

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Mattheus da Cunha Prudêncio

# ANÁLISE DA EVOLUÇÃO COSTEIRA PARA AS PRAIAS DE MURIÚ E JACUMÃ, LITORAL ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL, POR MEIO DO DSAS E SMC-BRASIL

Natal/RN

2019

## Mattheus da Cunha Prudêncio

# ANÁLISE DA EVOLUÇÃO COSTEIRA PARA AS PRAIAS DE MURIÚ E JACUMÃ, LITORAL ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL, POR MEIO DO DSAS E SMC-BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

Orientador

Ada Cristina Scudelari

Coorientador

Venerando Eustáquio Amaro

Natal/RN 2019 Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN Sistema de Bibliotecas - SISBI Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Prudêncio, Mattheus da Cunha. Análise da evolução costeira para as praias de Muriú e Jacumã, litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, por meio do DSAS e SMC-Brasil / Mattheus da Cunha Prudêncio. - 2019. 141 f.: il. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2019. Orientadora: Profa. Dra. Ada Cristina Scudelari. Coorientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro. 1. Evolução costeira - Dissertação. 2. Gerenciamento costeiro - Dissertação. 3. DSAS - Dissertação. 4. SMC-Brasil -Dissertação. I. Scudelari, Ada Cristina. II. Amaro, Venerando Eustáquio. III. Título. RN/UF/BCZM CDU 624

Elaborado por Kalline Bezerra da Silva - CRB-15 / 327

## Mattheus da Cunha Prudêncio

## ANÁLISE DA EVOLUÇÃO COSTEIRA PARA AS PRAIAS DE MURIÚ E JACUMÃ, LITORAL ORIENTAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL, POR MEIO DO DSAS E SMC-BRASIL

Dissertação apresentada ao curso de Pósgraduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - ênfase em Geotecnia.

### BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Ada Cristina Scudelari – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Coorientador (UFRN)

Prof. Dr. Michael Vandesteen Silva Souto – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Claudio Freitas Neves – Examinador Externo (UFRJ)

Natal, 31 de agosto de 2019.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que permanecem ao meu lado mesmo nos piores dias.

#### AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar força, me proteger e guiar na minha vida.

A minha família pelo apoio e por fazer o possível e impossível para me auxiliar em minha jornada.

Aos meus amigos pelo suporte e momentos de descontração.

A minha orientadora Ada Cristina Scudelari e meu coorientador Venerando Eustáquio Amaro pelos ensinamentos ao longo do meu mestrado.

Aos meus colegas do GEOPRO e GNOMO pelo convívio e aprendizado.

DI	EDICAT	ÓRIA		i
A	GRADE	CIME	NTOS	ii
SU	MÁRIO	)		iii
LI	STA DE	E FIGU	JRAS	V
LI	STA DE	E TABI	ELAS	ix
LI	STA DE	E SIGL	AS	X
RI	ESUMO	•••••		xi
AĿ	STRAC	T		xii
1	INTR	ODUÇ	2ÃO	1
2	CARA	CTEF	RIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	7
	2.1	Loca	alização e vias de acesso	7
2.2 Aspectos fisiográficos			ectos fisiográficos	8
3	MATH	ERIAI	S E MÉTODOS	15
	3.1	Aná	ilise da evolução da linha de praia	15
		3.1.1	Coleta e tratamento de dados multifontes	16
		3.1.2	Detecção das linhas de praia	19
		3.1.3	Análise Multitemporal das Linhas de Praia	19
		3.1.4	Classificações utilizadas	24
	3.2	Prop	pagação de ondas, correntes e transporte de sedimentos	26
		3.2.1	Estrutura e base de dados utilizadas	26
		3.2.2	Procedimentos e parâmetros adotados	31
	3.3	Aná	lise de variação volumétrica	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES			36
	4.1 Evolução da linha de praia			41
	4.2	Clin	na de ondas em águas rasas e correntes	49
		4.2.1	Clima de ondas em águas intermediárias	50

# SUMÁRIO

		4.2.2	Malhas de propagação	53
		4.2.3	Análise geral Error! Booki	nark not defined.
		4.2.4	Malha leste-nordeste	55
		4.2.5	Malha Leste	70
		4.2.6	Malha leste-sudeste	
		4.2.7	Malha sudeste	95
	4.3	Trans	porte de sedimentos	110
	4.4	Análi	se da variação volumétrica	113
5	CONC	CLUSÕI	ES	
6	REFE	RÊNCI	AS BIBLIOGRÁFICAS	

### LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo que abrange as praias de Jacumã e Muriú, o trecho de 12 km de praia está localizado a aproximadamente 40 km de distância da capital seguindo as principais vias de acesso (BR-101 e RN-306)
Figura 2.2 – Aspectos geológicos e geomorfológicos da área de estudo. FONTE: Elaborada pelo autor10
Figura 2.3 – Praia de Muriú. FONTE: GEOPRO
Figura 2.4 – Beach rocks na Praia de Jacumã. FONTE: GEOPRO11
Figura 2.5 – Dunas fixas localizadas na Praia de Muriú. FONTE: GEOPRO12
Figura 2.6 – Mapa de uso e ocupação da área de estudo. FONTE: Elaborada pelo autor
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia empregada, a utilização do DSAS e SMC-Brasil permitiram a visualização da evolução da linha de praia e balanço sedimentar além de fornecerem informações relevantes para a composição da análise da evolução volumétrica
Figura 3.2 - Fluxograma metodológico com os procedimentos adotados para análise da evolução das linhas de praia. LTSE = Landsat Toolbox for Shoreline Extraction; DSAS = Digital Shoreline Analysis System
Figura 3.3 – Representação da Linha de praia adotada para as análises do presente estudo. FONTE: GEOPRO. 18
Figura 3.4 – Elementos e módulos estatísticos presentes no DSAS. Fonte: Modificado de Himmelstoss <i>et al.</i> (2018).
Figura 3.5 – Regressão Linear aplicada em um transecto. A linha de regressão (linha tracejada) é determinada representando graficamente as posições da linha de praia em relação ao tempo e calculando a equação de regressão linear ( $y = 1,34x - 2587,4$ ). O coeficiente angular da reta corresponde a taxa de variação de linha de praia por um determinado período (no caso, 1,34 m/ano). Fonte: Modificado de Himmelstoss <i>et al.</i> (2018)
Figura 3.6 – Obtenção do LSE em um transecto. A equação que descreve a linha de que melhor se ajusta aos dados (linha tracejada na figura) é usada para estimar as linhas de costa (y) em determinado período (x). Os resíduos (diferença entre linha de praia real e estimada) são ilustrados pelas setas e usados para calcular o LSE. Fonte: Modificado de Himmelstoss <i>et al.</i> (2018)
Figura 3.7 – Descrição gráfica do LCI. A área em amarelo ilustra o intervalo de confiança de 95% em torno da regressão linear (linha tracejada). Fonte: Modificado de Himmelstoss <i>et al</i> .(2018)
Figura 3.8 – Classificação aplicada ao SCE e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor25
Figura 3.9 – Classificação aplicada ao NSM e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor25
Figura 3.10 – Classificação aplicada ao EPR e a LRR e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 3.11 – Diagrama das etapas utilizadas para propagação de ondas. Fonte: IH Cantábria - MMA, 2018 28 Figura 3.12 – Malhas de propagação utilizadas no <i>downscaling</i> . Fonte: IH Cantábria - MMA, 2018 29
Figura 3.13 – Fluxograma metodológico utilizado no presente estudo. Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3.14 - Fluxograma metodológico utilizado para obtenção da análise da variação volumétrica. Fonte				
Elaborada pelo autor				
Figura 3.15- Procedimentos adotados para transformação de linhas em superfície 3D. Fonte: Elaborada pelo autor.				
Figura 4.1 – Elementos utilizados no DSAS (Linha de base, Transectos e Linhas de praias), ao todo foram definidos uma linha de base, 121 transectos (espaçamento de 100 m) e 4 linhas de praias (1984, 1994, 2004, 2014) que permitiram a análise da evolução da linha de praia entre 1984 e 2014. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.2 - Análise da evolução da linha de praia no período de 1984 a 1994. Fonte: Elaborada pelo autor 41				
Figura 4.3 - Análise da evolução da linha de praia no período de 1994 a 2004. Fonte: Elaborada pelo autor 43				
Figura 4.4 - Análise da evolução da linha de praia no período de 2004 a 2014. Fonte: Elaborada pelo autor 45				
Figura 4.5 - Análise da evolução da linha de praia no período completo entre os anos de 1984 a 2014. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.6 – Pontos DOW selecionados para análise estatística. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.7 – Disposição das malhas de propagação e do ponto DOW na área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.8 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.9 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.10 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.11 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.				
Figura 4.12 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.13 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor. 				
Figura 4.14 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.15 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.16 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor				
Figura 4.17 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor. 				

Figura 4.18 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.19 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.20 – Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.21 - Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.22 - Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor72
Figura 4.23 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.24 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor74
Figura 4.25 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.26 – Malha Leste, correntes em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.27 - Malha Leste, correntes em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.28 - Malha Leste, correntes em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.29 - Malha Leste, correntes em regime médio e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor 79
Figura 4.30 - Malha Leste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor. 80
Figura 4.31 - Malha Leste, correntes em regime médio e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor 81
Figura 4.32 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.33 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.34 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.35 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor. 85
Figura 4.36 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.37 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor87
Figura 4.38 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4.39 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.40 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.41 - Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.42- Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.43 - Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.44 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.45 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor. 
Figura 4.46 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.47 - Malha sudeste, ondas em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor99
Figura 4.48 - Malha sudeste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor 100
Figura 4.49 - Malha Sudeste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor 101
Figura 4.50 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.51 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.52 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.53 - Malha sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.54 - Malha sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.
Figura 4.55 - Malha sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor. 109
Figura 4.56 – Fluxo de energia e transporte de sedimentos ao longo dos 11 perfis criados para representar a área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor
Figura 4.57- Análise qualitativa da variação volumétrica entre 1984 e 2014. Fonte: Elaborada pelo autor 113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Informações das imagens de satélite selecionadas do EarthExplorer, empregadas para obtenção das
linhas de praia multitemporais
Tabela 4.1 – Análise geral da Evolução da linha de praia. LP = Linha de Praia
Tabela 4.2 – Análise geral do clima de ondas
Tabela 4.3 – Análise geral das correntes
Tabela 4.4 – Localização e cota batimétrica dos pontos DOW
Tabela 4.5 - Pontos selecionados para análise de maior detalhe com destaque as ondas de direção Leste-Sudeste
que apresentaram mais de 70% da frequência das ondas na área de estudo
Tabela 4.6 – Conjunto de malhas criadas no SMC-Brasil para propagação de ondas e correntes53
Tabela 4.7 – Casos gerados a partir das quatro malhas resultantes da análise do ponto DOW
Tabela 4.8 – Localização e características dos pontos de interesse
Tabela 4.9 – Configuração utilizada para calcular o transporte de sedimento ao longo de perfis transversais à costa
e profundidade de fechamento obtida por meio da análise da arrebentação
Tabela 4.10 – Fluxo de energia e transporte de sedimentos ao longo dos 11 perfis criados

## LISTA DE SIGLAS

AWEI	Automated Water Extraction Index
DN	Digital Number
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EPR	End Point Rate
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
GEOPRO	Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal do Rio Grande do Norte
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LCI	Standard Error of the Slope with Confidence Interval
LRR	Linear Regression Rate
LR2	R-squared
LSE	Standard Error of the Estimate
LTSE	Landsat Toolbox for Shoreline Extraction
MNDWI	Modification of Normalized Difference Water Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NSM	Net Shoreline Movement
PNGC	Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro
SCE	Shoreline Change Envelope
SMC-Brasil	Sistema de Modelagem Costeira do Brasil
SIG	Sistema de Informação Geográfica
USGS	United States Geological Survey
TCT	Tasseled Cap Transformation

#### **RESUMO**

As zonas costeiras são estudadas por várias áreas da ciência, seja pela sua importância socioeconômica no surgimento e desenvolvimento da sociedade, seja pela importância ambiental dessas frágeis faixas transicionais entre os domínios continental e marinho. Atualmente, o crescimento demográfico e a intensificação da ocupação dessas áreas vem sendo alvo de maior atenção por todo o mundo diante da severidade dos danos causados pelas rápidas mudanças resultantes da interação de ondas, marés e correntes com a morfologia costeira. Aliados a falta de planejamento na ocupação dessas áreas, ainda existe uma grande lacuna nos estudos realizados sobre os processos e variáveis inseridas nesse meio que colocam em risco o equilíbrio existente entre o desenvolvimento de atividades de valor social e econômico e da preservação dos ecossistemas únicos dessa região. O estudo da zona costeira se fundamenta na observação e análise das mudanças sazonais dessas áreas que, devido a sua alta sensibilidade ambiental, está sujeita a modificações muitas vezes irreversíveis. Nesse contexto, o Estado do Rio Grande do Norte comporta cidades turísticas equipadas com densa infraestrutura costeira, que ao longo dos anos apresentam cada vez mais problemas em relação a dinâmica costeira, principalmente no que se refere a erosão de praias arenosas. Nesse cenário, o presente estudo teve como objetivo analisar a evolução costeira nas praias de Muriú e Jacumã, litoral oriental do Rio Grande do Norte, por meio do uso do Digital Shoreline Analysis System (DSAS) e do Sistema de Modelagem Costeira (SMC). O uso dessas ferramentas permitiu a análise da taxa de variação, amplitude e mobilidade da linha de praia entre 1984 e 2014 a partir da utilização de imagens da série Landsat e da caracterização da batimetria, clima de ondas, correntes e do transporte de sedimento ao longo de 60 anos (1948 - 2008), informações essas que foram posteriormente integradas e forneceram a variação volumétrica entre os anos de 1984 e 2014. As análises realizadas permitiram a identificação de episódios de deposição (média de avanço da linha de praia de 0,7 m/ano) no período de 1994 a 2004 e episódios de erosão de 1984 a 1994 e 2004 a 2014 ((média de recuo da linha de praia de 0,9 m/ano e -0,5 m/ano, respectivamente) e das características hidrodinâmicas (predomínio de ondas de direção leste-sudeste e de correntes de direção sudeste), além da taxa de transporte de sedimento que foi de 54.000 m<sup>3</sup>/ano a partir das análises do SMC e de 64.000 m<sup>3</sup>/ano a partir da integração do DSAS e SMC. Por fim, o estudo das praias de Muriú e Jacumã a partir da utilização do DSAS e SMC permitiu a caracterização e uma maior compreensão dos processos envolvidos na evolução costeira dessas praias. Além disso, permitiu a visualização da dinâmica atuante e da identificação dos setores de maior sensibilidade e susceptibilidade a mudanças, disponibilizando assim informações relevantes a ao gerenciamento, manutenção e preservação da área estudada.

Palavras chave: Evolução costeira, Gerenciamento costeiro, DSAS, SMC-Brasil.

#### ABSTRACT

Coastal zones are studied by several areas of science, either because of their socioeconomic importance in the emergence and development of society, or because of the environmental importance of these fragile transitional environments located between continental and marine domains. Currently, demographic growth and the occupation rising of these areas has been the object of higher attention worldwide due to the severity of the damages caused by the rapid changes resulting from the interaction of waves, tides and currents with the coastal morphology. Allied to the lack of planning in the occupation of these areas, there is still a great gap in the studies carried out on the processes and variables inserted in this environment, which exposes to danger the balance between the development of social and economic value activities and the preservation of the unique ecosystems developed in these regions. The study of the coastal zone is based on the observation and analysis of the seasonal changes of these areas that, due to their high environmental sensitivity, are subject to modifications that are often irreversible. In this context, the State of Rio Grande do Norte includes tourist cities equipped with dense coastal infrastructure that over the years presents more and more problems related to the coastal dynamics, especially regarding to erosion of sandy beaches. In this context, the present study aimed to analyze the evolution of Muriú and Jacumã beaches, eastern coast of Rio Grande do Norte, using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) and the Coastal Modeling System (SMC). The use of these tools allowed the analysis of the variation, amplitude and mobility of the shoreline between 1984 and 2014 and the characterization of the bathymetry, wave climate, currents and sediment transport during the 60 years (1948 - 2008). Finally, information from the DSAS and SMC were integrated, providing the volumetric variation between 1984 and 2014. The analysis allowed the identification of deposition episodes (mean of +0.7 m / year) from 1994 to 2004 and erosion episodes from 1984 to 1994 (mean of -0.9 m / year) and from 2004 to 2014 (mean of -0.5 m / year). In addition, it was possible to determine the hydrodynamic characteristics (predominance of east-southeast direction waves and southeast direction currents), as well as morphological characteristics (sediment transport rate of 54,000 m<sup>3</sup>/year (SMC) and 64,000 *m<sup>3</sup>*/year (DSAS-SMC)). The study of Muriú and Jacumã beaches allowed to construct a greater understanding of the processes involved in the coastal evolution of these beaches. In addition, it allowed the visualization of the active dynamics and the identification of the sectors of greater sensitivity and susceptibility to changes, thus providing relevant information to the management and maintenance and preservation of the area under study

Keywords: Shoreline evolution, Coastal Management, DSAS, SMC-Brasil.

### 1 INTRODUÇÃO

A zona costeira denota um espaço geográfico em que aspectos e elementos geológicos e ecológicos dos domínios continental e marinho interagem produzindo relevo e ecossistemas originais e altamente sensíveis. Igualmente é reconhecida como um setor de intenso intercâmbio de energia e matéria entre áreas de frágil equilíbrio entre as unidades geomorfológicas costeiras e estuarinas, suscetíveis às mudanças morfodinâmicas de longo prazo (décadas, por exemplo) a curto prazos (dias, meses e/ou estações sazonais), a partir da interação de fatores hidrodinâmicos como ondas, marés, correntes e ventos com os (Suguio, 2003; Bird, 2008), aliados aos aspectos morfológicos influenciados por processos tectônicos e fatores estruturais (Bezerra *et al.*, 2001; Vital *et al.*, 2002; Araújo, 2008; Whittaker, 2012).

Recentemente, estudos tem demonstrado que a erosão costeira nos diferentes setores costeiros do Brasil é influenciada tanto por fatores e causas naturais como antrópicas (Souza & Suguio, 2003). Quanto aos fatores naturais, estes estão relacionados à: Atuação da dinâmica costeira; Morfodinâmica praial; Ausência de aporte sedimentar; Característica da Fisiografia costeira; Zonas de trânsito e armadilha de sedimentos; Atuação de fenômenos climáticos de grande escala; Efeitos primários e secundários da elevação do nível relativo do mar e fatores tectônicos. Quanto à influência antrópica, se observa como fatores e causas principais a urbanização da orla e da planície costeira, implantação de estruturas rígidas (ex.: espigões, enrocamentos) e retirada da areia da praia. Ambos fatores, naturais e antrópicos levam muitas vezes à um balanço sedimentar negativo que por sua vez auxilia o aumento dos processos erosionais costeiros, numa relação intrínseca de causa e efeito (Souza, 2002; Souza & Suguio, 2003; Souza, 2009a).

Historicamente, essas áreas apresentaram um importante papel do surgimento ao desenvolvimento recente da sociedade humana devido à uma série de vantagens tais como: abundância de alimentos marinhos e terrestres, localização privilegiada e facilitadora do transporte de bens comerciais e serviços, e pelos recursos paisagísticos e culturais encontrados apenas nessa região que levaram à uma grande demanda da população na ocupação dessa região (Post & Lundin, 1996; Moraes, 2007; Shi & Singh, 2003; Neumann *et al.*, 2015).

