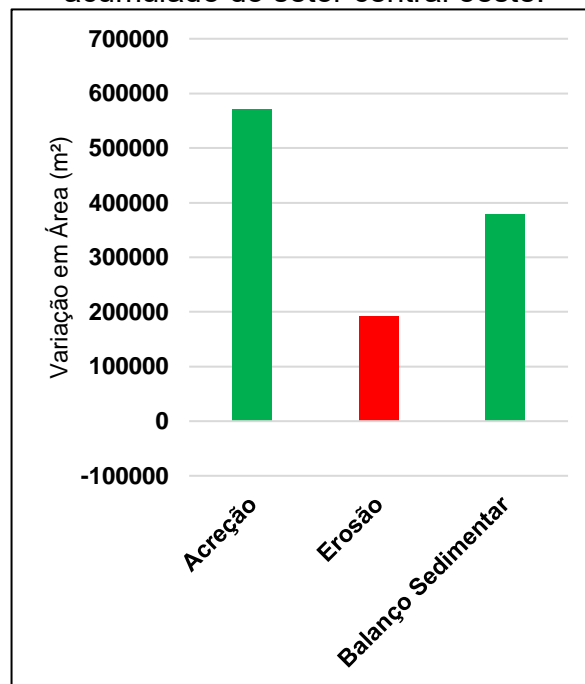


Gráfico 9 – Balanço sedimentar acumulado do setor central oeste.



## 6 INFLUÊNCIA DOS CANAIS DE MARÉ NA DINÂMICA COSTEIRA LOCAL

Excluindo o setor leste da área em estudo devido à sua dinâmica costeira de maior equilíbrio, esta discussão se concentra na influência dos canais de maré associados a uma extensa planície de maré na dinâmica costeira do município de Icapuí, influenciando diretamente três processos específicos, que aqui serão discutidos: (1) acreção lateral de barra arenosa a barlar dos canais de maré; (2) erosão concentrada a sotamar dos canais de maré; e (3) deposição acentuada na praia de Ponta Grossa, previamente identificados pela aplicação do DSAS e do Método de Mudança do Polígono.

A análise quantitativa e qualitativa dos setores da linha de costa avaliados sugere que os canais de maré na porção central do litoral de Icapuí têm competência hidráulica suficiente para promover o barramento de sedimentos provenientes da deriva litorânea. Além deste barramento, também é evidente uma transferência de sedimentos para sotamar por meio de *by-pass* dos canais de maré. Esta característica fica evidente em imagens de satélite recentes e mais antigas. A Figura 25 exibe o comportamento dos sedimentos em suspensão no litoral de Icapuí em imagem de satélite de 18/05/1988, proveniente do satélite Landsat 5. Percebe-se que a sotamar dos canais de maré forma-se uma pluma que parte dos canais de maré em sentido a

sotamar, dispersando os sedimentos em posição distante até 5 km da linha de costa. Isto sugere que, ao mesmo desde esta época, os canais de maré apresentariam esta capacidade de retenção e transporte de sedimentos.

Figura 25 – Visualização dos sedimentos em suspensão dispersos a partir da ação dos canais de maré, capturando-os na planície de maré e transportando-os a barlamar, em posição mais afastada da linha de costa.



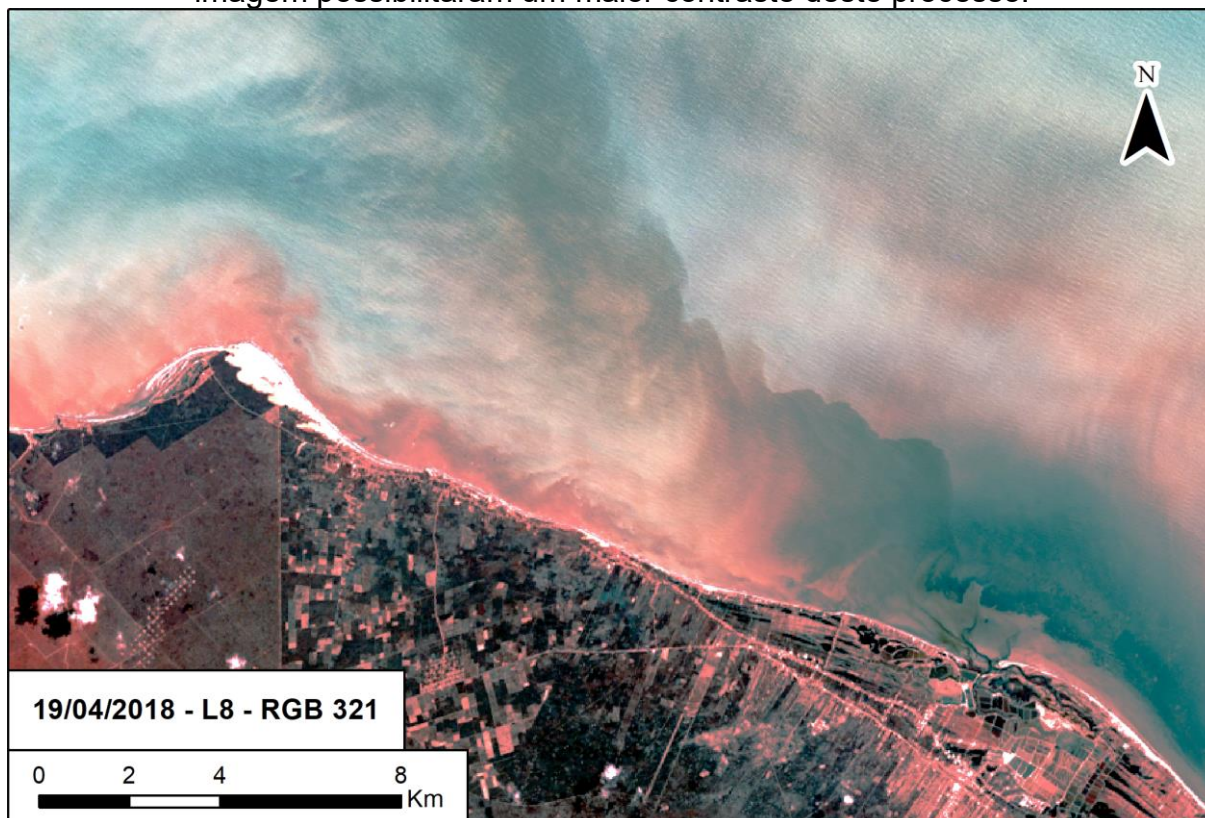
Fonte: elaborado pelo autor.