Estimativas da população costeira, realizadas nas últimas duas décadas, revelam mais de 2,8 bilhões de pessoas (cerca de 40% da população mundial) habitando a faixa continental até 100 km da costa (Shi & Singh, 2003; IOC/UNESCO, IMO, FAO, UNDP, 2011) e 625 milhões de pessoas habitando a Zona Costeira de Baixa Elevação (ZCBE), faixa de até 10 m de

elevação em relação ao nível do mar (Neumann *et al.*, 2015). São áreas com elevada densidade populacional (87 pessoas por km<sup>2</sup> até 100 km da costa e de 241 pessoas por km<sup>2</sup> na ZCBE) comparadas às zonas interiores (47 pessoas por km<sup>2</sup>), que tendem a aumentar até 50% até 2050 (Shi & Singh, 2003, Neumann *et al.*, 2015) e que, em razão da intensa procura, falta de tecnologia e realização de estudos prévios, foram ocupadas de forma rápida e desordenada levando à perturbação do equilíbrio ali existente.

No âmbito nacional, o litoral brasileiro possui uma extensão linear de 8.500 km (Fernandez *et al*, 2019) de costa que engloba 395 munícipios em 17 estados e é regulamentada pela Lei Federal Nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC). Ao longo do litoral se estima, segundo pesquisas realizadas na última década, a concentração de cerca de 51 milhões de pessoas (IBGE, 2011) e o desenvolvimento de atividades econômicas que chegam a atingir 70% do PIB nacional (Souza, 2009a).

Quando se considera apenas o Estado do Rio Grande do Norte, o litoral chega a atingir 410 km, englobando 24 munícipios e comportando várias atividades socioeconômicas de grande relevância local e estadual (polo industrial petrolífero e de geração eólica, indústrias de salicultura e carcinicultura, turismo) e reservas ambientais como a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Ponta do Tubarão, localizada no município de Macau. Outra característica do litoral do Rio Grande do Norte é a intensa dinâmica sedimentar que promove notáveis mudanças na morfologia (formação de ilhas barreiras, variação significativa da linha de praia, abertura e fechamento de canais de maré) em curtos períodos (Tabosa *et al.*, 2002; Vital *et al.*, 2006; Amaro & Araújo, 2008; Rios & Amaro, 2011; Santos *et al.*, 2012; Amaro *et al.*, 2014; Rios *et al.*, 2016; Scudelari *et al.*, 2016; Vital *et al.*, 2016).

Tais perspectivas e principalmente suas consequências, passaram a chamar a atenção de gestores e tomadores de decisões sobre a necessidade de adequação de políticas para a zona costeira baseadas em dados e informações científicas comprobatórias. Seria necessário atender a expectativa populacional, mas em uma perspectiva mais sustentável, considerando-se a crescente ampliação e adensamento das ocupações urbanas que são frequentemente desorganizadas. Porém, apesar de sua clara importância, só foi a partir da década de 70 que houve um aumento significativo na procura e integração por estudos científicos de qualidade e com o intuito do aprimoramento da compreensão e das interdependências entre as diversas variáveis que governam as zonas costeiras (Davis Jr. & Fitzgerald, 2004; Souza, 2009a; Souza, 2009b).

Estudos realizados sobre a morfodinâmica de longo e curto prazos na zona costeira mostraram que essas áreas apresentam naturalmente variações na relação entre as perdas e os ganhos de sedimentos, denominada balanço sedimentar, onde quando houver mais perda de sedimentos do que ganhos o balanço será negativo e predominará a erosão e, quando positivas, a deposição de sedimentos será dominante. Apesar de tais variações se tratarem de um processo natural, alterações abruptas na dinâmica costeira, por vezes influenciada pela intervenção antrópica sobre esse espaço geográfico, acarretam alterações no equilíbrio existente nessas áreas gerando assim, consequências do ponto de vista ambiental e socioeconômico (Wright & Short, 1984; Bird, 1985; Suguio, 2003; Bird, 2008; Souza, 2009a; Souza, 2009b).

Do ponto de vista ambiental, a erosão acentuada de praias arenosas e falésias; a redução dos campos de dunas e florestas de manguezais (Defeo *et al.*, 2009); a elevação da intrusão salina nos aquíferos costeiros; o aumento da frequência e amplitude de inundações provocadas por ondas, marés e eventos extremos e o assoreamento de canais estuarinos (Post & Lundin, 1996; Souza, 2009a) são algumas das consequências causadas pelas variações observadas na zona costeira. Além disso, ecossistemas caracterizados por sua grande sensibilidade às mudanças globais também são afetados. Estudos recentes relatam a deterioração de pelo menos 38% dos manguezais mundiais (Thomas *et al.*, 2017), de 19% dos recifes de coral (Wilkinson, 2008) e de 20% das planícies costeiras no decorrer das últimas décadas. Tal realidade resulta, como dito anteriormente, de alterações globais no clima em conjunção com a intensificação da atividade antrópica que sugere cada vez mais um aumento na demanda de recursos das zonas costeiras ao passo que emprega pouco e limitados esforços para preservação desses ecossistemas (Agardy *et al.*, 2003) que muitas vezes recebem danos irreversíveis (Defeo *et al.*, 2009; Souza, 2009a).

Do ponto de vista socioeconômico, afetando principalmente as áreas densamente ocupadas e que se desenvolveram sem planejamento adequado, o que se observa é, entre outros: a perda do valor paisagístico da orla e das áreas próximas, comprometendo assim o potencial turístico da região; a perda do valor imobiliário de propriedades e bens públicos e privados e o dano direto ou indireto às obras realizadas nessas áreas (por exemplo, casas de praia, hotéis, portos) e às atividades desenvolvidas na região costeira (por exemplo, turismo, pesca, atividades industriais petrolífera, eólica, salicultura, carcinicultura) que causam um prejuízo inestimável todos os anos (Suguio, 2003; Souza, 2009a).

Em alguns setores do litoral brasileiro, os estudos mais detalhados sobre o balanço sedimentar foram intensificados a partir década de 1990 e os autores atribuíram as causas dos

processos dominantemente erosivos aos fatores naturais e/ou antrópicos (Ângulo, 1993; El-Robrini & Souza Filho, 1994; Dominguez & Bittencourt, 1996; Souza, 1997; Albino, 1999; Tomazelli *et al.*, 1998; Manso *et al.*, 2003). Souza (2009a) sumarizou os principais indicadores que atestam as causas naturais e antrópicas que promovem o fenômeno erosivo nas praias brasileiras. Nesse contexto, as influências das ações antrópicas no processo erosivo referem-se, sobretudo: à urbanização da planície costeira (setores das praias, manguezais, planícies fluviais e lagunares), que causa a impermeabilização do solo, mudanças nos padrões de drenagens naturais e destruição de dunas de pós-praia; intervenções de Engenharia para suporte à ocupação da orla marítima, com a implantação inadequada de estruturas rígidas ou flexíveis para proteção ou contenção da linha de costa ou outros fins (canais de drenagens artificiais); a retirada ou mineração de areias da célula sedimentar costeira, por dragagens em rios, canais de maré e na plataforma continental, que resulta em déficit sedimentar no mesmo setor e/ou praias vizinhas. Junta-se ao quadro, fato comum na região Nordeste do Brasil, os vários barramentos em bacias hidrográficas, que reduzem o aporte sedimentar terrígeno à plataforma continental (Vital *et al.*, 2006; Amaro e Araújo, 2008).

Tendo em vista os problemas apresentados, para gerenciar as zonas costeiras de forma sustentável, são necessários estudos longos e contínuos onde é imprescindível que aconteça o reconhecimento e entendimento dos aspectos fisiográficos bem como do desenvolvimento e evolução dessas áreas (Wright & Short, 1984; Gruber *et al.*, 2003). As primeiras ferramentas para realização dessas análises contavam com o uso de técnicas da Topografia clássica que eram capazes de mensurar as variações ao longo do tempo. No entanto, essas técnicas demandavam, além de custos elevados, excessivo trabalho operacional.

Com os avanços das Geotecnologias Aplicadas e o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na década de 1990, houve uma revolução nos estudos costeiros até então realizados. As ferramentas para analisar a zona costeira se tornaram desde então cada vez mais rápidas, precisas e baratas tornando o estudo dessas áreas muito mais acessível (Danforth & Thieler, 1992). Em ambiente SIG, os processos envolvidos na modificação da zona costeira podem ser analisados a partir da utilização de técnicas de geoprocessamento, que permitem a identificação, o tratamento e a seleção de informações provenientes de imagens de satélite, modelagem numérica e coleta de campo. O desenvolvimento dessas técnicas levou a criação de ferramentas como o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) e o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) que são utilizados para estudos da zona costeira e que permitem a integração de dados de diferentes fontes, permitindo assim uma melhor visualização da evolução costeira dessas áreas (Ford, 2013).

O DSAS, extensão desenvolvida para o *software* ArcGIS da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), foi desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS) para quantificar mudanças na linha de praia e é amplamente utilizado em estudos sobre a evolução costeira por possibilitar, de maneira rápida e eficiente, a análise das alterações da linha de praia por meio de módulos estatísticos. Essa ferramenta permite calcular desde informações simples, como a distância máxima entre diferentes linhas de praia, até elementos mais robustos como a taxa de variação da linha de praia com base no uso da regressão linear. Tais dados podem ainda ser visualizados e utilizados em análises multitemporais mais complexas (Thieler & Danforth, 1994; Thieler *et al.*, 2009).

O SMC - Brasil foi criado a partir da colaboração entre a Universidade de Cantábria e diversas instituições brasileiras (Ministério do Meio Ambiente do Brasil, Secretaria do Patrimônio da União, Universidade de São Paulo e Universidade Federal de Santa Catarina) por meio da Agência Espanhola de Cooperação Internacional e corresponde a outra ferramenta bastante utilizada no estudo das zonas costeiras. Essa ferramenta computacional combina metodologias, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos que são orientados para o estudo e solução de problemas na zona costeira, preenchendo assim uma lacuna de informações existentes no Brasil e que apresentam significativa importância à gestão costeira nacional (González *et al.*, 2007; Dalinghaus *et al.*, 2018).

No contexto do uso de geotecnologias como ferramentas que possibilitam o estudo da zona costeira e diante da importância dessas regiões para o Brasil e o Mundo, o presente trabalho tem como objetivo analisar a evolução costeira do litoral do Município de Ceará Mirim, Estado do Rio Grande do Norte (RN), que abrange as praias de Muriú e Jacumã por meio da utilização do DSAS e o SMC-Brasil.

As praias de Jacumã e Muriú apresentam elevada ocupação, com infraestrutura (casas, hotéis, restaurantes) que foi desenvolvida principalmente para atender a população local e principal atividade socioeconômica da região, o turismo. Essas praias já mostram sinais de problemas relacionados à dinâmica costeira há alguns anos, precisamente no que se refere a erosão costeira, que torna comum o uso de estruturas como quebra-mares por parte dos moradores dessas praias e que podem trazer danos significativos a infraestrutura local e das atividades ali realizadas.

Para obtenção de mais informações sobre a influência da dinâmica costeira nesse trecho, fornecendo assim informações relevantes para o gerenciamento e manutenção da região, foram utilizados os módulos estatísticos *Shoreline Change Envelope* (SCE), *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR) e *Linear Regression Rate* (LRR) presentes no DSAS e os módulos para propagação de ondas, correntes e transporte de sedimento do SMC-Brasil, além da variação volumétrica de sedimentos que utilizou informações provenientes do DSAS e SMC-Brasil que permitiram a visualização da evolução da costeira desse trecho do litoral do Estado do Rio Grande do Norte.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo foi realizada a caracterização da área de estudo com informações referentes a localização e aspectos fisiográficos.

### 2.1 Localização e vias de acesso

A área de estudo está localizada no Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte (RN), a aproximadamente 40 km da capital Natal, e corresponde a um trecho de 12 km do Município de Ceará Mirim, que engloba as praias de Muriú e Jacumã. As principais vias de acesso à área são a rodovia federal BR-101 e a rodovia estadual RN-306 (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo que abrange as praias de Jacumã e Muriú, o trecho de 12 km de praia está localizado a aproximadamente 40 km de distância da capital seguindo as principais vias de acesso (BR-101 e RN-306).

#### 2.2 Aspectos fisiográficos

O reconhecimento e entendimento dos aspectos fisiográficos dos setores costeiros e marinhos são muito importantes para elaboração de um planejamento eficaz e eficiente da zona costeira. Analisar os aspectos evolutivos geológicos e geomorfológicos bem como a interação dos sistemas marinhos e costeiros proporcionam junto a pareceres técnicos e base legal a base de um manejo ou gestão integrada da zona costeira (Gruber *et al.*, 2003). Outro aspecto importante da zona costeira é que os ambientes litorâneos se mantêm, em geral, sob condições de frágil equilíbrio dinâmico, susceptíveis à grandes mudanças que podem ser reversíveis ou não diante dos agentes naturais ou antrópicos ali atuantes. A evolução da zona litorânea pode ser devidamente descrita, estudada e utilizada para auxiliar o gerenciamento costeiro, porém o aumento da interação antrópica pode levar a um comportamento inesperado nessas regiões, gerando graves consequências a todos que interagem com esse meio (Suguio, 2003).

Recentemente, estudos têm demonstrado que a erosão costeira nos diferentes setores costeiros do Estado do Rio Grande do Norte é resultante da interação local entre as características geológicas e geomorfológicas da faixa litorânea, com as forças motrizes hidrodinâmicas: vento, ondas, marés e correntes de deriva (Vital *et al.*, 2006; Amaro & Araújo 2008; Vital *et al.*, 2008; Amaro *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2015; Vital *et al.*, 2016). Entretanto, as interações atmosfera-oceano determinam as flutuações sazonais do balanço sedimentar nas linhas de costa no longo a curto prazos, combinados com o aumento do nível médio do mar e com a interferência das ações antropogênicas (Souza, 2009a; Souza, 2009b; Amaro *et al.*, 2012; Amaro *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2015).

### Geologia e geomorfologia

A área de estudo se encontra no contexto geológico da Bacia Paraíba-Pernambuco, que tem como limite sul, o Alto de Touros onde faz contato com a Bacia Potiguar e como limite norte, o Alto de Maragogi onde faz contato com a Bacia Sergipe-Alagoas. A formação da Bacia Paraíba-Pernambuco é relacionada a abertura do Oceano Atlântico e corresponde a uma bacia de margem continental passiva, ligada à formação dos continentes sul-americano e africano (Vital *et al.*, 2006; Córdoba *et al*, 2007).

Como assinatura morfológica, o setor oriental do estado é caracterizado pela alternância de altos e baixos estruturais (*horsts* e grábens) que originam uma sequência de baías em forma de zeta que é associada à erosão dos sedimentos na região. Esse padrão é mais facilmente identificado na parte sul, onde se observa mais claramente os efeitos da estruturação

neotectônica, que produz falésias de até 15 m de altura, enquanto que à norte, onde se encontra a área estudada, se observa é um relevo mais plano com a presença marcante de longas faixas de praias e campos de dunas (Vital *et al.*, 2006).

O Litoral Oriental do Rio Grande do Norte apresenta extensão de 166 km com limites no Cabo Calcanhar (munícipio de Touros), à Norte e na praia do Sagi (município de Baía Formosa), à Sul e se distingue principalmente pela presença de: depósitos de praias arenosas, campos de dunas, arenitos de praias (*beachrocks*), falésias ativas da Formação Barreiras e planícies flúvio-estuarinas que estão restritas aos estreitos vales fluviais, onde se destacam os vales dos rios Curimataú (a sul de Natal) e o Potengi (em Natal), este último o rio de maior envergadura desse litoral (Vital *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2012).

Na área de estudo (Figura 2.2) foram identificadas principalmente depósitos litorâneos praiais que constituem as praias observadas na área de estudo, depósitos eólicos litorâneos vegetados que são compostos por dunas fixas e os depósitos eólicos não-vegetados que são representados por dunas móveis. Além disso, arenitos de praia e recifes são encontrados em menor expressão (Souza *et al.*, 2012).



Figura 2.2 – Aspectos geológicos e geomorfológicos da área de estudo. FONTE: Elaborada pelo autor.

Os depósitos litorâneos praiais (Figura 2.3) encontrados na área são compostos por areia de origem marinha, com coloração amarelada, granulometria fina à grossa, por vezes com níveis de cascalho. Esses depósitos estão distribuídos no contato entre os ambientes marinho e continental, onde por vezes também são observadas, paralelas a esses depósitos, linhas de arenitos de praia (*beachrocks*) (Figura 2.4) formados por arenitos e conglomerados siliciclásticos com cimento carbonático, (Souza *et al.*, 2012).



Figura 2.3 – Praia de Muriú. FONTE: GEOPRO.



Figura 2.4 – Beach rocks na Praia de Jacumã. FONTE: GEOPRO.

Os depósitos litorâneos vegetados e não vegetados, representadas por dunas (Figura 2.5), apresentam idade do Quaternário e são formadas por areias bem selecionadas, amareladas, inconsolidadas ou parcialmente consolidadas, de origem marinha. Sua formação está relacionada principalmente à ação dos ventos no litoral que direcionam as dunas móveis e formam cordões que podem ou não estar, atualmente, fixados por vegetação (Souza *et al.*, 2012).



Figura 2.5 - Dunas fixas localizadas na Praia de Muriú. FONTE: GEOPRO.

### Clima

O clima da região litorânea do RN é Tropical de verão seco, segundo os critérios utilizados por Köppen-Geiger e revistos por Alvares *et al.* (2014). A temperatura do ar média é de 25,3°C e a precipitação média é de 1.500 mm anuais, com baixa nebulosidade, forte insolação (2700 horas anuais) e alta umidade relativa do ar (média de 79%), segundo dados obtidos pelo INMET (2018).

A partir de dados históricos (entre os anos de 1961 a 2018) da estação meteorológica automática Natal-A304, foi observado o predomínio de ventos de direção sudeste que variam sazonalmente entre as direções leste, leste-sudeste e sul-sudeste com média de 4,3 m/s e que direcionam as dunas que se formam atualmente na região (INMET, 2018).

#### Hidrodinâmica

O regime de marés predominante é o de mesomarés semidiurnas, com amplitudes médias de marés de sizígia em torno de 2,2 m. O clima de ondas é caracterizado por altura de onda significativa entre 0,5 a 2,8 m com direções leste-nordeste, leste, leste-sudeste e sudeste e com períodos que variam entre 4,0 e 20,0 segundos (Amaro *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2015). Quanto as correntes oceânicas, a Subcorrente Norte do Brasil (Peterson & Stramma, 1991; Stramma & England, 1999) é a principal corrente atuante no extremo Nordeste do Brasil. Essa corrente, que tem seu núcleo entre 150 e 200 m se direciona à linha do Equador onde atinge velocidades de cerca de 0,9 m/s (Stramma *et al.*, 1995; Marin, 2009).

A atuação ininterrupta dos ventos alísios, o clima de ondas e o regime de marés, aliados à direção geral Norte-Sul da linha de praia e à plataforma continental rasa e relativamente estreita, são os responsáveis pela formação das correntes de deriva costeira, que efetivamente realiza o principal transporte de sedimentos no sentido sul para norte, paralelamente à linha de praia e com velocidade média de 0,05 a 0, 8m/s (Amaro *et al.*, 2014).

#### 2.3 Uso e ocupação

A intensa ocupação da área de estudo (Figura 2.6) foi uma das características levadas em consideração para escolha da área de estudo. Por se tratar de uma área com elevado interesse turístico, além de conjuntos populacionais (casas, casas de veraneio) são observados hotéis, pousadas, bares, quiosques e restaurantes. Essa infraestrutura se encontra muito próxima a linha de praia (Destaques da Figura 2.6) fazendo com que haja a construção de estruturas para amenizar os efeitos da dinâmica costeira.



Figura 2.6 – Mapa de uso e ocupação da área de estudo. FONTE: Elaborada pelo autor.

#### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

A base do presente trabalho foi estruturada principalmente na utilização de ferramentas e programas comumente empregados na análise da zona costeira: O DSAS e o SMC-Brasil. O DSAS foi utilizado para aquisição de informações relacionados a evolução da linha de praia enquanto que o SMC-Brasil teve como função a análise de ondas, correntes e transporte de sedimento (Figura 3.1). Além desses programas como o *ArcGIS* e sua a extensão *LANDSAT Toolbox for Shoreline Extraction*, o Matlab, o Surfer e o CorelDraw e o pacote Office do Windows também foram utilizados na composição de textos, mapas e gráficos presentes.



Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia empregada, a utilização do DSAS e SMC-Brasil permitiram a visualização da evolução da linha de praia e balanço sedimentar além de fornecerem informações relevantes para a composição da análise da evolução volumétrica.

#### 3.1 Análise da evolução da linha de praia

Essa etapa do estudo foi estruturado em três estágios (Figura 3.2): (*i*) aquisição e tratamento de dados que contempla desde a seleção das imagens de satélite até a aplicação das técnicas de PDI; (*ii*) obtenção das linhas de praia que contempla todos os processos envolvidos na extração das linhas de praia a partir das imagens de satélites multitemporais em ambiente SIG; e (*iii*) análise multitemporal através do *DSAS*, que abrange o estudo sobre as variações entre as linhas de praia, realizados de forma integral (1984 a 2014) e fracionada (1984 a 1994, 1994 a 2004 e 2004 a 2014). Cada um desses estágios foi descrito ao longo desse capítulo.



Figura 3.2 - Fluxograma metodológico com os procedimentos adotados para análise da evolução das linhas de praia. LTSE = Landsat Toolbox for Shoreline Extraction; DSAS = Digital Shoreline Analysis System.

#### 3.1.1 Coleta e tratamento de dados multifontes

A primeira etapa do trabalho consistiu na seleção de imagens de satélite que foram selecionadas tendo em vista: as resoluções espacial e espectral, abrangência da escala temporal (longo e curto prazos), cobertura de nuvens e nas condições de altura de maré no momento da aquisição da imagem (Tabela 3.1). A parametrização desses atributos foi necessária tendo em vista a análise integrada de múltiplas linhas de costas, a correlação e avaliação da proposta em relação a outros estudos realizados nos últimos anos (Busman *et al.*, 2013; Amaro *et al.*, 2014; Scudelari *et al.*, 2016).

Nos estudos sobre as tendências de erosão/deposição de sedimentos em praias oceânicas, diferentes indicadores têm sido usados para a definição do termo *linha de praia*, sobretudo em zonas costeiras influenciadas por mesomarés e macromarés (Boak e Turner 2005). Nesse trabalho a linha de praia foi estabelecida como a linha que na face de praia separa a área seca da molhada (zona saturada), compreendida como a última posição de maré mais alta no momento do imageamento (Amaro *et al.*, 2014).

O emprego das imagens multiespectrais do Landsat 5-TM e Landsat 8 - OLI justificase pela abrangência da série histórica do programa Landsat – com imagens do Landsat 5 - TM disponíveis entre 1984 e 2011 e do Landsat 8 - OLI que disponibiliza imagens desde 2013 – a resolução temporal de 16 dias e a gratuidade desses produtos oferecida pela USGS. Contudo, o maior desafio no uso de imagens da série Landsat na extração das linhas de praias está na resolução espacial limitada a 30 m.

Apesar dessa limitação as imagens Landsat no formato "L1T" têm sido disponibilizadas já ortorretificadas com base em pontos de controle no terreno e modelos digitais de elevação (Tucker *et al.* 2004; Roy *et al.* 2014). Para esse estudo, agregou-se à correção geométrica e o registro das imagens multitemporais as informações de geolocalização das bases geodésicas do Laboratório de Geotecnologias e Modelagens Costeira e Oceânica (GNOMO) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, instaladas nas praias de Muriú e Jacumã, reduzindo os erros a dimensões inferiores a 0,5 pixel e aumentando a acurácia das imagens (Tabela 1). O conjunto de imagens foram então projetadas no sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) e o *Datum* do Sistema Geodésico Mundial - 1984 (WGS-84). Entretanto, alguma inconsistência quanto ao posicionamento pode permanecer com relação às incertezas.

Tabela 3.1 - Informações das imagens de satélite selecionadas do *EarthExplorer*, empregadas para obtenção das linhas de praia multitemporais.

Satélite	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 5	Landsat 8
Sensor	ТМ	ТМ	ТМ	OLI
Data de imageamento	17/11/1984	29/01/1994	09/01/2004	03/10/2014
Hora da coleta (Brasília)	08h58m32s	08h49m54s	9h08m20s	9h28m51s
Resolução espacial	30m	30m	30m	30m
Resolução radiométrica	8 bits	8 bits	8 bits	16 bits
Altura de maré	1,45m	1,01m	1,10m	1,2m
Datum	WGS - 84	WGS - 84	WGS - 84	WGS - 84
Projeção	UTM	UTM	UTM	UTM
Zona	25 Sul	25 Sul	25 Sul	25 Sul
Ponto/Órbita	214/064	214/064	214/064	214/064
Acurácia	7,5m	5m	4,7m	10,9m
Pontos de controle	70	32	87	58

Após a seleção das imagens foi realizada a aplicação da correção atmosférica para minimizar quaisquer interferências na coleta das linhas de costa. Essa correção foi aplicada tendo em vista que os sinais de radiação eletromagnética, coletados pelos satélites, são modificados pelo espalhamento e absorção de gases e aerossóis em sua passagem pela atmosfera (Song *et al.*, 2001).

A correção atmosférica foi aquela do método *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis* of Spectral Hypercubes (FLAASH) disponível no software ENVI. O FLAASH é um algoritmo baseado no MODTRAN e foi desenvolvido para análises da faixa espectral do visível ao infravermelho em imagens provenientes de sensores multiespectrais até os hiperespectrais. Esse algoritmo prove eficiente derivação baseada na física de propriedades atmosféricas albedo, coluna de vapor d'agua e aerossol (Cooley *et al.*, 2002; França *et al.*, 2015; Jorge *et al.*, 2015).

Após a utilização da correção pelo método FLAASH, as imagens definidas como matrizes de *pixels* com *Digital Number* (DN) foram transformadas para que os pixels representassem os valores de refletância dos objetos na superfície. O uso da refletância permite uma aproximação maior entre as imagens de Sensoriamento Remoto e os dados de campo (Crist, 1985), sendo tido como adequado para a análise multitemporal de linhas de praia (Young *et al.*, 2017).

Em seguida, as imagens foram submetidas às técnicas matemáticas de Processamento Digital de Imagem (PDI) que tiveram como objetivo a ampliação do contraste entre os *pixels* para melhor destaque das linhas de praia que foram representadas pelo limite úmido-seco. Essa definição foi estabelecida por Dolan *et al.* (1987) como um indicador estável e de fácil visualização (Figura 3.3) e foi adotada tendo em vista a utilização de imagens de satélite para obtenção da linha de praia. Os métodos de transformação aplicados foram o *Tasseled Cap Transformation* (TCT) de Kauth & Thomas (1976) e o *Modification of Normalized Difference Water Index* (MNDWI) de Xu (2006), que foram então combinados para posterior vetorização da linha de praia em ambiente SIG.



Figura 3.3 - Representação da Linha de praia adotada para as análises do presente estudo. FONTE: GEOPRO.

O uso do TCT se deu por se tratar de procedimento que condensa a informação de múltiplas bandas espectrais em três bandas principais: brilho (*brightness*), verdor ou intensidade de verde (*greenness*) e umidade (*wetness*), que destacam respostas diferenciadas para o solo exposto, a vegetação verde, a umidade do solo e os corpos d'agua, principais elementos do terreno que são usados como referência para a definição da linha de praia.

A decisão sobre o uso do MNDWI se deu a partir da análise de estudos prévios (Maglione *et al.*, 2014; Szabó *et al.*, 2016; Sarp & Ozcelik, 2017) que compararam os índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Gao, 1996), *Modification of Normalized Difference Water Index* (MNDWI) (Xu, 2006) e *Automated Water Extraction Index* (AWEI) para delimitação de corpos de água (Feyisa *et al.*, 2014).

#### 3.1.2 Detecção das linhas de praia

Nesta etapa foi utilizada a ferramenta *LANDSAT Toolbox for Shoreline Extraction* (LTSE) que permitiu a obtenção da linha de praia de maneira semiautomática por meio do processo de vetorização das imagens de satélite. A utilização dessa ferramenta permitiu que a coleta das linhas de praias ocorresse de forma mais rápida e segura do que a vetorização manual normalmente utilizada (Daniels, 2012).

Inicialmente, o LTSE foi utilizado para realizar a classificação das imagens de satélite em duas classes que representaram a parte continental e marinha da área de estudo. Essa classificação foi realizada utilizando as bandas resultantes da combinação do TCT e do MNDWI que criou agrupamentos de *pixels* de mesma refletância simplificando assim a visualização e manuseio dos dados nas etapas posteriores.

Após as etapas de classificação, ocorreu então a filtragem dos *pixels* através do uso de um filtro do tipo majoritário para reduzir o número de *pixels* isolados que poderiam causar interferência na obtenção da linha de praia, que foi realizada em seguida, por meio do uso das ferramentas de contorno e suavização.

Como atividade final foi realizada a avaliação visual da forma da linha de praia, com objetivo de corrigir possíveis erros e ambiguidades causadas pela presença de algumas nuvens muito densas ou geradas como artefato devido ao método empregado. Ainda nessa etapa, todo o processo empregado foi analisado quanto a sua correspondência com a realidade de terreno, de acordo com reconhecimento *in loco*.

#### 3.1.3 Análise Multitemporal das Linhas de Praia

Nessa etapa foram utilizadas as ferramentas disponíveis na ferramenta DSAS que é constituído por três elementos básicos: as linhas de praia (ou costa) em si; as linhas de base como referência da forma geral da praia em estudo; e, os transectos lançados perpendiculares à linha de base (Thieler *et al.*, 2009).

As linhas de praia (ou costa) necessitam conter informações relacionadas às datas de sua obtenção, associadas às incertezas. Linhas de praia de diferentes fontes (por exemplo, imagens de satélites, levantamentos geodésicos, fotografias aéreas, *laser scanner* terrestre) podem ser utilizadas de maneira integrada, mas caso sejam utilizados dados de diferentes resoluções espaciais, ou onde se pretenda priorizar uma data específica, é necessário atribuir uma determinada incerteza para cada linha (Busman *et al.*, 2014). No presente estudo, quatro linhas de praia foram utilizadas (1984, 1994, 2004, 2014), cada uma delas referente a uma das imagens da série Landsat anteriormente processadas: 1984, 1994, 2004 (Landsat 5 - TM) e 2014 (Landsat 8 - OLI).

As linhas de base do DSAS estão dispostas paralelamente as linhas de costa para que não sejam geradas falsas análises espaciais, em desacordo com a verdade do terreno, ao se utilizarem os cálculos nos módulos estatísticos. A criação das linhas de base também deve considerar a direção média de todas as linhas de costas envolvidas e podem ser criadas tanto de forma manual como de forma automática, caso todas as linhas de costas tenham forma e direção similares (Franco *et al.*, 2012).

Os transectos, linhas perpendiculares às linhas de base, foram espaçados com 100 m de espaçamento, e consequentemente gerando 121 transectos, determinados a partir da precisão que se pretende obter com tais dados e da escala espacial de trabalho adotada. Esse elemento é gerado automaticamente pelo *DSAS* após a criação da linha de base, mas uma avaliação manual dessa disposição se faz necessária, para que não ocorram erros de espacialização.

Após a organização de todos os elementos necessários ao funcionamento do *DSAS* calculou-se os módulos *Shoreline Change Envelope* (SCE), o *Net Shoreline Movement* (NSM), *End Point Rate* (EPR) e *Linear Regression Rate* (LRR) para qualificar e quantificar a variação da linha de praia. Cada um desses módulos é abordado de forma objetiva a seguir.

O SCE consiste no cálculo da distância entre a linha de praia mais próxima e mais distante da linha de base. Este módulo foi utilizado para observar a amplitude da variação da linha de praia em um determinado período, mas também pode ser entendido como um indicador de área de risco já que o mesmo considera as variações de linha de praia máximas que aconteceram ao longo de um transecto.

O NSM calcula a distância entre a linha de praia mais antiga e a mais recente no período de estudo. Esse módulo torna possível observar a mobilidade da linha de praia ao longo dos anos. O NSM também pode ser comparado com o SCE para determinar se houve predomínio, ou não, de episódios de erosão ou deposição durante a série temporal estudada.
O EPR fornece uma taxa média de variação da linha de praia ao longo de um intervalo de tempo. Esse módulo fornece uma visualização simplificada da evolução da linha de praia já que considera apenas duas linhas de costa.

Uma representação gráfica dos elementos e dos módulos estatísticos presentes no DSAS pode ser observada na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Elementos e módulos estatísticos presentes no DSAS. Fonte: Modificado de Himmelstoss et al.(2018).

Como último módulo o LRR permite a obtenção da taxa de variação de linha praia a partir do emprego da regressão linear simples (Figura 3.5). Em cada transecto são utilizadas todas as linhas de praia disponíveis que permite, geralmente, uma visualização mais realista da evolução da linha praia.

No módulo LRR os valores estimados de y são calculados para cada linha de praia usando os valores de x a partir de uma equação da reta (y=mx+b) (Figura 3.5). Onde x é a data de coleta da linha de praia, y é a distância estimada a partir da linha de base, m é a taxa de variação da linha de praia e b é uma constante (Thieler *et al.*, 2009).



Figura 3.5 – Regressão Linear aplicada em um transecto. A linha de regressão (linha tracejada) é determinada representando graficamente as posições da linha de praia em relação ao tempo e calculando a equação de regressão linear (y = 1,34x - 2587,4). O coeficiente angular da reta corresponde a taxa de variação de linha de praia por um determinado período (no caso, 1,34 m/ano). Fonte: Modificado de Himmelstoss *et al.*(2018).

Para avaliação dos erros provenientes do uso do módulo LRR foram utilizados três módulos auxiliares, o *Standard Error of the Estimate (LSE), R-squared (LR2) e Standard Error of the Slope with Confidence Interval (LCI).* 

O *LSE* (Figura 3.6) avalia a precisão do ajuste da linha de regressão na previsão da posição de uma linha de praia para um determinada ponto no tempo. Esse módulo é calculado a partir da equação:

$$LSE = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{n - 2}}$$
 Equação 1

Onde y é distância entre a linha de praia e a linha de base, y' é a distância entre a linha de praia e a linha de base gerada pela regressão linear e n é o número de linhas de costa calculados.



Figura 3.6 – Obtenção do LSE em um transecto. A equação que descreve a linha de que melhor se ajusta aos dados (linha tracejada na figura) é usada para estimar as linhas de costa (y) em determinado período (x). Os resíduos (diferença entre linha de praia real e estimada) são ilustrados pelas setas e usados para calcular o LSE. Fonte: Modificado de Himmelstoss *et al.*(2018).

O módulo LR2 corresponde a um coeficiente adimensional que mostra o quão bemsucedido a linha de praia gerada pela regressão linear se ajusta aos dados de linha de praia reais. Os valores de LR2 variam entre 0 e 1 onde 0 significa que o modelo não se ajusta aos dados utilizados e 1 significa que o modelo se ajusta completamente aos dados utilizados. O LR2 é definido pela seguinte equação:

$$LR2 = 1 - \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{\sum(y - \bar{y})^2}}$$
 Equação 2

onde y é distância entre a linha de praia e a linha de base, y' é a distância entre a linha de praia e a linha de base gerada pela regressão linear e  $\overline{y}$  é a média das linhas de costa analisadas.

Como último módulo auxiliar, o LCI (Figura 3.7) é calculado a partir da multiplicação do desvio padrão do coeficiente angular da reta pelo teste t bicaudal em determinado intervalo



de confiança. Esse módulo descreve a margem de incerteza proveniente da análise de regressão linear.

Figura 3.7 – Descrição gráfica do LCI. A área em amarelo ilustra o intervalo de confiança de 95% em torno da regressão linear (linha tracejada). Fonte: Modificado de Himmelstoss *et al.*(2018).

## 3.1.4 Classificações utilizadas

Para fins de análise e discussão dos dados usados para caracterização da área, os dados foram submetidos a três diferentes classificações, uma aplicada as informações referentes a amplitude de variação da linha de praia, outra aos dados de mobilidade da linha de praia e a última aplicada às taxas de variação de linha de praia representadas pelo EPR e LRR.

As classificações utilizadas no presente estudo foram baseadas nos trabalhos de Amaro *et al.* (2012) e Busman *et al.* (2013b) junto a análise de estudos que também tiveram como base a utilização do DSAS por meio de linhas de praia extraídas de imagens de satélite da série Landsat (Sánchez-García *et al.*, 2015; Almonacid-Caballer *et al.*, 2016; Luijendijk *et al.*, 2018; Nassar *et al.*, 2018). Esses estudos mostraram a aplicabilidade da metodologia empregada para quantificação de variações compatíveis com a classificação aqui adotada.

A primeira classificação (Figura 3.8), aplicada aos dados de SCE, foi baseada em Busman *et al.* (2013) ocorreu em 3 classes: baixa amplitude (0 e 5 m), amplitude moderada (5 e 25 m) e alta amplitude (acima de 25 m).

	Variação	Classificação
•	0 a 5 metros	Baixa amplitude de variação de linha de praia
•	5 a 25 metros	Amplitude de variação de linha de praia moderada
•	> 25 metros	Alta amplitude de variação de linha de praia

Figura 3.8 - Classificação aplicada ao SCE e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda classificação (Figura 3.9), também baseada em Busman *et al.* (2013) se deu em 5 diferentes classes que refletem a mobilidade de linha de praia, quando há uma mobilidade negativa essa foi denominada de regressão da linha de praia enquanto que quando positiva essa foi chamada de transgressão da linha de praia. Variações negativas, inferiores a 25 m de mobilidade receberam a denominação de regressão alta da linha de praia, entre -25 e -5 m de regressão de linha de praia moderada, entre -5 e 5 m de áreas com baixa mobilidade, entre 5 e 25 m de transgressão de linha de praia moderada e acima de 25 metros de mobilidade de alta transgressão da linha de praia.

	Variação	Classificação
•	< -25 metros	Regressão alta da linha de praia
•	-25 a -5 metros	Regressão da linha de praia moderada
•	-5 a 5 metros	Áreas com baixa mobilidade
•	5 a 25 metros	Transgressão da linha de praia moderada
•	> 25 metros	Alta transgressão da linha de praia

Figura 3.9 - Classificação aplicada ao NSM e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor.

A terceira classificação, baseada em Amaro *et al.* (2012), foi aplicada ao EPR e LRR (Figura 3.10), e foi dividida em 7 classes que definiram áreas de erosão e deposição em três diferentes intensidades além de um intervalo de estabilidade. Quanto à erosão, áreas com valores inferiores a -10 m anuais foram denominadas de áreas de alta taxa de erosão, entre -10 m e -5 m anuais foram denominadas de áreas de taxa de erosão moderada, áreas com -5 a -2 m anuais foram denominadas de áreas de baixa erosão. Quanto à deposição, intervalos de 2 a 5 m/ano foram definidos como áreas de baixas taxa de deposição, 5 a 10 m/ano como áreas de taxa de erosão moderada e intervalos superiores a 10 m/ano como áreas de alta taxa de

deposição. Por fim, áreas com taxas entre -2 e 2 metros foram consideradas, inicialmente, como áreas estáveis.

	Variação	Classificação
٠	< -10 m/ano	Alta taxa de erosão
•	-10 a -5 m/ano	Taxa de erosão moderada
•	-5 a -2 m/ano	Baixa taxa de erosão
•	-2 a 2 m/ano	Área de relativa estabilidade
•	2 a 5 m/ano	Baixa taxa de deposição
٠	5 a 10 m/ano	Taxa de deposição moderada
•	>10 m/ano	Alta taxa de deposição

Figura 3.10 – Classificação aplicada ao EPR e a LRR e seus respectivos intervalos. Fonte: Elaborada pelo autor.