Imagem mais recente de 19/04/2018 do satélite Landsat 8 também revela esta mesma característica, desta vez mais realçada, com a formação da pluma de dispersão de sedimentos a partir de um ponto de maior concentração na planície de maré e seus canais, sendo os sedimentos transportados para mais mar adentro (Figura 26). Esta mesma imagem tem uma feição sugestiva do barramento das linhas de fluxo de correntes de ondas e deriva litorânea promovido pela inflexão de costa do promontório de Ponta Grossa, gerando um típico vórtice turbilhonar em direção à linha de costa a sotamar do promontório, que promoveria a deposição.

Neste contexto, propõe-se uma dinâmica local onde os transportados por *by-pass* dos canais de maré se tornam novamente disponíveis apenas muito a sotamar, influenciando assim na intensa sedimentação da área e justificando a erosão concentrada nas praias de Barreiras de Cima e Barrinhas, pois os sedimentos se

distanciaram destas posições da linha de costa.

Figura 26 – Visualização da capacidade de captura e redistribuição dos sedimentos em deriva litorânea por parte dos canais de maré. Realces no histograma da imagem possibilitaram um maior contraste deste processo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Esta condição dos canais de maré parece influenciar os processos de erosão e deposição concentrada previamente citados. Porém, no caso da erosão a barlamar dos canais de maré, outras estruturas identificadas por imagens de satélite parecem também contribuir para intensificação deste fenômeno.

A Figura 27 exibe uma imagem de 05/04/2012 do satélite RapidEye. Sua resolução espacial de 5 metros proporciona um maior detalhamento das feições costeiras, principalmente durante a maré baixa. Neste contexto, percebe-se entre os canais de maré uma série de formas de leito do tipo macroondulações, de crista mais ou menos reta e perpendiculares aos canais, com sentido de fluxo prevalecente segundo o sentido de fluxo de maré vazante, e em concordância também com o sentido da deriva litorânea. As macroondulações identificadas seriam, portanto, ondas de areia (i.e. COLLINSON; THOMPSON, 1982), sendo as mais proeminentes localizadas defronte às praias onde a erosão costeira é mais acentuada.

Neste contexto, as macroondulações seriam geradas em condições de fluxo prevalecente de maré vazante, com as calhas entre suas cristas sendo aproveitadas na enchente de modo a confinar o fluxo em sentido a SW, dos canais de maré rumo à linha de costa, no flanco esquerdo do delta de maré. O aumento do fator de confinamento acarreta no incremento de velocidade destas correntes, acentuando seu efeito erosivo quando atingem a linha de costa.

Deste modo, em condições de enchente, apesar das correntes dos canais de maré principais ainda estarem atingindo suas máximas velocidades de vazante, conforme indicado por Postma (1967), as correntes de maré enchente vão procurar as porções com menor resistência ao seu fluxo, que são as calhas entre as cristas das macroondulações perpendiculares à linha de costa.

Figura 27 – Visualização das macroondulações existentes entre os canais de maré da região estudada. O fluxo canalizado entre elas está defronte as praias de Barreiras de Cima e Barrinhas, dois *hotspots* erosivos.

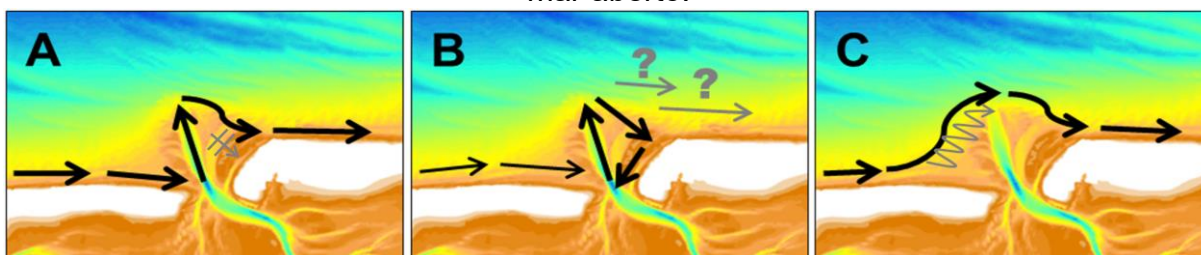


Fonte: elaborado pelo autor.

De modo a avaliar a influência de canais de maré na dinâmica costeira, Herrling e Winter (2018) refinaram a classificação de mecanismos de *by-pass* em canais de maré proposta previamente por Bruun e Gerritsen (1959), indicando três situações em que o *by-pass* sedimentar poderia ocorrer em mar aberto sob influência de canais de maré: (A) *by-pass* de fluxo através de correntes de maré vazante dominantes na desembocadura associado a migração lateral de barra e fixação em sentido da deriva litorânea; (B) recirculação semicircular de sedimentos e reversão do

sentido de transporte de volta ao canal de maré; e (C) *by-pass* em zigue-zague através de pequenos canais e bancos de areia e/ou por migração transversal de barra através de uma trajetória arqueada na periferia de um delta de maré vazante (Figura 28).

Figura 28 – Modelos de *by-pass* sedimentar condicionados por canais de maré em mar aberto.



Fonte: extraído de Herrling e Winter (2018).