# **3.2** Propagação de ondas, correntes e transporte de sedimentos

A utilização do SMC-Brasil foi de fundamental importância para o estudo na zona costeira brasileira, pois permitiu a construção, no intervalo de alguns anos, de uma base de dados que antes era indisponível no Brasil, viabilizando análises mais complexas acerca da hidrodinâmica no litoral (Almeida *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2015; IH Cantábria - MMA, 2017a). Esse tópico mostrará, de forma sucinta, a estrutura e funcionamento desse programa, bem como dos procedimentos e parâmetros adotados para simulação numérica de ondas, correntes e transporte de sedimentos que foram realizadas no presente estudo.

# 3.2.1 Estrutura e base de dados utilizadas

O SMC - Brasil se divide em duas principais ferramentas numéricas denominadas de SMC Tools e SMC, essas ferramentas apresentam uma série de aplicações e modelos numéricos que estão estruturados de acordo com a escala espacial e temporal das diferentes dinâmicas que afetam o litoral (González *et al.*, 2007).

O SMC Tools inclui uma extensa base de dados da costa brasileira com informações referentes a batimetria, ondas e nível do mar, que é utilizada para análise estatística dessas variáveis ambientais ao longo de séries temporais. Essa ferramenta ainda é utilizada para simulação numérica, onde é possível fazer a transferência de ondas de águas intermediárias até a costa, a avaliação do fluxo médio de energia e o transporte de sedimentos. Quanto ao SMC, esse apresenta uma série de modelos numéricos que permitem analisar a estabilidade de uma praia em diferentes escalas espaciais e temporais (curto, médio e longo prazos) (IH Cantábria -

MMA, 2018). Ambas essas ferramentas foram utilizadas no presente estudo tendo em vista estudos anteriores realizados por Almeida *et al.* (2015), Araújo *et al.* (2015) e Pinheiro *et al.* (2017).

## 3.2.2 Base de dados utilizadas

O SMC-Brasil se utiliza de três bases de dados, uma com dados batimétricos, uma com dados de níveis e outra com dados referentes ao clima de ondas.

A base de dados batimétrica utilizadas pelo SMC-Brasil são provenientes do Programa de batimetrias e cartas náuticas da costa (BACO) integrados à elementos batimétricos obtidos das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHI), da *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) e de pesquisas realizadas por navios de instituições como: Banco de Dados Ambientais para a Indústria do Petróleo (BAMPETRO), Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), Universidade de São Paulo (USP) e Marinha do Brasil (IH Cantábria - MMA, 2018).

A base de dados de níveis corresponde às informações acerca da maré meteorológica e da maré astronômica que são extraídas respectivamente da série *Global Ocean Surgers* (GOS) e da série *Global Ocean Tides* (GOT), ambas com informações horárias ao longo de 60 anos (1948 a 2008). Essa base é indispensável a propagação de ondas em direção a costa já que essas contêm informações em diferentes níveis de maré.

A base de dados de ondas utilizadas pelo SMC-Brasil é denominada *Downscaled Ocean Waves* (DOW) e contém uma série temporal de ondas com informação de 60 anos (1948-2008) dispostas de forma pontual, recebendo por esse motivo a denominação de pontos DOW. Essa base de dados foi construída por meio da reanálise numérica global de outra série de ondas já existente, a *Global Ocean Waves* (GOW) gerada a partir da simulação numérica das condições de ondas sobre a superfície dos oceanos durante um longo período utilizando informações atmosféricas de escala global (Reguero *et al.*, 2012).

Obtida no âmbito do projeto 'Efeitos da mudança climática na costa da América Latina e do Caribe (C3A), financiado pela Comissão Econômica para a América Latina e Caribe (CEPAL), a série de dados GOW foi criada a partir da utilização do modelo *Wave Watch* III (WWIII), versão 2.2 (Tolman, 2002), forçado com a reanálise atmosférica NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) sobre a batimetria global obtida do banco de dados GEBCO (Weatherall *et al.*, 2015).

A série de ondas GOW é adequada para definir as características do clima marítimo em águas profundas e descreve adequadamente o comportamento geral das ondas na região oceânica próxima ao Brasil. No entanto, esta base de dados sozinha não é apropriada para a realização de estudos próximos à costa devido a limitações relacionadas à escala dos processos e da baixa precisão da batimetria GEBCO nas proximidades da costa. Dessa forma, foi utilizada a técnica de *downscaling* para que se pudesse transferir séries de estado de mar até pontos mais próximos da costa (IH Cantábria - MMA, 2017a). A Figura 3.11 mostra um diagrama das etapas utilizadas para propagação de ondas no SMC-Brasil.



Figura 3.11 – Diagrama das etapas utilizadas para propagação de ondas. Fonte: IH Cantábria - MMA, 2018.

A metodologia empregada no *downscaling* resultou do intenso trabalho de pesquisa realizadas por Tomás (2009), Camus *et al.* (2010), Camus *et al.* (2011), Mínguez *et al.* (2011), Reguero *et al.* (2012), Camus *et al.* (2013) que permitiu a transferência de séries de estados de mar de longa duração até pontos próximos à costa, através de um número reduzido de

propagações. Essa metodologia se divide em três etapas principais que foram abordadas de forma sucinta abaixo.

Na primeira etapa, foi realizada a seleção otimizada dos casos mais representativos dos estados de mar. Isso ocorreu por meio do emprego da Análise de Componentes Principais (ACP) e da técnica de classificação de máxima dissimilaridade. A utilização combinada dessas técnicas permitiu a redução dos 534 mil estados de mar originais da série GOW para apenas 500, tornando assim viável a simulação numérica ao passo que manteve a características dos estados de mar ao longo dos 60 anos analisados (Camus *et al.*, 2011; Camus *et al.*, 2013; IH Cantábria - MMA, 2017a).

A segunda etapa consistiu na propagação dos estados de mar selecionados. Essa etapa foi realizada a partir de uma série de simulações numéricas resultados da aplicação do modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) em 17 malhas de propagação diferentes de 1 km de resolução espacial (Figura 3.12). Esse modelo foi escolhido tendo em vista a possibilidade de propagar as ondas em todas as direções e por poder cobrir áreas mais extensas quando comparados a outros modelos e utilizou como *input*, informações batimétricas provenientes de cartas náuticas e dados atmosféricos de ventos de escala regional (IH Cantábria - MMA, 2017a).



Figura 3.12 - Malhas de propagação utilizadas no downscaling. Fonte: IH Cantábria - MMA, 2018.

A terceira etapa consistiu na reconstrução de toda a série de estados de mar analisada em pontos de interesse. Essa etapa gerou uma biblioteca com os parâmetros de altura de onda significativa (Hs), período médio (Tm), período de pico (Tp) e direção média de onda ( $\theta_m$ ), que foi obtida a partir dos 1500 casos de propagação de ondas criados anteriormente (500 para cada nível de mar) por meio de por meio da aplicação de duas técnicas de interpolação, uma de funções de base radiais (Franke, 1982) e outra linear (IH Cantábria - MMA, 2018).

Por fim, os dados obtidos por meio do processo de *downscaling* passaram por uma validação, que ocorreu a partir da comparação dos resultados da metodologia aplicada com informações instrumentais provenientes de boias oceânicas e satélites. Essa validação mostrou que o processo de *downscaling* realizado, reproduz estatisticamente o clima marítimo na costa brasileira, sendo dessa forma aplicável ao presente estudo (IH Cantábria - MMA, 2018).

# 3.2.3 Procedimentos e parâmetros adotados

Para utilização dos recursos providos pelo SMC-Brasil, novamente foram realizadas três etapas principais (Figura 3.13): *(i)* Caracterização do clima de ondas; *(ii)* Propagação de ondas e correntes e *(iii)* Transporte de sedimentos.



Figura 3.13 – Fluxograma metodológico utilizado no presente estudo. Fonte: Elaborada pelo autor.

#### Caracterização do Clima de ondas em águas intermediárias

A primeira etapa foi realizada por meio do uso do SMC-Tools, onde inicialmente se estabeleceu a área que seria analisada no SMC-Brasil. A delimitação da área levou em consideração estágios posteriores do processo como a definição das malhas de propagação e transporte de sedimentos.

Após determinar a área que seria analisada, foram selecionados pontos DOW para avaliação do clima de onda. Esses pontos foram selecionados a partir de sua profundidade (15 a 20 m) restrita a esse intervalo pela limitação do modelo SWAN.

Após essa seleção, os pontos foram então analisados quanto a direção e altura de onda e período de pico no regime médio e de tempestade. Os pontos foram então divididos em grupos tendo em vista seus diferentes objetivos. O primeiro grupo foi utilizado para caracterização do clima de onda em águas intermediárias enquanto que o segundo grupo foi utilizado para analisar a influência da profundidade nos parâmetros da onda.

Os critérios adotados para análise levaram em consideração os parâmetros de onda e o posicionamento geográfico em relação à área de estudo (Almeida *et al.*, 2015; Araújo *et al.*, 2015; Pinheiro *et al.*, 2017). Os parâmetros de onda utilizados foram a altura e período em

regime médio e de tempestade que foram analisados quanto a sua frequência e potencial energético. O presente estudo considerou para seleção do ponto DOW o cenário de maior energia, ou seja, com maior capacidade de transporte de sedimento levando em consideração a equação do fluxo de energia. Dessa forma foram selecionados inicialmente os três pontos DOW com maior altura e período de onda e, desses três, o ponto com maior altura e período de onda na direção de ondas mais frequente. A altura de onda foi o fator de maior relevância no estudo apresentado.

## Propagação de ondas e correntes para águas rasas

A análise do clima de ondas permitiu a coleta de parâmetros fundamentais como direção, altura de onda e período de pico em regime médio e de tempestade que foram utilizados na modelagem da propagação de ondas.

Essa etapa, realizada por meio do Oluca-SP, consistiu inicialmente na reconstrução da batimetria que utilizou as cartas náuticas disponíveis no SMC-Brasil, dada a indisponibilidade de batimetrias de maior detalhe da região. Em seguida, os parâmetros coletados da análise estatística foram usados para definir um conjunto de malhas e em seguida foi realizada a criação de casos baseado no espectro de direção e frequência em três diferentes níveis de maré (baixamar, preamar e meia maré) gerando assim 24 casos diferentes.

Ainda no Oluca-SP foi realizada a propagação de correntes, que utilizou como parâmetros os valores pré-definidos pelo SMC-Brasil (Kswc = 1,0 m e  $\varepsilon$  = 12,0 m<sup>2</sup>/s) pois esses se encontram no intervalo apropriado para áreas de praia com interação onda-corrente (IH Cantábria – MMA, 2017b).

## Cálculo do Transporte de Sedimento

Após a propagação de ondas e correntes, foram realizadas as etapas necessárias para o cálculo do transporte de sedimento no SMC-Tools. Esse processo utilizou todo o conjunto de dados disponíveis no SMC-Brasil que foi submetido a uma amostragem dos casos mais representativos sendo o número de casos definido a partir da busca do equilíbrio entre a representatividade dos dados e custo computacional.

Considerando essa premissa se optou então pela construção de 150 casos entre o período de 1948 a 2008, com direção máxima e mínima com valores que englobaram todas as direções de onda geradas pela análise do clima de ondas em três estados do mar diferentes. Dessa forma

foram utilizadas ondas com alturas iguais ou superiores a 0,74 m e período de pico iguais ou superiores a 4 segundos, constituindo assim, no total, 450 casos.

Após o processamento dos casos, foram criados Pontos de Interesse (POI) dentro da área comum a todas as malhas criadas. Esses pontos foram utilizados para calcular o fluxo médio de energia e sua direção viabilizando assim o estudo do clima de ondas em águas rasas. A localização desses pontos foi feita a partir da análise da evolução da linha de praia realizada.

Em seguida foram criados perfis que tiveram como origem os pontos POI anteriormente criados. Esses perfis foram utilizados para calcular a probabilidade de arrebentação das ondas e o transporte de sedimento e foram dispostos perpendiculares à linha de praia e tiveram como entrada a declividade (calculado pelo próprio SMC) e diâmetro mediano do sedimento (obtido a partir da equação do perfil de equilíbrio de Dean). Esse procedimento foi realizado por meio do Matlab e tiveram como dados de entrada o nível do mar e a profundidade de fechamento dos perfis gerados no SMC que a partir dessas informações e por ajuste de quadrados mínimos permitiu o cálculo do diâmetro mediano do sedimento (Dean, 1977).

Após determinar os parâmetros citados, o transporte de sedimentos foi realizado a partir da utilização da equação proposta em Bayram *et al.* (2007) com a calibração proposta em Milhomens *et al.* (2013), configuração que segundo Araújo *et al.* (2015) é a mais adequada para esse o tipo de aplicação adotada.

## 3.3 Análise de variação volumétrica

A análise de variação volumétrica se baseou no emprego de fundamentos geométricos para modelagem tridimensional da área de estudo entre 1984 e 2014. Essa análise foi realizada a partir de informações coletadas da análise multitemporal realizada no DSAS e da etapa de transporte de sedimentos realizada no SMC e ocorreu ao longo de cinco etapas (Figura 3.14): *(i)* Análise da amplitude de variação da linha de praia, pontos de interesse e perfis utilizados no transporte de sedimento; *(ii)* Geração de superfícies bidimensionais; *(iii)* Geração de superfícies tridimensionais e *(iv)* Subtração de superfícies.





# 3.3.1 Análise da amplitude de variação da linha de praia, pontos de interesse e perfis utilizados no transporte de sedimento

A primeira etapa da Análise de variação volumétrica consistiu na análise dos produtos gerados pelo DSAS e SMC-Brasil. Essa análise permitiu definir os quatro elementos vetoriais necessários: Linha de praia máxima, Linha de praia mínima, Limites superior e Limite inferior.

Os limites inferior e superior constituem linhas paralelas à costa que foram definidas a partir dos Pontos de Interesse (POI) e perfis gerados para modelagem do transporte de sedimentos no SMC. O limite inferior se localiza no continente enquanto que o limite superior se localiza no oceano, na parte mais distante da costa. Similarmente, as linhas de praia máxima

e mínima também foram obtidas a partir de análises prévias, no caso, da amplitude de variação de linha de praia (SCE) disponíveis no DSAS. Essa obtenção ocorreu ao longo dos 121 transectos e considerou as linhas de praia mais próximas e mais distantes da linha de base, dessa forma fornecendo duas linhas de praias novas que contém os limites máximo e mínimo da amplitude de variação

# 3.3.2 Geração de superfícies bidimensionais máxima e mínima

Após criar os elementos vetoriais necessários, foi necessário integrar essas informações. Para isso, se utilizou o *Spatial Analyst*, ferramenta disponível no ArcGIS. Com a utilização dessa ferramenta foram formadas duas superfícies bidimensionais da área de estudo que representaram a evolução da área entre 1984 e 2014.

# 3.3.3 Geração de Superfícies tridimensionais máxima e mínima

Nessa etapa (Figura 3.15), se integrou, junto as superfícies bidimensionais, informações batimétricas obtidas da carta náutica 810 da marinha do Brasil. Inicialmente, todos os elementos vetoriais foram transformados em pontos de espaçamento de 100 m e em seguida, novamente com o uso do *Spatial Analyst*, esses pontos foram utilizados para atribuir informações batimétricas a cada um dos elementos criados. Ao limite inferior foi atribuído um valor constante positivo, para o limite superior foram atribuídas informações batimétricas retiradas da carta náutica 810 e para as linhas de praia se atribuiu o valor 0, já que essas representam a transição terra-mar.



Figura 3.15- Procedimentos adotados para transformação de linhas em superfície 3D. Fonte: Elaborada pelo autor.

Após atribuir valores a cada um dos pontos gerados, novamente se utilizou a ferramenta *Spatial Analist* para criação de um Modelo Digital de Terreno (MDT), que permitiu a obtenção de dois cenários da área estudada, um referente ao cenário de maior recuo da linha de praia e outro referente ao cenário com maior avanço da linha de praia.

## 3.3.4 Subtração de superfícies

Como última etapa, as superfícies tridimensionais foram subtraídas uma da outra, gerando uma terceira superfície com a diferença volumétrica entre ambos. Esse volume foi então dividido pelo tempo total da análise e gerou a taxa de transporte anual da área de 1984 a 2014.

# 4 **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A análise da evolução costeira na área de estudo foi dividida em cinco tópicos: (*i*) Análise Geral (*ii*) Evolução da linha de praia; (*iii*) Clima de ondas e correntes; (*iv*) Transporte de sedimentos e (*v*) Análise de variação volumétrica. Cada uma desses tópicos descreveu ou identificou diferentes características observadas na área de estudo ao longo do tempo, fornecendo assim informações que permitiram a visualização da evolução da costa nas praias de Muriú e Jacumã.

O primeiro tópico apresentou um resumo de todos os resultados obtidos no presente estudo referentes à Evolução da linha de praia, clima de ondas em águas rasas e correntes.

Após realizar a análise geral dos resultados, cada um deles foi analisado de forma detalhada, incluindo o transporte de sedimentos e variação volumétrica.

O segundo tópico se iniciou com a apresentação dos parâmetros utilizados no DSAS e em seguida foram apresentadas quatro análises diferentes (1984 a 1994; 1994 a 2004; 2004 a 2014 e 1984 a 2014), que permitiram a visualização das modificações ocorridas na área de estudo ao longo das décadas.

O terceiro segundo tópico mostrou inicialmente o resultado das análises iniciais do SMC-Brasil (Clima de ondas em águas intermediárias, escolha do ponto DOW, e definição das malhas de propagação) e em seguida foi apresentado o clima de ondas em águas rasas e correntes para cada malha de propagação que foram analisadas em conjunto abordando os parâmetros de onda (altura e direção) e de correntes (velocidade e direção).

O quarto tópico apresentou os parâmetros dos pontos de interesse (POI), dos perfis utilizados para modelagem do transporte de sedimentos e por fim o transporte médio anual de sedimentos na área de estudo. Por fim, o quinto tópico apresentou o resultado da aplicação da análise da variação volumétrica, fazendo comparações com os outros resultados.

# 4.1 Análise geral

Nesse tópico se apresentou um resumo de todos os resultados referentes à Evolução da linha de praia, Clima de ondas em águas e correntes.

# 4.1.1 **Evolução da linha de praia**

Em relação à evolução da linha de praia (Tabela 4.1), se observou que a área de estudo apresenta variação da linha de praia média de 0,5 m/ano, amplitude de variação média de 32 m e mobilidade média de -20 m entre os anos de 1984 e 2014, que variam quando separadas em análises década a década.

Período analisado	Variação da LP	Amplitude de variação	Mobilidade da LP
	50% estável	62% alta	60% moderada negativa
1984 a 1994	46% erosão baixa	26% moderada	26% alta negativa
	Média: -2,1 m/ano	Média de 20 m	Média de -20 m
	74% estável	57% moderada	50% moderada positiva
1994 a 2004	21% baixa deposição	18% alta	17% alta positiva
	Média de 1,4 m/ano	Média de 18 m	Média de 14 m
	68% estável	45% moderada	30% alta negativa
2004 a 2014	29% erosão baixa	30% alta	26% moderada negativa
	Média de -1,4 m/ano	Média de -17 m	Média de -15 m
	96% estável	55% alta	38% moderada negativa
1984 a 2014	3% erosão baixa	42% moderada	36% alta negativa
	Média de -0,5 m/ano	Média de 32 m	Média de -20 m

Tabela 4.1 – Análise	geral da l	Evolução da	linha de praia.	LP = Linha de Praia.

# 4.1.2 Clima de ondas em águas rasas e correntes

A análise das ondas (Tabela 4.2) mostrou que, na área analisada, as ondas apresentam variação de altura de 2,0 a 4,0 m e tendem a se direcionar para Leste, Nordeste e Sudeste ao se aproximarem da costa.