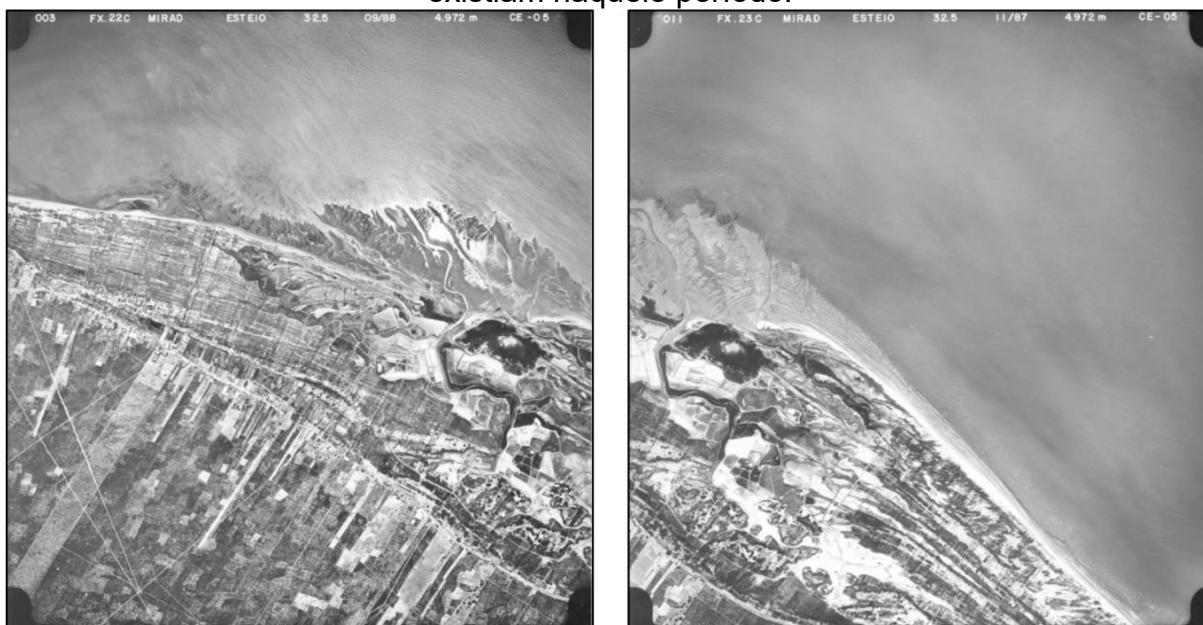
Em Icapuí, as três situações parecem ocorrer, não necessariamente de modo simultâneo. O *by-pass* periférico é bastante sugestivo em imagens de satélite, com deslocamento da deriva litorânea em função do arqueamento da planície de maré em sentido ao oceano devido ao baixo gradiente batimétrico desta porção.

A recirculação de sedimentos parece ocorrer em uma associação entre as correntes de maré vazante e ondas, extravasando sedimento das calhas dos canais para os bancos de areia adjacente. Esta interferência criaria um novo fluxo prevacente em sentido ao oceano, remobilizando os sedimentos dos bancos de areia e criando as macroondulações existentes.

Já o *by-pass* de fluxo ocorreria nos canais de maré de maior expressão e que apresentam maior competência para agir como um molhe hidráulico, barrando a deriva litorânea, capturando seus sedimentos e redistribuindo. Porém, como a extensão destes canais de maré chega a ser quilométrica, os sedimentos são dispersos muito distantes da linha de costa, intensificando o déficit sedimentar nas praias a sotamar. Outra possível consequência disso poderia existir à barlamar da saída do canal principal: como não ocorre retenção significativa de sedimentos nas proximidades da linha de costa, o esporão não engorda significativamente em tempo histórico.

Esta configuração de macroondulações transversais aos canais de maré influenciando nas correntes de maré parece não ser tão recente. Imagens aéreas da década de 1980 (Figura 28) indicam que esta característica já existia naquela época.

Figura 29 – Imagens aéreas da década de 1980 indicam que as macroondulações já existiam naquele período.



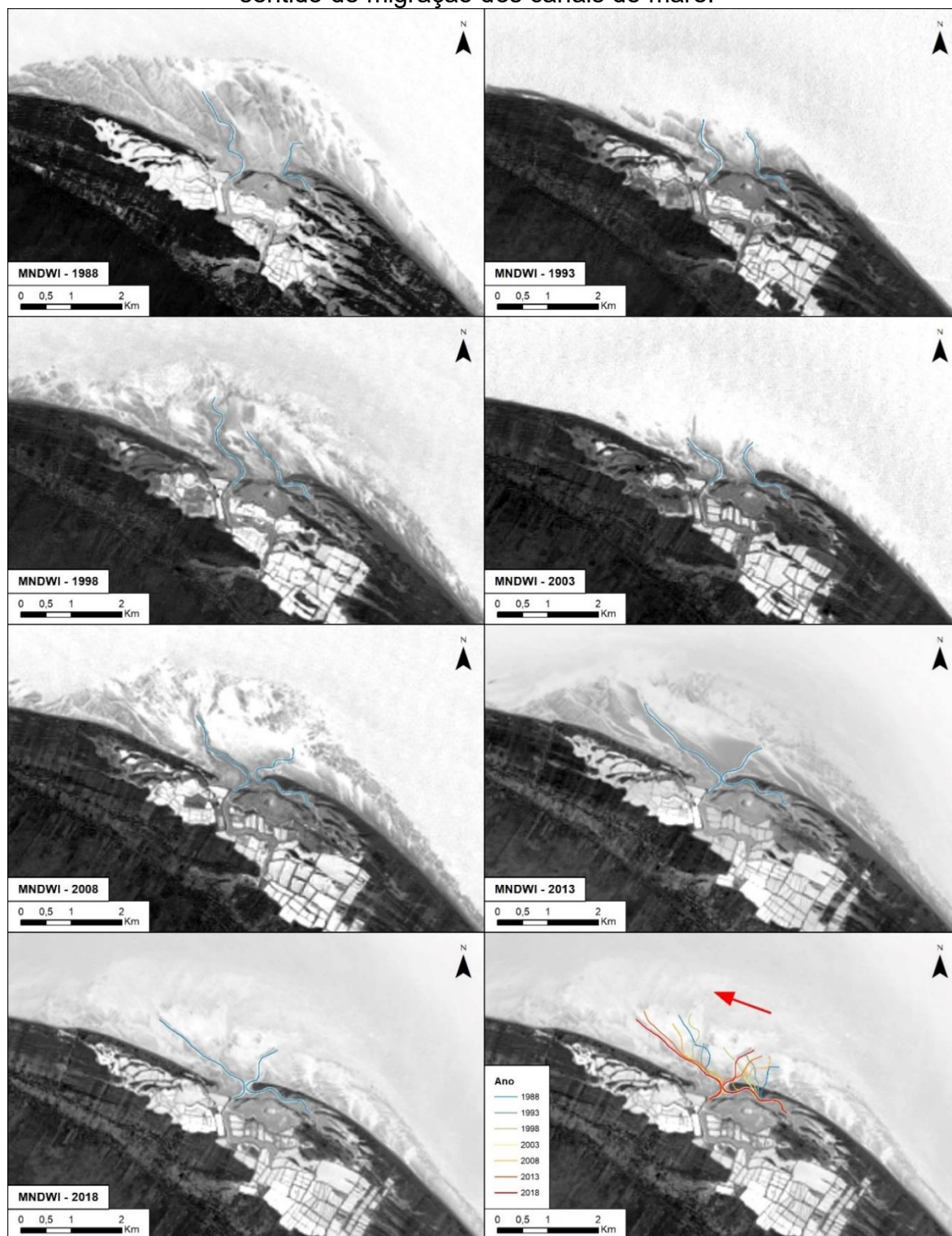
Fonte: imagens cedidas pela CPRM.

Porém, conforme relatado por Barros (2018), os processos erosivos concentrados nas praias de Barreiras de Cima e Barrinha se tornaram mais frequentes e acentuados entre os anos de 2011 e 2014. Então, além desta condição morfológica e dos picos de maré também relatados por Barros (2018) e que estariam relacionados a esta erosão acentuada, que outros processos poderiam ter contribuído para este fenômeno?

A resposta parece estar novamente nos canais de maré. Durante o período de análise deste trabalho, também foram avaliadas imagens orbitais que passaram pelo processamento MNDWI, que acentuou as diferenças entre porções úmidas e secas e facilitou a identificação da posição dos canais.

A série histórica montada (Figura 29) permitiu avaliar que a posição dos canais de maré variou ao longo do tempo, sendo influenciada diretamente pelo crescimento lateral da barra arenosa e pela deriva litorânea. A posição inicial dos canais de maré, a partir de 1988, rotacionou em sentido a sotamar, com a desembocadura do canal principal se mantendo fixa. Em destaque, estão os dois canais de maré principais que, ao longo dos anos, foram migrando, com o canal a leste também migrando para sotamar mediante crescimento da barra arenosa.

Figura 30 – Série temporal de imagens orbitais exibindo o comportamento dos canais de maré durante o período de análise. A seta em vermelho destaca o sentido de migração dos canais de maré.



Fonte: elaborado pelo autor.

Na imagem de 2008, os canais já se encontravam bastante próximos, e na imagem de 2013 eles acabaram coalescendo. Este fenômeno é correlacionável temporalmente ao aumento drástico da erosão costeira localizada a sotamar dos

canais de maré. Neste contexto, parece que a união dos canais intensificou o processo de barramento hidráulico pré-existente, promovendo uma captura mais acentuada de sedimentos que, pelos mecanismos de *by-pass* já apresentados, foram transportados para longe das praias a oeste dos canais de maré, o que poderia explicar esta erosão concentrada desde então, levando em consideração apenas este agente natural. No entanto, não se pode desconsiderar a pressão ambiental exercida por influência antrópica como a ocupação desordenada das proximidades da linha de costa e da planície estuarina e a implantação de estruturas de contenção.

Um fato curioso é que o canal de maré leste que coalesceu com o oeste, mesmo migrando lateralmente, sempre inicia seu sentido de fluxo contrário à deriva litorânea, posteriormente rotacionando em sentido concordante a ela.

Aubrey e Speer (1984) destacam a importância de três mecanismos como os responsáveis pela migração de um canal de maré para barlar: (1) estabelecimento de um delta de maré vazante; (2) quebra de barreiras induzida por tempestades; e (3) descarga de maré vazante no entorno de um canal criando um padrão de fluxo tridimensional que erode o banco externo do canal e acresce o seu banco interno. O primeiro aspecto é notável na região de Icapuí, com a ressalva de que a estruturação dos canais de maré e bancos de areia presentes não parece se assemelhar a um delta de maré vazante, mas sim a uma planície de maré que ganhou amplitude em sentido ao mar devido à redução do espaço de acomodação. Ainda neste contexto, o terceiro mecanismo proposto parece atuar em conjunto com a corrente de deriva litorânea, influenciando diretamente na rotação em sentido anti-horário dos canais de maré.