Malha a Dagima	Nevel de moré	Mud	Mudanças de direção			
Maina e Regime	Nivel de mare	Área A	Área B	Área C	(máx)	
1 . 1 .	Baixa	-	E, SE	E, NE, SE	3,5 m	
Tempestade	Média	-	E, SE	E, NE, SE	3,5 m	
Tempestade	Alta	-	E, SE	E, NE, SE	3,5 m	
1 4 1 4	Baixa	-	E, SE	E, NE, SE	2,0 m	
leste-nordeste Mádio	Média	-	E, SE	Е	2,0 m	
Wiedio	io Média - Alta - te Baixa - stade Alta - te Baixa - te Alta - te Alta - te Alta - Alta - Alta -	E, SE	Е	2,0 m		
T (	Baixa	-	NE, SE	NE, SE	3,5 m	
Leste	Média	-	NE, SE	NE, SE	4,0 m	
Tempestade	Alta	-	NE, SE	NE, SE	4,0 m	
T (	Baixa	-	NE, SE	NE, SE	2,0 m	
Leste Mádio	Média	-	NE, SE	NE, SE	2,0 m	
Médio	Alta	-	NE, SE	NE, SE	2,0 m	
1 4 1 4	Baixa	Е	E, NE, SE	E, NE	4,0 m	
leste-sudeste Tempestade	Média	Е	E, NE, SE	E, NE	4,0 m	
rempestade	Alta	Е	E, NE, SE	E, NE	4,0 m	
leste mileste	Baixa	Е	E, NE, SE	E, NE	2,0 m	
leste-sudeste Médio	Média	Е	E, NE, SE	E, NE	2,0 m	
Wiedio	Alta	Е	Е	Е	2,0 m	
an de ste	Baixa	Е	Е	Е	3,0 m	
Sudesie	Média	Е	Е	Е	3,0 m	
Tempestade	Alta	Е	Е	Е	3,5 m	
andeste	Baixa-mar	Е	Е	Е	2,0 m	
sudeste Médio	Maré média	Е	Е	Е	2,5 m	
Medio	Maré alta	Е	Е	Е	2,5 m	

Tabela 4.2 – Análise geral do clima de ondas.

Quanto às correntes (Tabela 4.3), essas mostraram, em geral, velocidade máxima com variação entre 0,2 e 0,6 m/s com o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste e em menor expressão correntes de direção sudeste e sudoeste.

Malha e	Nível de	Dire	Velocidade		
Regime	maré	Área A	Área B	Área C	(máx)
lasta nondasta	Baixa	NW, SW	NW	NE, SW	0,3 m/s
Tempestade	Média	NE, SW	NW	NE,SW	0,4 m/s
Tempestade	Alta	NE, NW	NE, SE	NE, SE, SW	0,5 m/s
lasta nondasta	Baixa	SW	NW	NE, SW	0,3 m/s
Médio	Média	NE, SW	NE, NW	NE, SW	0,2 m/s
Wiedio	Alta	NE, SE	NE	SE, SW	0,3 m/s
Lasta	Baixa	NW, SW	NW	NE, SW	0,5 m/s
Tempestade	Média	NE, NW	NE, NW	NE, SE, SW	0,4 m/s
	Alta	NE, NW	NE, NW	NW, SE, SW	0,4 m/s
T (	Baixa	-	NW	NE, NW, SE	0,4 m/s
Leste	Média	NE	NW	NE, SE, SW	0,2 m/s
Wiedio	Alta	NE	NE	SE, SW	0,4 m/s
lasta sudasta	Baixa	NW	NW	NE, NW	0,3 m/s
Tempestade	Média	NW	NW	NE, NW	0,3 m/s
Tempestade	Alta	NE, NW	NE, NW	NE, NW	0,5 m/s
lasta sudasta	Baixa	NW	NW	NW, SE	0,3 m/s
Médio	Média	NE,NW	NE, NW	NW, SE	0,3 m/s
Wiedlo	Alta	NE,NW	NE	NE, NW	0,4 m/s
audaata	Baixa	NW	NW	NE, NW, SW	0,5 m/s
Tempestade	Média	NW	NE, NW	NE, NW, SW	0,4 m/s
Tempestade	Alta	NW	NE, NW	NW, SW	0,6 m/s
audaata	Baixa-mar	NW	NW	NW	0,3 m/s
Médio	Maré média	NW	NE, NW	NW, SW	0,3 m/s
Medio	Maré alta	NE, NW	NE	NW, SW	0,4 m/s

Tabela 4.3 – Análise geral das correntes.

Também foi observado que a variação da direção das ondas e correntes nas praias de Jacumã e Muriú ocorrem, possivelmente, em função do contorno do litoral que é obliquo na praia de Muriú e perpendicular na praia de Jacumã, das diferentes feições de fundo e da variação da cota batimétrica ao longo da área.

# 4.2 Evolução da linha de praia

Nesse tópico foram apresentados os resultados das análises realizadas no DSAS, inicialmente foi mostrado a disposição dos elementos básicos do DSAS e em seguida, cada uma

das quatros análises foi descrita individualmente. Por fim, foi feita uma comparação com os estudos anteriores, realizados na praia de Ponta Negra.

# 4.2.1 Elementos básicos do DSAS

Os elementos de entrada do DSAS (Figura 4.1) totalizaram: uma linha de base, com comprimento de 12 km, que cobre toda a área estudada; 121 transectos, com espaçamento de 100 m e disposto a um ângulo de aproximadamente 90° das linhas de praias e quatro linhas de praia, que representam quatro décadas diferentes (1984, 1994, 2004 e 2014) obtidas por meio da vetorização de imagens de satélite da série Landsat.



Figura 4.1 – Elementos utilizados no DSAS (Linha de base, Transectos e Linhas de praias), ao todo foram definidos uma linha de base, 121 transectos (espaçamento de 100 m) e 4 linhas de praias (1984, 1994, 2004, 2014) que permitiram a análise da evolução da linha de praia entre 1984 e 2014. Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.2.2 Evolução da linha de praia entre 1984 e 1994

No período de 1984 a 1994 (Figura 4.2), a partir da análise do EPR, observou-se uma média na taxa de variação de -2,1 m/ano onde 60 transectos (50% do total) da área apresentaram relativa estabilidade, 56 transectos (46% do total) apresentaram erosão baixa (-2,0 a -5,0 m/ano), dois transectos (2% do total) mostraram erosão moderada e que em dois transectos (2% do total) constatou-se erosão alta (< -10 m/ano).



Figura 4.2 - Análise da evolução da linha de praia no período de 1984 a 1994. Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto ao SCE, 15 transectos (12% do total) apresentaram amplitude de variação baixa (0 a 5,0 m), 75 transectos (62% do total) apresentaram entre 5,0 e 25,0 m de variação e 31 transectos (26% do total) apresentaram alta amplitude de variação (> 25 m), novamente mostrando que a área é instável (média de 20,2 m).

Quanto ao NSM, com média de -19,5 m, constatou-se que 31 transectos (26% do total) apresentaram alta mobilidade negativa, 72 transectos (60% do total) exibiram entre -5,0 e -25,0 m de mobilidade, 15 transectos (12% do total) têm baixa mobilidade negativa e três transectos (2% do total) apresentam moderada mobilidade positiva.

Portanto, no período constatou-se a presença de processos erosivos que levaram ao recuo da linha de praia em direção ao continente. Aproximadamente 50% da área mostrou uma taxa de variação da linha de praia com valores inferiores a -2,0 m/ano enquanto que os outros 50% mostraram uma média de -0,9 m/ano.

# 4.2.3 Evolução da linha de praia entre 1994 e 2004

No período de 1994 a 2004 (Figura 4.3), o EPR apresentou média de 1,4 m/ano. Ao longo da área dois transectos (2% do total) apresentaram alta deposição (>10 m/ano), um transecto mostrou deposição moderada (1% do total), 26 transectos exibiram baixa deposição (21% do total), 90 transectos (74% do total) apresentaram-se estáveis, um transecto (1% do total) exibiu baixa erosão e um transecto (1% do total) exibiu moderada erosão.



Figura 4.3 - Análise da evolução da linha de praia no período de 1994 a 2004. Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto ao SCE, com média de 17,8 m, 30 transectos (25% do total) mostraram baixa amplitude de variação, 69 transectos (57% do total) apresentaram amplitude entre 5,0 e 25,0 m e 22 transectos (18% do total) apresentaram alta amplitude de variação.

Em relação ao NSM, que apresentou média de 14,4 m, foram observados dois transectos (2% do total) com mobilidade entre -25,0 e -5,0 m, 9 transectos (7% do total) com mobilidade moderada, 30 transectos (25% do total) com mobilidade baixa, 60 transectos (50% do total) com mobilidade moderada positiva e 20 transectos (17% do total) dos transectos com alta mobilidade positiva (>25 m).

Portanto, o período de 1994 a 2004 teve como caraterística principal a estabilidade de algumas áreas (média de +0,7 m/ano) e deposição de sedimentos que juntas totalizaram aproximadamente 92% do total dos transectos.

# 4.2.4 Evolução da linha de praia entre 2004 e 2014

No período de 2004 a 2014 (Figura 4.4), foi observado uma taxa de variação da linha de praia de média de -1,4 m/ano, nesse intervalo 82 dos transectos (68% do total) mostraram relativa estabilidade, 35 dos transectos (29% do total) mostraram variação entre -5,0 e -2,0 m/ano e quatro dos transectos (3% do total) mostraram moderada erosão (-10,0 a -5,0 m/ano).





Quanto ao SCE observou-se 31 dos transectos (26% do total) com amplitude de variação de até 5,0 m, 54 dos transectos (45% do total) com amplitude de variação moderada e 36 dos transectos (30% do total) dos transectos com alta amplitude de variação, valores mais próximos

ao período anterior. Nesse período o SCE apresentou em média de 17,3 m de amplitude de variação.

Em relação ao NSM, observou maior mobilidade negativa (média de -14,7 m). Dos 121 transectos, 36 (30% do total) exibiram valores inferiores a -25,0 m de mobilidade, 42 (26% do total) mostraram mobilidade entre -25,0 e -5,0 m, 31 (36%) apresentaram baixa mobilidade e 12 (10%) exibiram entre 5,0 e 25,0 m de mobilidade.

No período entre 2004 e 2014 houve maior incidência de processos erosivos no trecho estudado. Apesar disso, diversamente do período entre 1984 e 1994, observou-se uma menor intensidade desses processos refletidos em valores menores de amplitude de variação e mobilidade da linha de praia.

# 4.2.5 Evolução da linha de praia entre 1984 e 2014

A análise multitemporal completa entre os anos de 1984 a 2014 foi apresentada na Figura 4.5 e descreveu a variação da linha de praia (LRR) com média de -0,5 m/ano, na qual 116 transectos (96% do total) indicaram estabilidade (-2,0 a 2,0 m/ano), quatro transectos (3% do total) apresentaram erosão baixa (-5,0 a -2,0 m/ano) e um transecto (1% do total) apresentou deposição baixa (2,0 a 5,0 m/ano).



Figura 4.5 - Análise da evolução da linha de praia no período completo entre os anos de 1984 a 2014. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa análise, devido a utilização da regressão linear ainda foram calculados o LR2 e LCI que indicaram a incidência tanto de processos de erosão como de deposição. O LR2, apresentou uma média de 0,4 enquanto que o LCI apresentou média de 2,68 m considerando o índice de confiança de 95,4% ( $2\sigma$ ), mostrando assim uma não-linearidade dos processos incidentes na área.

Em contraste ao LRR, os valores de SCE para todo o período mostraram grande variação (média de 31,9 m), 67 transectos (55% do total) apresentaram amplitude de variação superior a 25,0 m, característica pertinente em áreas instáveis, 51 transectos apresentaram entre 5,0 e 25,0 m de amplitude de variação (42% do total) e apenas três transectos (3% do total) apresentaram variação entre 0 e 5,0 m durante o período analisado.

Quanto ao NSM, que apresentou média de -19,8 m de mobilidade, foi constatado que 43 transectos (36% do total) apresentaram mobilidade inferiores a -25,0 m, 46 transectos (38% do total) apresentaram mobilidade entre -5,0 e -25,0 m, 26 transectos (21% do total) mostraram mobilidade entre 5,0 e -5,0 m, cinco transectos (4% do total) mostraram mobilidade entre 5,0 e 25,0 m e um transecto (1% do total) apresentou valores superiores a 25,0 m de mobilidade.

Assim, a partir da leitura do LRR foi observado a estabilidade na linha de praia com variações entre -2,0 e 2,0 m por ano. No entanto, os resultados de NSM e SCE mostram que a área apresenta alta instabilidade, com eventos alternados de erosão e deposição.

# 4.2.6 Comparação com estudos anteriores

Os resultados obtidos foram comparados aos estudos previamente realizados na praia de Ponta Negra, localizada ao sul da área na capital do estado Natal (Busman *et al.*, 2013; Amaro *et al.*, 2014; Scudelari *et al.*, 2016).

Tais estudos, que abordaram o período compreendido entre os anos de 1976 e 2012, apresentam similaridades na metodologia empregada, utilizando imagens de satélite com parâmetros semelhantes ao do presente estudo. Além disso, a praia de Ponta Negra apresenta características compatíveis com as praias de Muriú e Jacumã, com aspectos geológicos, ecológicos e padrão ocupacional que podem ser correlacionados aos observados na área de estudo desse trabalho.

Para uma comparação de maior acurácia, os períodos comparados em ambas as praias foram o período entre 1984 e 2014 nas praias de Muriú e Jacumã e o período de 1986 e 2012 na praia de Ponta Negra, constituindo assim 30 anos de evolução da linha de praia com informações de quatro diferentes décadas. Ambas as áreas mostraram semelhanças nas taxas de variação, amplitude e mobilidade da linha de praia com Ponta Negra mostrando uma maior tendência erosiva que foi melhor evidenciada nas análises fracionadas. Ponta Negra se apresentou estável no período de 1986 a 1994 e posteriormente passou a apresentar um aumento crescente nos processos erosivos evidenciados entre 1994 e 2004 e 2004 e 2012. As praias de Muriú e Jacumã, em contrapartida, mostraram uma alternância de episódios erosivos e de deposição a cada dez anos, apresentando um período erosivo entre 1984 e 1994, um período de deposição entre 1994 e 2004 e outro período de erosão entre 2004 e 2014.

Quanto as causas dos processos de erosão e deposição em ambas as áreas e os diferentes ciclos sedimentares apresentados, essas são atribuídas em parte às causas naturais como a dinâmica costeira, morfodinâmica praial e fisiografia costeira e em parte por fatores antrópicos como a urbanização da orla e da planície costeira que ocorreu de forma desordenada. Além disso existe também a possível influência das mudanças climáticas e no nível relativo do mar bem como de fatores tectônicos, sendo necessários estudos complementares quanto a esses aspectos.

Relacionado as diferenças observadas em ambas as praias, notoriamente, a praia de Ponta Negra apresenta uma pressão ocupacional mais elevada do que as praias de Jacumã e Muriú, constituído originalmente por vilas de pescadores e em seguida por residências de veraneio (segundas residências), o que pode ser uma das razões para as variações na intensidade dos processos erosivos observadas.

# 4.3 Clima de ondas em águas rasas e correntes

Esse tópico abordou inicialmente, as análises do clima de ondas em águas intermediárias, definição dos pontos DOW e malhas de propagação e em seguida foi feita a análise do clima de ondas e correntes, que foi realizada em cada uma das quatro malhas de propagação e consistiu na observação dos parâmetros das ondas (altura e direção) e das correntes (velocidade e direção) nos regimes médio e de tempestade e nos níveis de maré baixa, média e alta.

Em cada análise, três áreas denominadas A, B e C foram separadas tendo em vista as diferenças na cota batimétrica (Área A) e das feições de fundo (Áreas B e C). A área A está localizada na parte superior da praia de Muriú e foi selecionada tendo em vista o declive mais suave que contrasta com as áreas B e C. A área B está localizada na parte inferior da praia de Muriú, próximo ao limite com a praia de Jacumã e foi caracterizada tendo em vista as feições

de fundo encontradas entre 2,0 e 3,0 km da costa. A área C é encontrada na porção central da praia de Jacumã e foi selecionada tendo em vista as feições de fundo identificadas próximos ao litoral. Essas áreas não são exatamente fixas e por isso apresentam pequenas variações em seu posicionamento geográfico que foi determinado considerando a visualização do resultado de cada uma das malhas de propagação.

# 4.3.1 Clima de ondas em águas intermediárias

A partir dos parâmetros definidos foram selecionados 15 pontos DOW (Figura 4.6) para análise estatística, sendo desses 12 pontos alinhados verticalmente com profundidade entre 16,4 e 19,8 m e três alinhados horizontalmente com profundidade entre 15,4 e 18,4 m. A localização de todos os pontos está disposta na Tabela 4.4, assim como as respectivas profundidades de cada ponto.



Figura 4.6 – Pontos DOW selecionados para análise estatística. Fonte: Elaborada pelo autor.

Ponto	Longitude	Latitude	Cota
P1	-35,120	-5,516	18,79
P2	-35,120	-5,525	18,89
P3	-35,120	-5,534	19,17
P4	-35,120	-5,543	18,40
P5	-35,120	-5,552	18,64
P6	-35,120	-5,561	19,78
P7	-35,130	-5,570	16,85
P8	-35,120	-5,579	19,13
P9	-35,120	-5,588	17,90
P10	-35,120	-5,597	19,08
P11	-35,120	-5,606	19,12
P12	-35,120	-5,615	16,44
PA	-35,139	-5,570	15,41
PB	-35,093	-5,570	18,41
PC	-35,075	-5,570	15,89

Tabela 4.4 - Localização e cota batimétrica dos pontos DOW.

A partir da análise dos parâmetros de ondas desses 15 pontos foram selecionados os três pontos (Tabela 4.5) com maior altura de onda e período em relação aos demais pontos que foram então comparados entre si priorizando as ondas com maior probabilidade de ocorrência (Direção leste-sudeste).

Pontos	Direções	Probabilidade	H\$50%(m)	Hs <sub>12</sub> (m)	Tp50%(s)	<b>Tp</b> <sub>12</sub> ( <b>s</b> )
	NE	0,2%	1,23	1,73	10,16	17,03
	ENE	3,2%	1,36	2,36	9,51	18,14
P1	E	21,8%	1,43	2,31	7,98	16,19
	ESE	71,4%	1,55	2,53	7,83	12,19
	SE	3,5%	1,58	2,44	7,04	11,39
	NE	0,2%	1,21	1,70	10,19	16,88
	ENE	2,7%	1,35	2,35	9,50	18,28
P2	Е	20,7%	1,42	2,30	7,73	16,45
	ESE	73,1%	1,56	2,60	7,62	12,20
	SE	3,3%	1,59	2,48	6,99	11,56
	NE	0,1%	1,19	1,65	9,68	14,79
	ENE	2,4%	1,33	2,37	9,30	18,27
<b>P3</b>	Е	19,9%	1,42	2,34	7,85	16,48
	ESE	74,7%	1,57	2,70	7,82	12,24
	SE	2,9%	1,59	2,43	7,20	11,86

Tabela 4.5 – Pontos selecionados para análise de maior detalhe com destaque as ondas de direção Leste-Sudeste que apresentaram mais de 70% da frequência das ondas na área de estudo.

Dentre os pontos selecionados o ponto P3 apresentou maior frequência das ondas de direção leste-sudeste (74,7%), maior altura de onda em regime médio (1,57 m) e em regime de tempestade (2,70 m), segundo maior período de onda em regime médio (7,82 s) e maior período de onda em regime de tempestade (12,24 s) dessa forma apresentando maior capacidade energética para transporte de sedimento ao se considerar a equação da energia, sendo seus parâmetros então utilizados para as demais etapas desse trabalho.

# 4.3.2 Malhas de propagação

Após selecionar o ponto DOW para área de estudo, as malhas de propagação (Tabela 4.6) foram criadas. As ondas de direção Nordeste não foram utilizadas já que essas apresentaram menos de 1% de probabilidade de ocorrência.