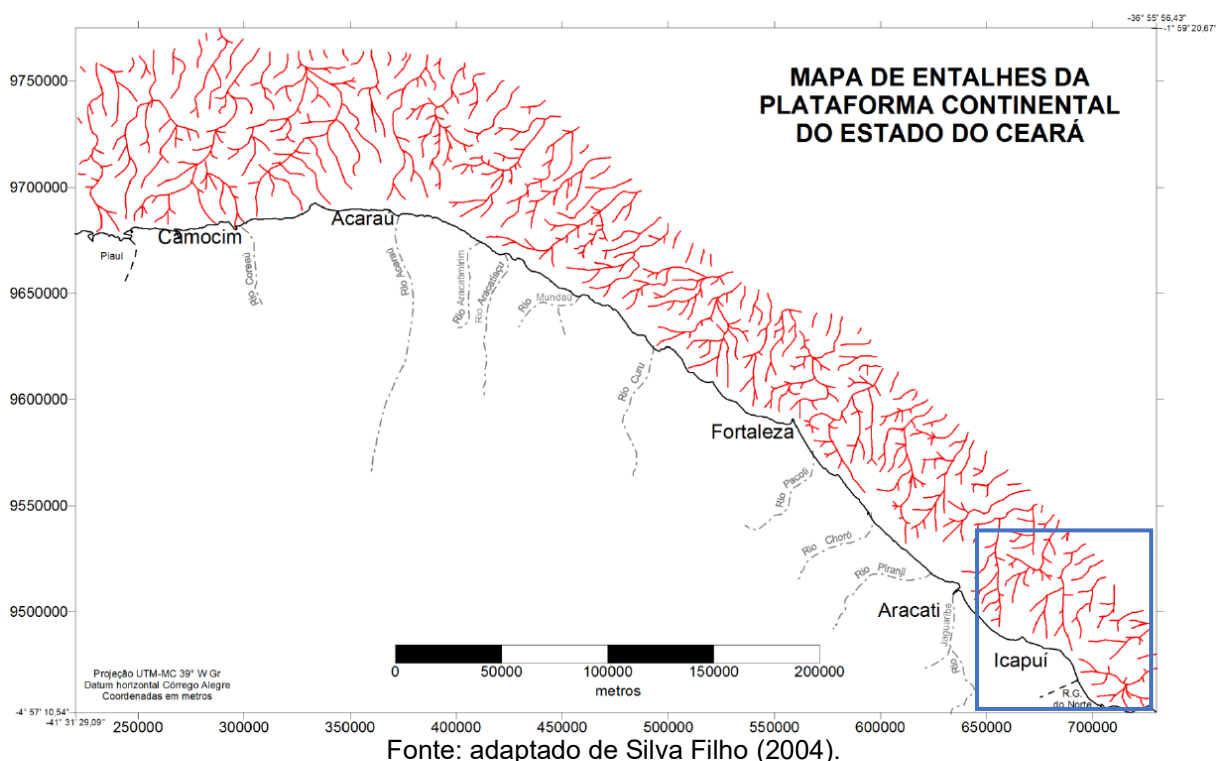
Silva Filho (2004) indica que a região de Icapuí apresenta anomalias de relevo e gravimétricas. Em particular, a planície costeira da área em estudo está relacionada a uma protuberância associada a uma anomalia de relevo positiva, com um eixo de soerguimento de direção NE-SW associado a um conjunto de lineamentos NW-SE e NE-SW (Figura 30).

Este eixo de soerguimento defronte à posição atual da planície costeira de Icapuí parece ter influenciado na criação de uma anomalia batimétrica que condicionou a formação da planície de maré associada aos canais que fazem a comunicação entre as porções marinhas e estuarinas deste sistema. Deste modo, o arcabouço estrutural teve influência tanto em criar esta estrutura de captura de sedimentos – devido à diminuição da energia das correntes de fluxo – como também



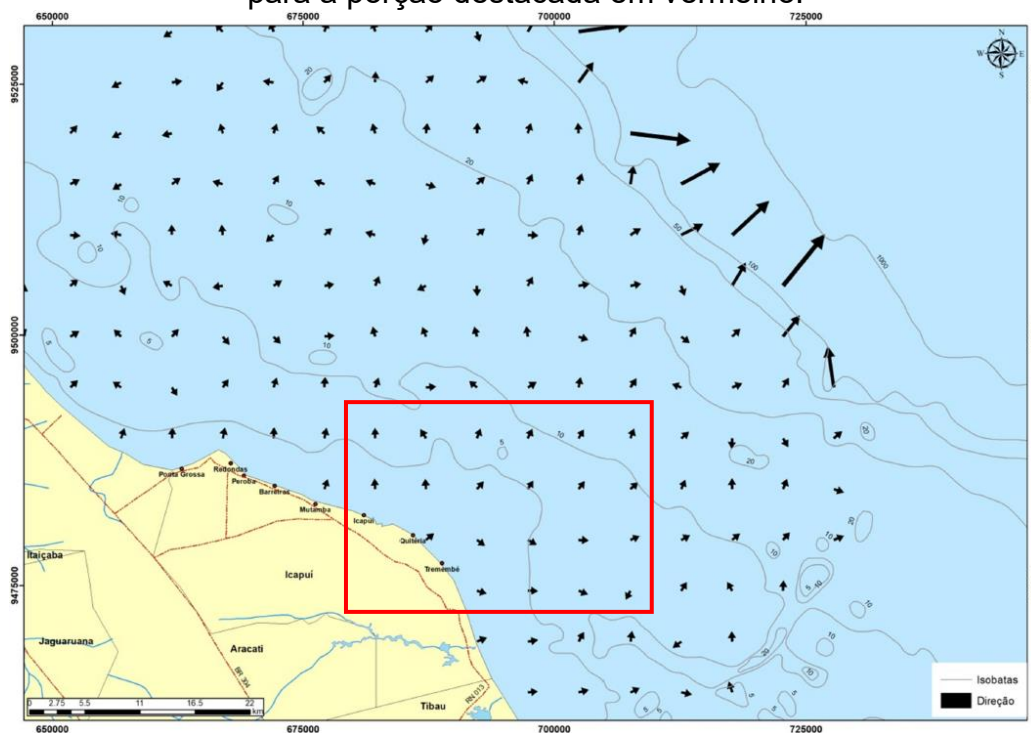
condiciona a orientação dos canais de maré, inicialmente formados em sentido contrário à deriva litorânea devido a este divisor presente.

Figura 31 – Mapa de entalhes da plataforma continental do Estado do Ceará. Detalhe para a porção destacada em azul defronte a posição da planície costeira de Icapuí, que parece atuar como um divisor dos entalhes.



Utilizando um modelo digital de terreno gerado a partir de dados batimétricos da plataforma adjacente a Icapuí, Abreu Neto (2017) gerou um mapa de declividades na área em questão (Figura 31). Percebe-se que também neste produto a região defronte aos canais de maré funciona como um divisor de relevo, indicando duas direções de fluxo, sendo uma para NW e outra para NE, sendo este um padrão correspondente à orientação dos canais de maré. Este contexto indica uma possível influência neotectônica na estruturação que condicionou as morfologias costeiras e de fundo atuais, que por sua vez têm condicionado, em partes, processos de transporte sedimentar ao longo da costa de Icapuí.

Figura 32 – Orientação da declividade da plataforma continental de Icapuí. Detalhe para a porção destacada em vermelho.



Fonte: adaptado de Abreu Neto (2017).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Os processos erosivos e deposicionais ao longo da linha de costa de Icapuí são influenciados por agentes naturais e antrópicos. Neste contexto, os canais de maré existentes à frente da desembocadura estuarina da área – na maioria das vezes denominada como delta de maré – representam feições altamente dinâmicas e que controlam o fluxo de sedimentos a sotamar.

Através de sensores remotos óticos foi possível evidenciar a capacidade de retenção dos sedimentos que estas feições têm, capturando-os na deriva litorânea e redistribuindo-os mar adentro a sotamar, longe da linha de costa e causando déficit sedimentar nas praias adjacentes.

A existência de macroondulações entre os canais de maré parece ser um fator potencializador da ação erosiva das marés de enchente, especialmente em picos ocasionados por eventos de sizígia. Neste âmbito, as macroondulações aumentariam o fator de confinamento das linhas de fluxo na maré enchente com rumo a SW que, já sofrendo déficit sedimentar devido ao efeito de molhe hidráulico devido aos canais de maré, incidem com maior energia nas praias de Barreiras de Cima e Barrinha. Neste

contexto, o pico erosivo identificado em 2011 teve como um dos agentes responsáveis a coalescência entre dois canais de maré naquele ano, intensificando o efeito de barramento dos sedimentos em deriva litorânea e, conseqüentemente, agravando os processos erosivos.

A identificação da criação e migração destes canais sugere que o ângulo de disposição deles em relação à linha de costa pode ter relação com a sazonalidade de eventos erosivos e deposicionais. Quando dispostos perpendicularmente, aumentam o déficit sedimentar, e conforme rotacionam e se tornam mais paralelos à linha de costa, podem, pelos mecanismos de *by-pass* apresentados, condicionar uma maior sedimentação - ou mesmo equilíbrio - na área. Logicamente, este processo não pode ser estudado de forma isolada, pois outros agentes naturais e antrópicos têm influência nesta dinâmica.

A fim de promover um melhor entendimento sobre a dinâmica existente na planície de maré e seus canais, sugere-se o modelamento hidrodinâmico ao longo de toda sua superfície, além da geração de um modelo digital de terreno mais acurado e identificação de vetores prevaletentes de transporte sedimentar, também compreendendo quais canais são preferenciais em enchente ou vazante.

Por fim, este trabalho demonstrou que estudos baseados em dados multifonte de sensores remotos podem propiciar um melhor entendimento de ambientes costeiros, realizando o resgate histórico de informações e detalhando a identificação de feições existentes nestes ambientes, podendo as técnicas aqui apresentadas serem replicadas em outros contextos litorâneos a fim de obter um melhor entendimento dos processos atuantes na área.

## REFERÊNCIAS

- ABREU NETO, J.C. **Geodiversidade da plataforma continental de Icapuí, Ceará: uma proposta de identificação de áreas chave em ambientes marinhos**. 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2017.
- AMARO, V. E. **Análise Conjunta de Dados Geológicos, Geofísicos e de Sensoriamento Remoto do Setor Extremo Nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil, com Ênfase nas Zonas de Cisalhamento Dúcteis Neoproterozóicas**. 1998. 401 p. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 1998.
- AMARO, V. E.; ARAUJO, A. B. Análise Multitemporal da Morfodinâmica da Região Costeira Setentrional do Nordeste do Brasil entre os Municípios de Grossos e Tibau, Estado do Rio Grande do Norte. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 2, p. 77-100. 2008.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M.S. T.; SOUTO, M. V. S.. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e Geodésia de precisão**. 1. ed. Natal, 2012. 118 p.
- ARAUJO, R. S. **Morfologia do Perfil Praial, Sedimentologia e Evolução Histórica da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói – SC**. 2008. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), Itajaí, 2008
- AUBREY, D. G.; SPEER, P.E. Updrift migration of tidal inlets. **The Journal of Geology**, v. 92, n. 5, p. 531-545, 1984.
- AUBREY, D.G.; SPEER, P.E. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part I: Observations. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 21, n. 2, p. 185-205, 1985.
- AUSTRALIAN BUREAU OF STATISTICS. **Regional population growth, Australia and New Zealand**, Australia, 2002.
- BARROS, E. L. **Erosão costeira no litoral do município de Icapuí-Ce na última década: causas, consequências e perspectivas futuras**. 2018. 254 f.: Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BIJLSMA, L.; EHLER, C. N.; KLEIN, R. J. T.; KULSHRESTHA, S. M.; MCLEAN, R. F.; MIMURA, N.; NICHOLLS, R. J.; NURSE, L. A.; PÉREZ NIETO, H.; STAKHIV, E.; TURNER, R.K.; WARRICK, R.A. Coastal Zones and Small Islands. *In*: IMPACTS, ADAPTATIONS AND MITIGATION OF CLIMATE CHANGE: SCIENTIFIC-TECHNICAL ANALYSES. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, p. 289-324. 1996.

BIRD, Eric Charles Frederick. **Coastline changes: a global review**. Chichester, 1985. 219 p.

BIRD, Eric Charles Frederick. **Coastal Geomorphology: an Introduction**. West Sussex, 2011. 436 p.

BOAK, E. H.; TURNER, I. L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coastal Research**, p. 688-703. 2005.

BOORI, M. S.; AMARO, V. E. Detecting and Understanding Drivers of Natural and Ecoenvironmental Vulnerability Due to Hydro Geophysical Parameters, Ecosystem and Land Use Change Through Multispectral Satellite Data Sets in Apodi estuarine, Northeast Brazil. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 2, p. 125-139. 2010.

BOORI, M. S.; AMARO, V. E. Natural and Ecoenvironmental Vulnerability Assessment Through multi-temporal Satellite Data Sets in Apodi Valley Region, Northeast Brazil. **Journal of Geography and Regional Planning**, v. 4, n. 4, p. 216-230. 2011.