Malha	Origem (m)		Dimongõog (m)	Egnacomente	$\mathbf{D}_{\mathbf{u}}\mathbf{m}_{0}$	
Iviama	Longitude	Latitude	Dimensoes (m)	Espaçamento	Kullio ( )	
LESTE- NORDESTE	-35,139	-5,458	16750 x 14000	25 x 25	-157,5	
LESTE	-35,127	-5,504	17000 x 13750	25 x 25	180	
LESTE- SUDESTE	-35,119	-5,548	17500 x 12000	25 x 25	157,5	
SUDESTE	-35,124	-5,591	17000 x 11500	25 x 25	135	

Tabela 4.6 - Conjunto de malhas criadas no SMC-Brasil para propagação de ondas e correntes.

As malhas foram criadas tendo em vista a cota e o posicionamento geográfico do ponto DOW escolhido (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Disposição das malhas de propagação e do ponto DOW na área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dessas quatro malhas, considerando os regimes médio e de tempestade e os níveis de maré baixa, média e alta foram gerados 24 casos (Tabela 4.7) que foram analisados individualmente.

Casos	Direção	Hs	Тр	Fp=1/Tp	Maré	Regime
1	ENE	1,33	9,30	0,11	0,00	Médio
2	Е	1,42	7,85	0,13	0,00	Médio
3	ESE	1,57	7,82	0,13	0,00	Médio
4	SE	1,59	7,20	0,14	0,00	Médio
5	ENE	2,37	18,27	0,05	0,00	Tempestade
6	E	2,34	16,48	0,06	0,00	Tempestade
7	ESE	2,70	12,24	0,08	0,00	Tempestade
8	SE	2,43	11,86	0,08	0,00	Tempestade
9	ENE	1,33	9,30	0,11	1,35	Médio
10	Е	1,42	7,85	0,13	1,35	Médio
11	ESE	1,57	7,82	0,13	1,35	Médio
12	SE	1,59	7,20	0,14	1,35	Médio
13	ENE	2,37	18,27	0,05	1,35	Tempestade
14	E	2,34	16,48	0,06	1,35	Tempestade
15	ESE	2,70	12,24	0,08	1,35	Tempestade
16	SE	2,43	11,86	0,08	1,35	Tempestade
17	ENE	1,33	9,30	0,11	2,80	Médio
18	Е	1,42	7,85	0,13	2,80	Médio
19	ESE	1,57	7,82	0,13	2,80	Médio
20	SE	1,59	7,20	0,14	2,80	Médio
21	ENE	2,37	18,27	0,05	2,80	Tempestade
22	Е	2,34	16,48	0,06	2,80	Tempestade
23	ESE	2,70	12,24	0,08	2,80	Tempestade
24	SE	2,43	11,86	0,08	2,80	Tempestade

Tabela 4.7 – Casos gerados a partir das quatro malhas resultantes da análise do ponto DOW.

# 4.3.3 Malha leste-nordeste

Com uma frequência de 2% a propagação de ondas de direção leste-nordeste mostrou o desenvolvimento de ondas de altura de até 3,5 m de altura e que mantiveram direção constante até se aproximaram da costa onde, em alguns trechos, passaram a ter direção Leste, nordeste e sudeste.

No regime de tempestade, as ondas tiveram altura de até 3,5 m que variaram em função do nível de maré analisado.

Em nível de maré baixa (Figura 4.8), se observou o predomínio de ondas com altura entre 2,0 e 2,5 m. Houve a formação de frentes de ondas com altura entre 2,5 e 3,0 m na região central e Norte e de pequenas áreas com ondas entre 3,0 e 3,5 m de altura que podem ser observadas na área C. A direção das ondas mudou ao se aproximar das regiões mais rasas assumindo direção Leste, nordeste e sudeste.



Figura 4.8 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A, foi observado a perda gradual da altura das ondas devido a declividade mais suave dessa região. As ondas de maior altura (3,0 e 3,5 m) se formaram em regiões mais distantes da costa (6,0 km) em relação as demais áreas.

Na área B, foram observadas variações da altura e direção (Leste e sudeste) das ondas em função das feições de fundo encontradas nessa região. Nesse trecho as ondas começaram a perder altura a uma distância de 3,0 km da costa, mas já próximo do limite entre a praia de Muriú e Jacumã essas ondas se aproximaram mais da costa antes de começarem a perder altura.

Na área C, se constatou a convergência da direção das ondas (Leste, nordeste e noroeste) para a área central da praia de Jacumã seguindo as feições de fundo desse setor. A altura das ondas mudou abruptamente diferentemente das áreas A e B, se observando variações
significativas da altura da onda a menos de 1,0 km da costa. Além disso, foi nessa área que foram observadas as ondas de maior altura (até 3,5 m).

Em nível de maré média (Figura 4.9) houve a predominância de ondas mais baixas (2,5-3,0 m) e em menor escala foram observadas frentes de ondas com altura entre 3,0 e 3,5 m. A posição geográfica dessas frentes foi similar à observada no nível de maré média, mas se notou, principalmente na área A, que essas ondas se aproximaram mais da costa. Assim como a análise anterior se observaram mudanças na direção das ondas, porém mais suaves, em regiões próximas do litoral. Também se observou que a influência da cota batimétrica e de feições de fundo diminuiu em ambas as praias e na área C houve o aumento da formação de ondas de até 3,5 m de altura.



Figura 4.9 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.



No nível de maré alta (Figura 4.10) se observou o predomínio de ondas entre 2,5 e 3,0 m com frentes de ondas chegando a alcançar 3,5 m.

Figura 4.10 – Malha leste-nordeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em geral, houve um aumento na altura das ondas e com isso as ondas de maior altura se aproximaram ainda mais da zona costeira (sendo isso melhor observado na Área B) enquanto que ondas inferiores a 1,5 m de altura ficaram restritas a pequenos trechos. A variação da direção das ondas foi menor do que nas análises anteriores. Nesse nível de maré, as áreas A, B e C passaram a formar ondas com altura entre 3,0 e 3,5 m e a cota batimétrica e feições de fundo passaram a afetar ainda menos a direção das ondas, sendo essa influência mais evidente nas Áreas B e C. No regime médio, predominaram ondas de altura de 1,0 a 1,5 m de altura e pequenas frentes de onda que chegaram a 2,0 m em determinadas áreas. A direção das ondas seguiu o mesmo padrão observado no regime de tempestade, porém foram observadas diferenças significativas ao longo dos diferentes níveis de marés.

Considerando o nível de maré baixa (Figura 4.11) foram observadas pequenas frentes de onda com 1,5 a 2,0 metros de altura que se formaram a menos de 3,0 km da costa. As variações na altura e direção das ondas foram menores do que na análise do regime de tempestade.



Figura 4.11 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.
Na área A, comparado as áreas B e C as ondas apresentaram menor variação na altura e na direção de onda que permaneceu leste-nordeste até a costa. Em B, as alterações na altura e direção de ondas causadas pelas feições de fundo presentes nesse setor continuaram a ser

observadas com ondas se inclinando para Leste e sudeste nessa área. Nesse nível de maré também houve a formação de frentes de ondas de até 2,0 m de altura em alguns pontos. Na área C se observou a influência das feições de fundo no controle da direção e altura de ondas além da formação mais expressiva de frentes de ondas de até 2,0 m. As ondas nessa área convergiram para o centro da praia de Muriú onde assumiram direção Leste, nordeste e sudeste.

Em nível de maré média (Figura 4.12), as ondas alcançaram até 2,0 m de altura, mas em geral apresentaram altura entre 1,0 e 1,5 m, além disso as feições de fundo afetaram menos a altura da onda, assim como visto nas análises anteriores.



Figura 4.12 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A não houve mudanças significativas com o predomínio de ondas de até 1,5 m que perderam altura a se aproximarem da costa. Quanto a B, as frentes de ondas de até 2 m de altura se formaram mais próximos a costa e o redirecionamento das ondas para Leste e sudeste continuou a ocorrer. Em relação a C, a direção e altura das ondas também foram menos afetados pelas feições de fundo e com isso se observou uma menor variação na direção das ondas, que ocorreu principalmente para Leste. Mais uma vez essa área conteve as maiores frentes de ondas com altura entre 1,5 e 2,0 m.

Em nível de maré alta (Figura 4.13) houve a formação de ondas entre 1,0 e 2,0 m e uma pequena porção de ondas entre 0,5 e 1,0 m. A direção das ondas variou, mas com menor intensidade do que nas outras análises.



Figura 4.13 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.
A área A apresentou ondas com altura entre 1,0 e 1,5 m e algumas ondas de até 2,0 m.
Em relação a B, as ondas inclinaram levemente para Leste e foi observado a formação de ondas com até 2,0 m de altura na porção mais a Norte se aproximando das regiões mais rasas. Quanto

a C, as ondas também se inclinaram levemente para Leste e frentes de ondas com altura entre 1,5 e 2,0 m chegaram a se formar há algumas centenas de metros da costa.

Referente ao estudo das correntes, a malha leste-sudeste apresentou o predomínio de correntes de direção sudoeste que contornam o litoral e apresentam velocidade máxima de 0,5 m/s.

No regime de tempestade foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste e sudoeste com velocidade máxima entre 0,2 e 0,5 m/s. Nas áreas B e C se observou o direcionamento das correntes pelas feições de fundo e foram detectadas uma maior velocidade das correntes nessas áreas.

No nível de maré baixa (Figura 4.14) predominaram as correntes de direção noroeste (Área B) e sudoeste (Áreas A e C) com velocidade máxima de 0,3 m/s.



Figura 4.14 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A apresentou o predomínio de correntes de direção noroeste e sudoeste. A primeira, observada até a cota de 3 m, contornando a costa e favorecendo o transporte de sedimento do Norte para Sul da praia de Muriú e a segunda, em cotas inferiores a 3 m.

Na área B, se observou o aumento da velocidade das correntes com direção noroeste que favorecem o transporte do sedimento de Sul para Norte na praia de Muriú.

Na área C, houve o predomínio de correntes de direção nordeste e sudoeste, que favorecem o carreamento do sedimento da região central da praia de Jacumã para áreas adjacentes à Norte e Sul, aumentando assim a instabilidade nesse trecho.

Foram observadas variações significativas na velocidade e direção das correntes nas áreas mais rasas (cota de até 3,0 m).

No nível de maré média (Figura 4.15), foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste e sudoeste. A velocidade máxima foi de 0,4 m/s e houve uma menor variação de velocidade.



Figura 4.15 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A apresentou o predomínio de correntes de direção nordeste e sudoeste e uma menor variação de velocidade nas correntes.

A área B manteve um padrão similar ao observado na análise anterior apresentando assim como a área A menor variações de velocidade nas correntes.

Na área C foram observado correntes que chegam ao litoral com direção sudoeste e que se dispersam para Sul e Norte onde passam a se direcionar principalmente para nordeste

favorecendo o transporte de sedimento da área central da praia de Jacumã para as áreas adjacentes, principalmente a Norte da praia de Jacumã.

No nível de maré alta (Figura 4.16), as correntes passaram a ter direção preferencial Norte, invertendo a direção do transporte de sedimento nesse nível de maré. A velocidade máxima subiu para 0,5 m/s, e quase não foi observada diferenças de velocidade ao longo da malha.



Figura 4.16 – Malha leste-nordeste, correntes em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse nível de maré, a área A passou a apresentar o predomínio de correntes de direção noroeste e uma variação de velocidade ainda menor.

Na área B, se observa o predomínio de correntes de direção nordeste e sudeste, além disso pode-se observar a presença de um pequeno vórtice de sentido horário que retrabalha o sedimento nesse trecho.

Na área C, é observado o predomínio de correntes de direção nordeste, sudeste e sudoeste, sendo as correntes de sudoeste as que apresentam maior velocidade.

No regime médio, as correntes apresentaram velocidade máxima de até 0,3 m/s havendo novamente o predomínio das correntes de direção nordeste e sudoeste. Nesse regime foi observada uma maior variabilidade na direção das correntes, com diferenças significativas em cada um dos regimes de maré, principalmente nas áreas A e B.

No nível de maré baixa (Figura 4.17), predominaram correntes de direção sudoeste e noroeste, a velocidade das correntes alcançou até 0,3 m/s com as áreas B e C apresentando correntes de maior velocidade.



Figura 4.17 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A as correntes apresentam direção predominante sudoeste e em menor proporção correntes de direção sudeste que contornam a costa e auxiliam o transporte de sedimento do trecho mais a Norte para Sul da praia de Muriú.

Em B foi detectado o predomínio de correntes de direção noroeste que transportam o sedimento desse trecho para a região central da praia de Muriú.

Na praia de Jacumã (Área C) há o predomínio das correntes de direção sudoeste (de maior velocidade) e nordeste. Também foi possível observar que, possivelmente influenciadas pelas feições de fundo dessa área, as correntes são direcionadas para sudoeste e posteriormente se dividem para Sul e Norte onde se direcionam principalmente para nordeste.

No nível de maré média (Figura 4.18), foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste. A velocidade máxima alcançou apenas 0,2 m/s e, assim como no regime de tempestade, houve em geral uma menor variação de velocidade ao longo da área analisada, provavelmente causada pelo aumento no nível de maré.



Figura 4.18 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A, se observou a formação de correntes de direção nordeste, noroeste, Sul e sudoeste sendo as correntes mais predominantes as de direção nordeste e sudoeste.

Em B, se observou o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste e uma menor variação da velocidade das correntes nesse nível de maré.

Na área C, houve mais uma vez o predomínio de ondas de direção nordeste e sudoeste e em menor expressão foram observadas correntes de direção sudeste.

No nível de maré alta (Figura 4.19), as correntes apresentaram direção preferencial nordeste e sudeste e velocidade máxima de 0,3 m/s com pequena variação de velocidade ao longo da área.



Figura 4.19 – Malha leste-nordeste, correntes em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas áreas A e B, se observou a formação de correntes de direção nordeste, sudeste e sudoeste com o predomínio das correntes de direção nordeste e sudeste na área A e das correntes de direção nordeste na área. Na área C, foi observado o mesmo padrão das outras análises com correntes chegando ao litoral com direção sudoeste que se dividem para Norte e para Sul. Nesse nível de maré predominaram as correntes de direção sudeste e sudoeste.

## 4.3.4 Malha Leste

A malha Leste correspondeu a 20% da frequência das ondas na área de estudo e demonstrou em regime de tempestade altura de onda de até 4,0 m de altura. Quanto à direção, as ondas de Leste assumiram em alguns trechos direções sudeste e nordeste.

Em nível de baixa-mar (Figura 4.20) foram constatadas ondas de até 3,5 m de altura, que se concentraram principalmente nas regiões centrais da praia de Muriú e Jacumã. Mais uma vez foram observadas variações significativas em função da batimetria da área (A, B e C), que direcionaram as ondas e determinaram o quão rapidamente essas ondas interagiram com o fundo perdendo assim altura.



Figura 4.20 – Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A, foi observado que as ondas chegam com altura de 3,0 m e à medida que se aproximam do litoral vão perdendo altura gradativamente, configuração essa diferente das áreas B e C onde as ondas perderam altura de forma mais abrupta. Nas áreas B e C, áreas com feições de fundo, se observou que as ondas de maior altura se aproximaram mais da costa em relação a A. Nas áreas B e C, o controle da direção das ondas devido as feições de fundo fizeram as ondas tenderem a assumir a direção sudeste e nordeste, tendo em C uma característica de convergência para a área central da praia de Jacumã. Em nível de maré média (Figura 4.21), foram observadas ondas de maior altura (4,0 m) com frentes de ondas se concentrado no centro das praias de Muriú e Jacumã, de forma semelhante ao observado no nível de maré baixa. Ao longo de toda a área se percebeu que as ondas perderam altura mais próximas da costa, à atingindo com altura de 0,5 a 1,0 m. Em A e C a influência da batimetria e das feições de fundo na altura e direção das ondas foi menor.



Figura 4.21 - Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto ás áreas destacadas, em A se observou uma perda de altura mais lenta em relação a B e C, nas áreas B e C continuou a ocorrer o direcionamento das ondas Leste para sudeste e nordeste e na área C se observou um direcionamento mais suave das ondas, com a formação de frentes de onda de até 4 m, processo não existente no nível de maré baixa. Em nível de maré alta (Figura 4.22), se observou a formação de mais frentes de ondas com altura de até 4 m (B e C). Com esse nível de maré as ondas atingiram o litoral com altura entre 1,5 e 2,0 m e mais uma vez a influência da batimetria se tornou menor, apresentando comportamento semelhante à análise anterior. A influência das feições de fundo foi menor nas áreas B e C fazendo com a inclinação das ondas fosse mais suave do que nas análises anteriores.



Figura 4.22 - Malha Leste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em regime médio a malha Leste apresentou ondas de menor altura (3 m), que se direcionam para nordeste e sudeste quando essas se aproximaram da costa.

Em nível de maré baixo (Figura 4.23), a malha Leste apresentou ondas de até 3 m, mas na maior parte da área foram observadas ondas entre 1,0 e 1,5 m com frentes de ondas locais de até 2 m. O posicionamento geográfico dessas frentes de ondas ocorreu nas regiões centrais das praias de Muriú e Jacumã e diferentemente do que foi observado no regime de tempestade apresentaram menor magnitude.



Figura 4.23 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A é possível observar que houve uma influência menos expressiva da batimetria, apesar disso as ondas de maior altura ainda se apresentam mais distantes (4 km) da costa do que as áreas B e C (2 km). Quanto a direção das ondas, essa não variou, permanecendo na direção Leste até a costa. Quanto à área B foram observadas variações na direção da onda que inclinaram para nordeste e para sudeste nas regiões mais rasas e flutuações na direção das ondas na região onde são encontradas feições de fundo. Em C, de forma semelhante ao observado no regime de tempestade, houve a convergência da direção das ondas para área central da praia de Jacumã e assim como B ondas de maior altura foram observadas em regiões mais próximas a costa.

Em nível de maré média (Figura 4.24), não houve variações na altura de onda e as variações na direção das ondas se tornaram menos expressivas. Foi observada que a formação de ondas entre 1,5 e 2,0 m nas áreas A, B e C ocorreram mais próximas da costa, sendo a área A, a que apresenta maior diferença em relação ao nível de maré baixa (de 4 km para 2 km) e a nas áreas B e C ainda se observou o redirecionamento das ondas para nordeste e sudeste. Mais uma vez com o aumento do nível de maré a influência da batimetria, bem como das feições de fundo foi menor.



Figura 4.24 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em nível de maré alta (Figura 4.25), a altura de onda máxima permaneceu em 3 m, com o predomínio de ondas com 1,0 e 1,5 m de altura e de frentes de onda locais com 1,5 e 2,0 m de altura. A variação da direção da onda foi menor, permanecendo para Leste e se inclinando em alguns pontos para nordeste e sudeste (Áreas B e C). As frentes de ondas de altura de 1,5 a 2,0 m passaram a se formar a menos de 0,5 km da costa e praticamente não se observaram ondas inferiores a 0,5 m de altura.



Figura 4.25 - Malha Leste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Referente ao estudo das correntes, a malha Leste apresentou o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste, a velocidade máxima das correntes variou entre 0,2 e 0,5 m/s.

No regime de tempestade, predominaram as correntes de direção nordeste, noroeste e sudoeste que nesse regime apresentaram pequena variação na velocidade máxima (0,4 a 0,5 m/s).

Em nível de maré baixa (Figura 4.26), houve o predomínio das correntes de direção noroeste e sudoeste e velocidade máxima de 0,5 m/s.



Figura 4.26 - Malha Leste, correntes em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A demonstrou correntes de direção predominante sudoeste (até a cota de 3 m) e noroeste (cotas inferiores a 3 m) e em menor expressão correntes de direção Leste, Oeste e sudoeste. As correntes de direção sudeste e sudoeste nas regiões mais próximas do litoral favorecem o transporte de sedimento da região Norte para região Sul da praia de Muriú.

Em B se observou o predomínio de correntes de direção noroeste (de maior velocidade), mas também foram observadas correntes de direção nordeste nesse setor da praia de Muriú.

Na área C foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste, à Norte da praia de Jacumã e de correntes de direção sudoeste, à Sul da praia de Jacumã.