BROWN, J. M.; DAVIES, A. G. Flood/ebb tidal asymmetry in a shallow sandy estuary and the impact on net sand transport. **Geomorphology**, v. 114, n. 3, p. 431-439, 2010.

BRUUN, P.; GERRITSEN, F. By-Passing of sand by natural action at coastal inlets and passes. *In*: **Journal of Waterways and Harbours Devison**, vol. 85. pp. 75-107. 1959.

CAI, F.; SU, X.; LIU, J.; LI, B.; LEI, G. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. **Progress in Natural Science**, v. 19, n. 4, p. 415-426. 2009.

CAMFIELD, F. E.; MORANG, A. Defining and interpreting shoreline change. **Ocean & Coastal Management**, v. 32, n. 3, p. 129-151. 1996.

CASTRO, A.F.; SOUTO, M.V.S.; AMARO, V. E.; VITAL, H. Desenvolvimento e aplicação de um banco de dados geográficos na elaboração de mapas da morfodinâmica costeira e sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo em áreas costeiras localizadas no estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 53-64. 2016.

CHEN J. Y.; CHEN S. L. Estuarine and coastal challenges in China. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 20, n. 2, p. 174-181. 2002.

CHOWDHURY, S. R.; TRIPATHI, N. K.. Coastal erosion and accretion in Pak Phanang, Thailand by GIS analysis of maps and satellite imagery. **Songklanakarin Journal of Science & Technology**, v. 35, n. 6. 2013.

CHOWDHURY, P.; BEHERA, M. R.. Nearshore Sediment Transport in a Changing Climate. *In: CLIMATE CHANGE SIGNALS AND RESPONSE*. Singapore, p. 147-160. 2019.

COLLINSON, J.D.; THOMPSON, D.B. **Sedimentary structures**. George Allen & Unwin (London), 1982. 194 p.

COSTA, B. C. P.; AMARO, V. E.; FERREIRA, A. T. S. Classificação de Espécies de Mangue no Nordeste do Brasil com Base em Imagens Híbridas de Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 1, p. 135-149. 2017

DAMASCENO, A. M.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na análise multitemporal da linha de costa região de Icapuí (CE), entre 1984 e 2013. **Revista Geonorte**, v.10, n.1, p. 52-58. 2014.

DAVIS Jr, R. FITZGERALD, D.. **Beaches and Coasts**. Blackwell Publishing, Malden, EUA, 2004. 432 p.

DOLAN, R.; HAYDEN, B.P.; MAY, P.; MAY, S.K. The Reliability of Shoreline Change Measurements from Aerial Photographs. **Shore and Beach**, v. 48, n. 4, p. 22-29. 1980.

ELIAS, E.P.L.; VAN DER SPEK, A.J.F. Long-term morphodynamic evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (The Netherlands). **Marine Geology**, v. 225, n. 1-4, p. 5-21, 2006.

FARIAS, E. G. G. de; MAIA, L. P. Uso de Técnicas de Geoprocessamento para a Análise da Evolução da Linha de Costa em Ambientes Litorâneos do Estado do Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 4, 2010.

FERNANDES, L. R., DUARTE, C. R., SOUTO, M. V. S., AMARO, V. E. 2015. Análise temporal em curto tempo das barras arenosas na praia de Ponta Grossa, região costeira de Icapuí/CE. *In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2015, João Pessoa. Anais...* João Pessoa, p. 5356-5362.

FITZGERALD, D., GEORGIU, I., MINER, M. Estuaries and Tidal Inlets. *In: Coastal Environments and Global Change* (eds G. Masselink and R. Gehrels). 2015.

FREITAS, D. **Quantificação de Perigos Costeiros e Projeção de Linhas de Costa Futuras para a Enseada do Itapocorói**. 2008. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), Itajaí, SC, 2008.

GE, L.; XIAOJING L., FAN, W.; TURNER, I. L. Coastal Erosion Mapping Through Integration of SAR and Landsat TM Imagery. *In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM - IGARSS, 2013. Melbourne. Anais...* Melbourne, p. 2266-2269.

GREEN, E.; MUMBY, P.; EDWARDS, A.; CLARK, C.. **Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO, 2000. 328 p.

GUIMARÃES, U. S.; RODRIGUES, T. W. P.; GALO, M. D. L. B. T.; PAMPLONA, V. M. S. Change Detection Applied on Shorelines in the Mouth of Amazon River. *In: IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM*, Quebec City, 2014. **Anais...** Quebec City, p. 2146-2149.

GUO, Q.; RUILIANG P.; BING Z.; LIANRU G. A Comparative Study of Coastline Changes at Tampa Bay and Xiangshan Harbor During the Last 30 years. *In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS)*, Beijing, 2016. **Anais...** Beijing, p. 5185-5188.

HAYES, M. O. General morphology and sediment patterns in tidal inlets. **Sedimentary Geology**, v. 26, n. 1-3, p. 139-156, 1980.

HERRLING, G.; WINTER, C. Tidal inlet sediment by-passing at mixed-energy barrier islands. **Coastal Engineering**, v. 140, p. 342-354, 2018.

HIMMELSTOSS, E. A. 2009. DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. *In: THIELER, E. R.; HIMMELSTOSS, E. A.; ZICHICHI, J.L.; ERGUL, A. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. \*updated for version 4.3. 79 p. 2009.*

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais [e] Coordenação de Geografia. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94254.pdf>>. Acesso em: 18 jun 2019.

IPCC. Summary for Policymakers. *In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018.

KOMAR, P. **Beach Processes and Sedimentation**. 2. ed., New Jersey, 1998. 544 p.

LEATHERMAN, S. **Social and Economic Costs of Sea Level Rise**. San Diego, California, Academic Press, 2001. 232 p.

LIU, X. The coastal erosion of the abandoned Yellow River Delta in northern Jiangsu province, China: Based on analysis of remote sensing images. *In: 19th International Conference on. IEEE*, 2011. p. 1-5.