Em nível de maré média (Figura 4.27), a velocidade máxima das correntes diminuiu para 0,4 m/s e se observou a formação de correntes com direção preferencial nordeste e noroeste, em quase toda a malha de propagação. A variação de velocidade das correntes ficou menor com o aumento do nível de maré assim como observadas na análise da malha lestenordeste.





Na área B, se observou o predomínio das correntes de direção nordeste e noroeste bem como de um pequeno vórtice horário já no limite com a praia de Jacumã.

Em C, o mesmo padrão da análise anterior se repetiu, com parte das correntes se dissipando para nordeste e parte para sudeste, sendo essas últimas mais expressivas.

No nível de maré alta (Figura 4.28), houve o predomínio das correntes de direção nordeste e novamente a velocidade máxima das correntes foi de 0,4 m/s, além disso mais uma vez foi observada uma menor variação da velocidade ao longo da área analisada.





No regime médio, se observou a formação de correntes de direção nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste, havendo o predomínio das correntes de direção nordeste. Nesse regime a velocidade máxima da corrente variou entre 0,2 a 0,5 m/s.

Utilizando o nível de maré baixa (Figura 4.29), as correntes atingiram até 0,4 m/s de velocidade e foi possível observar que as correntes apresentaram direção bastante variável, com o predomínio de correntes de direção noroeste.



Figura 4.29 - Malha Leste, correntes em regime médio e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A não apresentou o predomínio de direção de correntes, apresentando correntes nas direções nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste.

Em B, as correntes apresentaram direção variável entre nordeste e noroeste, sendo as correntes de noroeste as que predominam e apresentam maior velocidade.

Na área C, mais uma vez se observou a presença de correntes de direção noroeste e sudoeste que migram para nordeste e sudeste ao atingirem a costa, esse processo agrava o transporte de sedimentos nesse trecho da praia de Jacumã ao passo que carream sedimentos para áreas adjacentes.



No nível de maré média (Figura 4.30), as correntes tiveram velocidade mais baixa (0,2 m/s) e mostraram diferenças significativas na direção ao longo das áreas A, B e C.

Figura 4.30 - Malha Leste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A se observou que as correntes apresentaram baixa velocidade e direção predominante nordeste, com presença menos expressiva de correntes de direção noroeste e sudoeste.

Em B, as correntes apresentaram direção predominante nordeste que não apresentaram variações significativas na velocidade nessa análise e, em menor expressão, correntes de direção noroeste e sudoeste mais a norte.

Em C, as correntes continuaram chegando com direção sudoeste e ao atingirem a costa passaram a assumir a direção nordeste, noroeste e principalmente sudeste, sendo essas últimas de maior velocidade.

No nível de maré alta (Figura 4.31), a malha de propagação mostrou velocidade máxima de até 0,4 m/s e a exemplo das análises anteriores foram observadas uma menor variação das correntes nesse nível de maré.





Em A, as correntes se apresentaram em sua maioria na direção nordeste, mas foram observadas, de forma significativa, correntes de direção noroeste.

Em B, foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste e em menor expressão correntes de direção sudoeste e noroeste (de maior velocidade).

Na área C, se observou o mesmo padrão observado em toda a malha Leste, com correntes de direção sudoeste que migram para Norte e para Sul ao alcançarem a costa, sendo as correntes de sudeste as mais predominantes nesse nível de maré.

## 4.3.5 Malha leste-sudeste

Com 75% da frequência das ondas incididas na área de estudo a malha leste-sudeste abrangeu ondas com até 4,0 m de altura, onde mais uma vez foi possível observar a influência da batimetria da área, que afetou significativamente as variações de altura e direção das ondas. A ondas propagadas nessa malha tenderam a se direcionar para Leste à medida que se aproximaram da costa.

No regime de tempestade, as ondas alcançaram até 4 m de altura em alguns pontos, sendo as frentes de onda entre 2,5 e 3,5 m as de maior frequência na malha.

No nível de maré baixa (Figura 4.32) se observaram a formação de grandes frentes de onda com altura entre 2,0 e 3,0 m de altura que se formaram a pelo menos 3,0 km da costa.



Figura 4.32 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A se observou que as ondas leste-sudeste começaram a inclinar para Leste assim que alcançam alturas entre 1,5 e 2,0 m. Em B, se observou que a perda de altura das ondas foi mais abrupta do que na área A, e houve o direcionamento das ondas para Leste, nordeste e sudeste. Quanto a C, as ondas também tenderam a se inclinar para Leste, mas diferente das malhas leste- Leste e nordeste e não se observou um controle das feições de fundo no direcionamento dessas ondas.

No nível de maré média (Figura 4.33), a altura máxima das ondas foi igual a análise anterior (4 m) e a as ondas chegaram a costa com maior altura do que no nível de maré baixa.



Figura 4.33 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A foi observado o mesmo padrão da análise anterior, porém a inclinação das ondas para Leste foi mais suave e aconteceu mais próxima da costa, também foi constatado que as frentes de onda se formaram em áreas mais próximas da costa. Similar a A, a área B mostrou uma evolução parecida, a variação na direção foi menor e as frentes de onda de 3,0 a 3,5 m se aproximaram mais da costa. Além disso foram detectadas variações na direção da onda há 2 km da costa onde se encontram feições de fundo. Na área C, as variações de direção das ondas seguiram o mesmo padrão das áreas A e B, se tornando mais suaves.

No nível de maré alta (Figura 4.34), se observou o predomínio de ondas com altura entre 1,5 e 2,5 m e frentes de ondas com altura entre 3,0 a 4,0 m. A inclinação da direção das ondas para Leste permaneceu a mesma, ocorrendo nas regiões mais próximas da costa.



Figura 4.34 - Malha leste-sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A, as ondas passaram a chegar com maior altura enquanto que as mudanças na direção das ondas foram ainda menores. Em B, houve a formação de pequenas frentes de ondas com altura de até 3,5 m e se observou uma menor inclinação na direção das ondas nesse nível de maré. Em C, também se observou a formação de pequenas frentes de ondas com altura de até 3,5 m e a direção das ondas variou muito pouco chegando a tomar a direção Leste apenas em alguns pontos próximos da costa.

Em regime médio, a malha leste-sudeste mostrou a predominância de ondas de altura entre 0,5 e 2,0 m com a formação de ondas de até 4,0 m de altura a Sul da praia de Jacumã. A influência da batimetria nas áreas A, B e C continuaram a ser claras.

No nível de maré baixa (Figura 4.35), as ondas apresentaram altura de até 2,0 m de altura e em vários trechos de ambas as praias as ondas tenderam a se direcionar para Leste.



Figura 4.35 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A se observou o predomínio de ondas de 1,5 m de altura que passaram a se direcionar para Leste, gradativamente, com o aumento da cota batimétrica. Nas áreas B e C frentes de ondas de até 2,0 m se formaram em áreas mais distantes da costa e ao se aproximaram da costa se direcionaram para Leste, nordeste e sudeste (Área B). Em alguns pontos se observou que as ondas quebraram mais longe do litoral.

No nível de maré média (Figura 4.36), a altura das ondas permaneceu a mesma, mas na área A se observou a que as frentes de ondas de 1,5 a 2,0 m se formaram mais próximas à costa enquanto que em B e C essa distância permaneceu a mesma.

Em todas as áreas a inclinação das ondas foi menor e em alguns trechos as ondas tiveram direção Leste ao se aproximar da costa. As áreas B e C ainda apresentaram pequenas variações na direção nas áreas onde há a presença de feições de fundo.



Figura 4.36 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

No nível de maré alto (Figura 4.37), não se observou a influência da batimetria e feições de fundo e houve o predomínio de ondas de altura entre 1,0 e 3,0 m. Quanto a direção, as ondas continuaram a inclinar para Leste, mas em alguns trechos da praia de Jacumã, não houve variação na direção leste-sudeste da malha de propagação. As frentes de ondas perderam altura em cotas altas, já próximas da costa, e se observaram ondas de altura entre 1,5 a 2,0 m a distâncias menores que 500 m da costa.



Figura 4.37 - Malha leste-sudeste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Referente ao estudo das correntes geradas pela propagação da malha leste-sudeste, essas apresentaram velocidade máxima entre 0,3 e 0,5 m/s e tiveram direção preferencial noroeste geralmente seguindo o contorno da costa.

No regime de tempestade, as correntes formadas apresentaram velocidade máxima de 0,5 m/s e direção predominante noroeste. Foram observadas variações significativas em ambas as praias em função da cota batimétrica e das feições de fundo presentes.

Ao considerar o nível de baixa-mar (Figura 4.38), houve o predomínio de correntes de direção noroeste e velocidade máxima de 0,3 m/s que favorecem o transporte de sedimento de Sul para Norte. Essas correntes apresentaram maior velocidade nas regiões mais rasas, até a cota batimétrica de 3 m.



Figura 4.38 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A as correntes apresentaram direção preferencial noroeste que apresenta pequenas inclinações em sua direção à medida que contorna o litoral.

Na área B, foi detectado o predomínio de correntes de direção noroeste que apresentaram maior velocidade e que se localizaram nas áreas mais rasas (cota de até 3 m). Em menor proporção foram detectadas correntes de direção nordeste que formam um pequeno vórtice com sentido horário próximo do limite entre as praias de Muriú e Jacumã. O controle de feições de fundo no direcionamento das correntes em áreas mais distantes da costa (aproximadamente a 2,0 km de distância) é bem claro nessa configuração de propagação das correntes.

A área C, apresentou um padrão de direção mais difuso, com predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste.

No nível de maré média (Figura 4.39) a direção preferencial das correntes para noroeste permaneceu a mesma. A velocidade máxima continuou sendo 0,4 m/s e se observou uma menor variação de velocidade em relação a análise anterior. Também foi detectado que o controle anteriormente exercido pela cota batimétrica e feições de fundo passou a ser menos evidente.



Figura 4.39 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa configuração de modelo as três áreas apresentaram pequenas mudanças em relação à direção (mais notável em C) e variação da velocidade (mais notável na área B) quando comparadas com a análise anterior. Nesse nível de maré foi detectado o predomínio de correntes de direção noroeste (áreas A, B e C) e nordeste (área C).

Ao considerar o nível de maré alta (Figura 4.40), foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste. A velocidade máxima das correntes aumentou para 0,5 m/s ao passo que a variação de velocidade na malha analisada diminuiu ainda mais. Houve também um menor controle das feições de fundo e cota batimétrica nesses parâmetros.



Figura 4.40 - Malha leste-sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A as correntes apresentam direção preferencial nordeste e noroeste, sendo as primeiras observadas mais a Sul e as últimas mais a Norte.

Em B, se observou o predomínio de correntes de direção nordeste nas áreas mais profundas desse setor e de correntes de direção nordeste nas áreas mais rasas próximas ao limite das praias de Muriú e Jacumã. Há ainda a formação de um pequeno vórtice de direção horário também observado na malha Leste.

Em C, assim como nos outros níveis de maré, se observou o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste.

Em regime médio, a malha leste-sudeste apresentou predomínio de correntes de direção noroeste com velocidade máxima de 0,4 m/s. Nessa análise não foram detectadas variações significativas em relação a análise realizada no regime de tempestade.

No nível de maré baixa (Figura 4.41), houve o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste que apresentação até 0,3 m/s de velocidade, foram observadas também pequenas variações na direção das correntes decorrente da interação das correntes com a morfologia costeira.



Figura 4.41 - Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A, houve o predomínio das correntes de direção noroeste e em menor expressão correntes de direção nordeste que apresentaram menor variação de velocidade quando comparada com as áreas B e C.

Na área B, se observou o predomínio das correntes de direção noroeste que adquirem maior velocidade próximos a costa onde apresentam pequenas variações em sua direção
seguindo a morfologia da costa e em menor expressão das correntes de direção nordeste que estão localizadas em áreas mais profundas.

Em C, são observadas correntes de direção nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste, sendo as correntes de direção nordeste e sudeste a que predominam essa área nesse nível de maré.

No nível de maré média (Figura 4.42), as correntes apresentaram poucas variações em relação a direção mantendo a tendência a se direcionar para nordeste e noroeste nas áreas A e B e para noroeste e sudeste na área C.



Figura 4.42- Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

As áreas A e B apresentaram predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste e na área C foram encontradas correntes de direção noroeste e sudeste seguindo o mesmo padrão das análises anteriores. Assim como observado no regime de tempestade o aumento do nível de maré fez com que a variação de velocidade ao longo da malha fosse menor, sendo a área A a mais afetada. As áreas B e C ainda mostraram alguns pontos com maior intensificação da

velocidade das correntes, porém a influência das feições de fundo nesse nível de maré foi menor.

Em nível de maré alta (Figura 4.43), se observou o predomínio das correntes de direção nordeste e noroeste que apresentaram um aumento na velocidade máxima (0,4 m/s) que quase não apresentou variação ao longo da área estudada.



Figura 4.43 - Malha leste-sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A apresentou o predomínio de correntes de direção nordeste (mais a Sul) e noroeste (mais a Norte).

Na área B houve o predomínio de correntes de direção nordeste e se observou a formação de um pequeno vórtice próximo ao limite das praias de Muriú e Jacumã.

Em C, se observou correntes de direção nordeste, noroeste e sudoeste, sendo as correntes de nordeste e noroeste as predominantes.

#### 4.3.6 Malha sudeste

A malha sudeste abrangeu 3% das ondas incididas na área de estudo. Nessa malha constatou-se o desenvolvimento de ondas de altura máxima de 3,5 m e mais uma vez as ondas tenderam a se inclinar para Leste ao se aproximarem das regiões mais rasas.

No regime de tempestade, as ondas propagadas apresentaram altura de até 3,5 m, porém houve o predomínio de ondas menores (2,0 a 2,5 m) que se concentraram em grandes frentes que se estenderam por toda a área.

Em nível de maré baixa (Figura 4.44), se observou a formação de frentes de ondas com altura de 2,0 a 2,5 m e em menor proporção frentes de onda com altura entre 2,5 e 3,0 m. Nesse nível de maré, a batimetria influenciou bastante nos parâmetros da onda, causando variações na altura e direção, principalmente nas áreas mais rasas.



Figura 4.44 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor. 95

Na área A se observou a perda gradual da altura das ondas, bem como da variação na direção das ondas para Leste à medida que a cota batimétrica foi aumentando. Nas áreas B e C foram constatadas mudanças na altura e na direção das ondas (para Leste) em regiões mais próximas da costa. Em C ainda se observou a formação de frentes de ondas com altura de até 3,0 m próximas as regiões mais rasas.

Em nível de maré média (Figura 4.45), se observou o predomínio de ondas com altura entre de 2,0 a 2,5 m e em menor escala foram observadas grandes frentes de ondas com altura de até 3,0 m. Nas áreas A, B e C, as frentes de ondas de maior altura se formaram mais próximas ao litoral enquanto que ondas menores surgiram em apenas alguns trechos específicos. O efeito da batimetria e das feições de fundo teve um efeito menor na área fazendo com que as ondas perdessem altura em cotas batimétricas maiores e tivessem uma menor variação em sua direção.



Figura 4.45 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em nível de maré alta (Figura 4.46), se observou novamente o predomínio de ondas de 2,0 a 2,5 m de altura, mas houve um aumento na altura máxima das ondas para 3,5 m. Mais uma vez as frentes de ondas de maior altura se aproximaram das regiões mais rasas e a formação de ondas de altura entre 0,5 e 1,0 m foram mais restritas. O efeito da batimetria e das feições de fundo ficou ainda menor e as ondas passaram a ter menor inclinação para Leste.



Figura 4.46 - Malha sudeste, ondas em regime de tempestade e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em regime médio, a malha sudeste apresentou altura das ondas de até 2,5 m. A influência das cotas batimétricas principalmente entre a área A e B-C e das feições de fundo nas áreas B e C continuaram a ser claras decaindo com o aumento do nível da maré.

No nível de maré baixa (Figura 4.47), houve o predomínio de ondas de até 1,5 m de altura e e a formação de frentes de onda de 2,0 m de altura que afetaram principalmente as áreas B e C.





Em A, foram observadas variações graduais na altura e direção das ondas à medida que essas ondas se aproximaram da costa. A direção das ondas passou a se inclinar para Leste assim que as ondas alcançaram menos de 1,0 m de altura. Nas áreas B e C, a batimetria e as feições de fundo afetaram a altura e velocidade das ondas nesse setor, sendo a primeira mais

determinante. A direção das ondas mudou em regiões mais rasas, passando a atingir a costa na direção Leste. Frentes de onda de altura entre 1,5 e 2,0 m de altura foram encontradas em regiões mais distantes da costa influenciando essas duas áreas.

No nível de maré médio (Figura 4.48) o padrão observado foi o mesmo do encontrado na análise com nível de maré baixa. As frentes de ondas com maior altura passaram a se aproximar mais da costa e a cobrir uma área de maior extensão fazendo com a direção das ondas passassem a se alterar em regiões mais próximas da costa. A área A continuou a apresentar uma mudança mais suave na altura e direção da onda, enquanto que as áreas B e C foram mais afetadas por ondas de altura superiores a 1,5 m de altura.



Figura 4.48 - Malha sudeste, ondas em regime médio e nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

No nível de maré alta (Figura 4.49), a formação de ondas de 0,5 e 1,0 m se restringiu a trechos isolados da praia de Muriú e Jacumã, com o predomínio de frentes de ondas entre 1,0 e 2,0 m de altura.



Figura 4.49 - Malha Sudeste, ondas em regime médio e nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em todas as áreas, principalmente a área A, a direção das ondas passou a se alterar a algumas dezenas de metros das praias de Muriú e Jacumã e nas áreas B e C a influência das feições de fundo foi menos expressiva. Ainda nas áreas B e C foram detectadas frentes de ondas acima de 1,5 m nessas áreas.

Referente ao estudo das correntes, a malha sudeste apresentou correntes de até 0,6 m/s de velocidade com direção preferencial noroeste e assim como nas outras análises a variação da cota batimétrica e a presença de feições de fundo desempenharam um papel importante na variação da velocidade e direção dessas correntes.

No regime de tempestade foram observadas correntes de até 0,6 m/s com direção predominante noroeste que variaram em função da morfologia da costa.

Em nível de maré baixa (Figura 4.50), as correntes alcançaram velocidade máxima de até 0,5 m/s e se observou o predomínio da formação de correntes de direção noroeste. As áreas B e C apresentaram os maiores índices de velocidade nesse nível de maré.



Figura 4.50 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré baixa. Fonte: Elaborada pelo autor.

Na área A se observou o predomínio de correntes de direção noroeste que inclinam sua direção em função da morfologia da praia de Muriú.

Na área B, se observou o predomínio de correntes de direção noroeste e em menor expressão de correntes de direção nordeste. Há um aumento da velocidade das correntes próximo à costa na cota de 3,0 m e ainda na cota de 6,0 m de profundidade que acompanham as feições de fundo existentes.

A área C mostrou que há o predomínio de correntes de direção nordeste, noroeste e sudoeste e assim como na área B também houve o aumento da velocidade das correntes nas áreas mais rasas (até a cota de 3 m).

No nível de maré média (Figura 4.51), foi observado o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste com velocidade máxima de até 0,3 m/s. Essas correntes mantiveram a direção e maior velocidade apenas nas áreas mais rasas se dispersando para outras direções à medida que se afastaram para maiores profundidades.



Figura 4.51 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

A área A apresentou o predomínio de correntes de direção noroeste e em menor expressão correntes de direção nordeste, nessa área não se observou variações significativas de velocidade.

Na área B, foi observado o predomínio de correntes de direção e noroeste nordeste (de maior velocidade). As correntes de direção noroeste acompanham a morfologia costeira enquanto que as correntes de direção nordeste se localizam nas áreas de maior profundidade.

Na área C, se observou o predomínio das correntes de nordeste, noroeste (de maior velocidade) e sudoeste assim como a análise anterior.

No nível de maré alta (Figura 4.52), se observou o predomínio de correntes de direção noroeste com velocidade máxima de até 0,6 m/s. Nesse nível de maré assim como as outras análises houve uma menor variação de velocidade.