MAIA, A. O. **Reconstrução ambiental e evolução sedimentar da região costeira de Icapuí/CE por meio de processamento digital de imagens e análise de fácies**. 2017. 93 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, Brasil, 2017.

MARINO, M. T. R. D.; FREIRE, G. S. S.. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 13, n. 1, p. 113-129. 2013.

MEIRELES, A. J. A. **Mapeamento Geológico-geomorfológico do Quaternário Costeiro de Icapuí–Extremo leste do estado do Ceará**. 1991. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 182 p. 1991.

MEIRELES, A. J. A.; SANTOS, A. M. F. **Atlas de Icapuí**. Fortaleza: Editora Fundação Brasil Cidadão, 2012.

MEIRELES, A. J. A. **Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais**. Fortaleza: Edições UFC, 2012.

MEIRELES, A. J. A.; RAVENTOS, J. S.; THIERS, P. R. L. Aspectos geodinâmicos do delta de maré da planície costeira de Icapuí/CE. *In*: SILVA, J. B.; DANTAS, E. W. C.; ZANELLA, M. E.; MEIRELES, A.J.A. (Org.). **Litoral e Sertão: natureza e sociedade no nordeste brasileiro**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2006, p. 367-382.

MOORE, L. J. Shoreline Mapping Techniques. **Journal of Coastal Research**, v. 16, n. 1, p. 111-124, 2000.

MORAIS, J. O. Evolução Sedimentar da Enseada do Mucuripe. **Arq. Cien. Mar.** Fortaleza 21 (1/2): 20-32. 1981.

MORTON, R. A.; SPEED, F. M. Evaluation of Shorelines and Legal Boundaries Controlled by Water Levels on Sandy Beaches. **Journal of Coastal Research**, v. 14, n. 4, p. 1373-1384. 1998.

MOURA, M.R. **Processos costeiros e evolução da ocupação nas praias do litoral oeste de Aquiraz, Ceará entre 1970-2008**. Dissertação de Mestrado, Mestrado Acadêmico em Geografia/MAG, Fortaleza, 2009.

MUEHE, D. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006, 476 p.

MUEHE, D. **Erosão costeira, mudança do clima e vulnerabilidade**. GUERRA, Antonio José Teixeira; JORGE, Maria do Carmo Oliveira (Orgs.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo, p. 160-186. 2013.

NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). **Managing Coastal Erosion**. Washington, National Academic Press. 1990, 182 p.



OLIVEIRA, P.R.A. **Caracterização morfológica e sedimentológica da plataforma, continental brasileira adjacente aos municípios de Fortim, Aracati e Icapuí- CE.** 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

PAJAK, M. J.; LEATHERMAN, S. P. The High Water Line as Shoreline Indicator. **Journal of Coastal Research**, v. 18, n. 2, p. 329-337. 2002.

PEDROSA, A. A. **A geodinâmica e morfogênese das dunas eólicas no município de Canoa Quebrada, Aracati, Ceará, Brasil.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2016.

PINHEIRO, L.S, MORAIS, J.O. de, MAIA, L.P. 2016. The Beaches of Ceará, *In: Brazilian Beach Systems* Volume 17 of the series Coastal Research Library ; pp 175-199 DOI. 10.1007/978-3-319-30394-9\_7 Springer International Publishing

POSTMA, H., Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *In: G.H. Lauff (Editor), Estuaries, Am. Assoc. Adv. Sci. Publ., 83: 158--179. 1967.*

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; SOUTO, M. V. S. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia (Impresso)**, v. 63, p. 663-681. 2011.

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 151-162. 2013.

SILVA FILHO, W. F. **Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará.** Tese de Doutorado. Doutorado em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil. 2004

SMITH, M. J.; CROMLEY, R. G.. Measuring historical coastal change using GIS and the change polygon approach. **Transactions in GIS**, v. 16, n. 1, p. 3-15. 2012.

SOUSA, W. R. N; SOUTO, M. V. S.; MATOS, S. S.; SILVA NETO, C. A.; DUARTE, C. R. 2017. Extração automática de linhas de costa aplicada a o monitoramento de processos de erosão costeira. *In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2017, Santos. Anais...* Santos, 2017. p. 6423-6429.

SOUZA, A.S. **Aplicação do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas na Caracterização da Pluma de Sedimentos na Foz do Piranhas – Açu.** 2008. 120 p. Relatório de Graduação – Departamento de Geologia – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2008.

SOUZA, W.F. **Sensoriamento remoto e SIG aplicados à análise da evolução espaçotemporal da linha de costa do município de Icapuí, Ceará - Brasil.** 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2016.

SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F.; GRIGIO, A. M.; AMARO, V. E.; VITAL, H. Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, city of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration in GIS. **Journal of Coastal Research**, Special Issue No. 39, v. 3, p. 1618-1621. 2006.

SOUTO, M. V. S. **Análise da Evolução Costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, Região Sob Influência da Indústria Petrolífera.** 2009, 177 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação de Geofísica e Geodinâmica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.

TRENHAILE, Alan. **Coastal dynamics and landforms.** Oxford University Press on Demand, 1997. 365 p.

VILLWOCK, J. A.; LESSA, G. C.; SUGUIO, K.; ANGULO, R. J.; DILLENBURG, S. R.. **Geologia e geomorfologia de regiões costeiras.** *In:* Quaternário do Brasil, 378 p. 2005.

VITAL, H.; NETO, F.S.; PLÁCIDO JÚNIOR, J.S. Morfodinâmica de um canal de maré tropical: estudo de caso na costa norte riograndense, nordeste do Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 2, p. 113-126. 2008.

XIMENES, D. R. B.; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R. Análise multitemporal da linha de costa para avaliação da evolução costeira na região de Icapuí/CE, Nordeste brasileiro, no período de 1984 a 2011. *In:* XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013, p. 1618-1625.

WARRICK, R.; BARROW, E.; WIGLEY, T.(Ed.). **Climate and sea level change: observations, projections and implications.** Cambridge University Press, 1993, 424 p.