Figura 4.52 - Malha sudeste, correntes em regime de tempestade e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas áreas A, B e C o padrão das correntes permaneceu o mesmo com o predomínio da formação de correntes de direção nordeste (Áreas B e C), noroeste (Áreas A, B e C) e sudoeste (Área C). Em B ainda se observou a criação de um vórtice que se estende até o limite das praias de Muriú e Jacumã.

Em regime médio, a velocidade máxima das correntes foi de até 0,4 m/s e semelhantemente ao observado no regime de tempestade foram observadas variações significativas na direção e velocidade das correntes de acordo com a diferenças morfológicas das praias de Muriú e Jacumã.

No nível de maré baixa (Figura 4.53), houve o predomínio de correntes de direção noroeste que atingiram até 0,3 m/s de velocidade e que mostraram maior velocidade principalmente nas áreas mais rasas.





Em A, foi observado o predomínio de correntes de direção noroeste que apresentaram diferentes inclinações em função da morfologia desse setor da praia de Muriú.

Em B, o padrão de direção observado foi bastante uniforme mostrando correntes de direção noroeste em quase todo esse trecho junto a correntes de direção nordeste em menor expressão. As correntes de maior velocidade se concentraram na região mais rasa, já próximas da praia e seguindo as feições de fundo distantes da costa.

Por fim, a área C foi observado o predomínio correntes de direção noroeste que apresentaram maior velocidade nas áreas de até 3,0 metros de profundidade e em menor expressão de correntes de direção nordeste, sudeste e sudoeste.



No nível de maré média (Figura 4.54), foi encontrado um padrão similar à análise anterior com o predomínio de correntes de direção noroeste e velocidade máxima de 0,3 m/s.

Figura 4.54 - Malha sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré média. Fonte: Elaborada pelo autor.

Em A foram observadas o predomínio de correntes de direção noroeste e assim como a análise anterior houve pequena variação de velocidade.

Na área B, foi detectado o predomínio de correntes de direção nordeste e seguindo o litoral e com maior velocidade, correntes de direção noroeste. Além disso, foi observado a formação de um pequeno vórtice de sentido horário no limite entre as duas praias analisadas.

Na área C, se observou o predomínio de correntes de direção noroeste e maior velocidade próximas ao litoral e em maior profundidade correntes de direção sudoeste. Ainda são encontradas correntes de direção sudeste.

No nível de maré alta (Figura 4.55), foram observadas correntes de velocidade máxima de 0,4 m/s com direção predominante nordeste e noroeste. Nesse nível de maré a variação de velocidade foi menor com nenhuma área mostrando uma maior velocidade em relação a outra.



Figura 4.55 - Malha sudeste, correntes em regime médio e de nível de maré alta. Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse regime, a área A apresentou o predomínio de correntes de direção nordeste e noroeste e em menor expressão de correntes de direção sudeste e sudoeste.

A área B apresentou o predomínio de correntes de direção nordeste e em menor expressão de correntes de direção noroeste além de um vórtice que se estende até a área C.

Por fim a área C apresentou o predomínio de correntes de direção noroeste e sudoeste.

### 4.4 Transporte de sedimentos

Os pontos de interesse (POI) (Tabela 4.8) foram dispostos paralelamente a linha de praia com espaçamento de 1 km entre cada e cobrindo toda a área de estudo com o total de 11 pontos. Localizados entre 2,3 e 3,2 km de distância da costa e apresentando profundidade de 4,3 a 10,6 m, os POIs apresentaram altura de onda em regime de tempestade de até 2,7 m (Ponto 7) e período de pico de até 10,5 s (Ponto 7) valores similares ao encontrado na análise do ponto DOW (2,7 m e 12,3 s).

Ponto	Longitude	Latitude	Cota	Hs <sub>12</sub> (m)	<b>Tp</b> <sub>12</sub> (s)
1	-35,229	-5,511	7,95	2,06	9,9
2	-35,226	-5,519	6,32	2,19	9,77
3	-35,223	-5,528	4,56	2,2	9,78
4	-35,22	-5,536	4,30	2,21	8,89
5	-35,217	-5,545	6,00	2,47	10,11
6	-35,214	-5,553	9,42	2,39	9,83
7	-35,211	-5,562	7,53	2,71	10,48
8	-35,208	-5,571	10,56	2,52	9,8
9	-35,205	-5,579	10,63	2,61	10,33
10	-35,202	-5,588	8,34	2,59	10,08
11	-35,199	-5,596	9,73	2,6	10,24

Tabela 4.8 - Localização e características dos pontos de interesse.

Após a criação dos pontos de interesse, foram criados 11 perfis (Tabela 4.9) sendo os perfis 1 a 7 na praia de Muriú e os perfis 8 a 11 na praia de Jacumã. A configuração utilizada pode ser visualizada na Tabela 8 onde estão definidos os parâmetros de forma, diâmetro mediano do sedimento e declividade. A área de estudo apresentou sedimentos de Silte a Areia média e declividade suave com profundidade de fechamento entre 4,0 e 5,0 m.

Perfil	Parâmetro de forma	Diâmetro mediano (mm)	Declividade	Classificação granulométrica de Wentworth	Profundidade de fechamento
1	0,052	0,053	0,005	Silte	4,39
2	0,070	0,100	0,005	Areia muito fina	4,65
3	0,071	0,102	0,005	Areia muito fina	4,66
4	0,064	0,084	0,005	Areia muito fina	4,61
5	0,058	0,068	0,005	Areia muito fina	5,22
6	0,067	0,091	0,011	Areia muito fina	5,04
7	0,088	0,162	0,010	Areia fina	5,72
8	0,114	0,278	0,014	Areia média	5,28
9	0,084	0,147	0,008	Areia muito fina	5,51
10	0,076	0,118	0,009	Areia muito fina	5,45
11	0,083	0,141	0,009	Areia fina	5,48

Tabela 4.9 – Configuração utilizada para calcular o transporte de sedimento ao longo de perfis transversais à costa e profundidade de fechamento obtida por meio da análise da arrebentação.

Por fim, se obteve o fluxo de energia e o transporte de sedimentos total (Q), para sudeste (Q+) e para noroeste (Q-) (Tabela 4.10). Foi constatado um fluxo de energia médio de 2436 J/(m/s) que foi maior nos perfis 3, 9 e 11 e que influenciam no transporte de sedimento para noroeste (Figura 54). A praia de Muriú apresentou um fluxo menor de energia (1686 J/(m/s)) comparados a praia de Jacumã (média de 3756 J/(m/s)) principalmente devido o alto fluxo de energia encontrado no perfil 9.

Perfil	Fluxo de energia [J/(m/s)]	Direção (°)	Q (m³/ano)	Q+ (m <sup>3</sup> /ano)	<b>Q-</b> (m³/ano)
1	1139	83	-66040	0	-66040
2	872	91	-81038	0	-81038
3	4031	93	-28722	3942	-32664
4	1493	88	-50364	17	-50381
5	1790	90	-65028	0	-65028
6	835	99	-62262	0	-62262
7	1643	72	-87208	0	-87208
8	1824	87	-68023	1	-68025
9	7274	78	-35343	6714	-42057
10	1603	104	-63096	7008	-70104
11	4322	103	18216	21717	-3501

Tabela 4.10 – Fluxo de energia e transporte de sedimentos ao longo dos 11 perfis criados.

O Transporte de sedimento (Figura 4.56) ocorreu predominantemente para Noroeste (Q-) com exceção do perfil 11 que apresentou maior transporte para sudeste. A Praia de Muriú apresentou maiores taxas de transporte (média de 62 mil m<sup>3</sup>/ano) chegando a ultrapassar 80 mil m<sup>3</sup>/ano nos perfis 2 e 7 que correspondem as áreas A e B que foram destacadas ao longo da análise do clima de ondas em águas rasas e de correntes. Quanto à praia de Jacumã, essa apresentou média inferior (37 mil m<sup>3</sup>/ano) com os perfis 8 e 10 apresentando mais de 60 mil metros cúbicos de taxa anual de transporte de sedimento.



Figura 4.56 – Fluxo de energia e transporte de sedimentos ao longo dos 11 perfis criados para representar a área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.5 Análise da variação volumétrica

A partir da análise dos cenários gerados para 1984 e 2014 (Figura 4.57) constatou que, nesse período, houve uma variação volumétrica de 1,9 milhões de metros cúbicos (1,8 milhões de m<sup>3</sup> negativos e 87,2 mil m<sup>3</sup> positivos) que equivalem a uma taxa de variação de 64 mil m<sup>3</sup>/ano (61,4 mil m<sup>3</sup>/ano negativos e 2,9 mil positivos). Essa variação se destacou do setor Sul até o centro da praia de Muriú e na região central até o Sul da praia de Jacumã e em menor expressão mais a Norte da praia de Muriú.



Figura 4.57- Análise qualitativa da variação volumétrica entre 1984 e 2014. Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5 CONCLUSÕES

A análise da evolução da linha de praia a partir do LRR no período de 1984 a 2014 apresentou uma área relativamente estável (-0,5 m/ano), exibindo na maioria dos transectos variação da linha de praia de até dois metros por ano. No entanto, a partir da observação dos módulos SCE (média de 31,9 m) e NSM (média de -19,8 m) foi possível observar que apesar de sua aparente estabilidade, essa área apresentou grande mobilidade e amplitude de variação da linha de praia nesse período. Por esse motivo foram necessárias análises década a década para então se constatar que na área ocorreram tanto eventos de erosão como eventos de deposição que alternaram entre si ao longo do tempo.

Na análise realizada para o período entre 1984 e 1994 constatou-se a perda significativa de sedimentos na área. Nesse período foram observados valores de EPR negativos (média de - 2,1 m) em 50% dos transectos, valores de SCE elevados (média de 20,2 m) em 88% dá área estudada e valores de NSM negativos (média de -19,5 m) em 98% dos transectos.

Já o período entre 1994 e 2004 foi marcado por relativa estabilidade (média de +1,4 m/ano) com uma significativa área apresentando deposição de sedimentos (24% dos transectos). A partir desse resultado percebeu que esse período foi mais estável que o período anterior, explicando assim parte do resultado observado na análise realizada entre 1984 e 2014. Nesse período o NSM mostrou variações positivas significativas (média de 14,4 m) em relação ao período anterior, caracterizando assim a presença de eventos deposicionais que forneceram sedimentos para as praias de Muriú e Jacumã.

O período compreendido entre 2004 e 2014 mostrou a presença de processos erosivos (média de -1,4 m/ano) com uma significativa área apresentando erosão de sedimentos (32% dos transectos). Porém, diferentemente do período entre 1984 e 1994, a intensidade desses processos foi menor, apresentando valores de SCE e NSM mais baixos, com médias de 17,3 e -14,7 m, respectivamente.

Outro ponto importante na análise da evolução da linha de praia foi a identificação de possíveis *hotspots* de erosão costeira, localizados na parte mais a norte e na região centro-sul da praia de Muriú e na região central da praia de Jacumã, esses trechos apresentaram maiores valores de NSM e SCE com média de -41,6 e 45,0 m, respectivamente. Além disso, a região central da praia de Jacumã apresentou outra singularidade, pois esse trecho de aproximadamente 1 km apresentou maior disparidade nos valores de NSM e SCE (média de -18,0 e 40,0 m, respectivamente) resultantes de alternância entre episódios de erosão e deposição elevados.

Também foram observadas semelhanças em relação aos estudos realizados por Amaro *et al.* (2014) quando foram considerados períodos temporais similares (1984 a 2014 e 1986 a 2012). A análise da taxa de variação da linha de praia foi similar (- 0,7 m/ano) bem como da mobilidade (-19,2 m) ao que foi observado na área de estudo, sendo que se observaram uma maior incidência de episódios de erosão na praia de Ponta Negra. Essas diferenças podem ter várias causas sendo a maior pressão antrópica e as transformações decorrentes quanto ao uso da orla litorânea, por se tratar do setor de maior interesse turístico e imobiliário do Rio Grande do Norte, uma delas.

Aliados a análise da evolução da linha de praia, o estudo do clima de ondas e correntes se mostrou importante por consolidar as observações feitas principalmente no que se refere os setores mais instáveis da área estudada. A parte do estudo da propagação de ondas em águas intermediária se observou a formação de ondas com direção predominante leste-sudeste com altura de onda de 1,6 m em regime médio e 2,7 em regime de tempestade, e período de onda 7,8 s em regime médio e 12,2 s em regime de tempestade.

Em águas rasas, essas ondas alcançaram até 4 metros de altura e 4,0 m/s de velocidade e apresentam mudanças significativas na altura, direção e velocidade ao se aproximarem da costa e também ao longo de feições de fundo constatadas na região Sul da praia de Muriú e região central da praia de Jacumã, áreas destacadas pela análise da evolução da linha de praia.

Em relação as correntes, essas se apresentaram com velocidade máxima de 0,5 m/s e com direção predominante sudeste, mas também se observou a formação de correntes de direção noroeste, principalmente quando se consideram as malhas leste-nordeste e leste, na região Norte da praia de Muriú e de pequenos vórtices no limite das praias de Muriú e Jacumã.

Ainda sobre o estudo do clima de ondas e correntes também foi possível destacar três áreas que se mostraram mais instáveis, essas áreas denominadas de A, B e C, se mostraram compatíveis com o as áreas destacadas na análise da evolução da linha de praia, enfatizando a eficiência dos métodos adotados. Também se observou que as praias de Muriú e Jacumã apresentaram diferenças significativas no comportamento das ondas e correntes, provavelmente devido as diferenças em sua morfologia que podem ser notadas ao se analisar a declividade, feições de fundo e do contorno da costa que se mostraram menos significativa com o aumento do nível de maré e em regime médio apresentando um comportamento mais estável nessas condições.

O uso de diferentes malhas de propagação (leste-nordeste, Leste, leste-sudeste e sudeste) se mostrou fundamental para compor o cenário evolutivo da área, pois a partir dos resultados

encontrados o estudo isolado da malha leste-sudeste, de maior frequência, não seria suficiente para compor o cenário observado nas praias de Muriú e Jacumã já que foram constatados tanto episódios de erosão como de deposição. As malhas leste-nordeste (2,4% de frequência) e Leste (19,9% de frequência) apresentaram direção de ondas e correntes de direção oposta as malhas leste-sudeste (74,7% de frequência) e sudeste (2,9% de frequência) no setor norte da praia de Muriú e setor central da praia de Jacumã que atenua os processos erosivos nesses trechos, e mesma direção nos demais pontos ondem foram encontrados trechos com maior índice de erosão. Tais constatações colaboram com o cenário observados na análise da evolução da linha de praia.

Quando comparadas a praia de Ponta Negra (Araújo *et al.*, 2015) se observou que as áreas apresentam mesma direção preferencial de ondas e correntes (leste e leste-sudeste e leste-sudeste respectivamente) porém há uma maior incidência de ondas de leste-nordeste que potencialmente explicam, a junto as correntes induzidas pelas ondas vindas de Leste, a maior incidência de processos deposicionais na área.

Como última etapa da utilização do SMC-Brasil, foram obtidos o fluxo de energia e transporte de sedimento que não apresentaram uma relação direta entre si. Na praia de Muriú foi observado uma maior taxa de transporte média (média de 63 mil m³/ano) que mostraram maior intensidade (81 mil m³/ano) no setor Norte e setor Sul e menor fluxo de energia (média de 1686 J/(m/s)) enquanto que a praia de Jacumã mostrou menor transporte de sedimento (média de 37 mil m³/ano), com maior intensidade nas regiões adjacentes a área central, e maior fluxo de energia (média de 3756 J/(m/s)). Em relação a estudos anteriores (Araújo *et al.* 2015) o fluxo de energia se manteve semelhante (média de 4706 J/(m/s) em Ponta Negra), porém a taxa de transporte anual se mostrou em outra ordem de grandeza apresentando uma média de 818 mil m³/ano, valores muito mais elevados do que o observado nas praias de Muriú e Jacumã.

A partir da análise da taxa anual de transporte de sedimentos mais uma vez, se observou uma compatibilidade entre as áreas anteriormente destacadas no que se refere as regiões com maior fluxo de energia que correspondem as áreas com alternância de processos erosivos e deposicionais e as áreas com maior transporte de sedimento que correspondem as áreas com maior amplitude de variação de linha de praia.

Quanto a análise da variação volumétrica, foi constatada uma taxa anual de variação de 64 mil m<sup>3</sup>/ano no intervalo de 1984 a 2014 que foi compatível com à média observada por meio da utilização do SMC-Brasil (média de 54 mil m<sup>3</sup>/ano). A análise também apontou algumas áreas também observadas nas análises do DSAS e SMC como o setor Sul da praia de Muriú e a região central da praia de Jacumã que apresentaram maior variação volumétrica, bem como dos setores Norte da praia de Muriú e Sul da praia de Jacumã que também se mostraram susceptíveis a variações altas nas análises do DSAS e SMC-Brasil.

Por fim, o estudo da mobilidade da linha de praia, da amplitude de variação da linha de praia e da taxa de variação da linha de praia forneceram aspectos importantes da evolução da linha de praia que ao serem integrados as informações relacionados as ondas, correntes e transporte de sedimento permitiram a visualização da evolução costeira nas praias de Muriú e Jacumã, litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. A análise da variação volumétrica mostrou-se compatível com os resultados obtidos com do DSAS e SMC-Brasil compondo assim outra ferramenta que pode ser utilizada para análise costeira, demandando, no entanto, de mais testes para ser consolidada. Dessa forma, o presente estudo forneceu informações fundamentais que podem ser utilizadas como subsídios técnicos ao gerenciamento costeiro da orla litorânea, seja na etapa de implantação, ou na etapa de manutenção de obras e atividades turísticas ou de ocupação nesse setor costeiro permitindo um uso mais sustentável dessa região.

# 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agardy, T.; Bridgewater, P.; Crosby, M.P.; Day, J.; Dayton, P.K.; Kenchington, R.; Peau, L. 2003. **Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas**. Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems, 13(4): 353-367.

Albino, J. 1999 Morfodinâmica e processo de sedimentação atual das praias de Bicanca à
Povoação, ES. Tese de doutoramento. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar.
Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). 178p.

Almeida, L.R.D.; Amaro, V.E.; Marcelino, A.M.T.; Scudelari, A.C. 2015. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. Revista de Gestão Costeira Integrada, 15(2): 135-151.

Almonacid-Caballer, J.; Sánchez-García, E.; Pardo-Pascual, J. E.; Balaguer-Beser, A. A.; Palomar-Vázquez, J. 2016. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372, 79-88.

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Moraes, G.; Leonardo, J.; Sparovek, G. 2014.Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6): 711-728.

Amaro, V.E.; Araújo, A.B. 2008. 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 de Gestão Costeira Integrada, 8(2): 77-100.

Amaro, V.E.; Scudelari, A.C.; Neves, C.F.; Tabosa, W.F.; Lima, Z.M.; Santos Jr., O.F.; Ferreira, A.T.S.; Santos, A.L.S.; Busman, D.V. 2012. Laudo pericial item-b: Indicação das obras emergenciais de contenção e reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra, Natal RN. Natal, RN. 130 p.

Amaro, V.E.; Gomes, L.R.S.; Lima, F.G.F.; Scudelari, A.C.; Neves, C.F.; Busman, D.V.; Santos, A.L.S. 2014. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. Marine Geodesy, 38(1): 1-25.

Amorim, A.C.B.; Chaves, R.R.; Silva, C.M.S. 2014. Influence of the tropical Atlantic Ocean's sea surface temperature in the eastern northeast Brazil precipitation. Atmospheric and Climate Sciences, 4: 874-883.

Ângulo, R.J. 1993. A ocupação urbana no litoral paranaense e as variações da linha de costa. Bol. Paranaense Geociências, 41: 73-81.

Araújo, M.A. 2008. Climate, tectonics and beach erosion: the case of Espinho (NW Portuguese Coast). Estudos do Quaternário, 5: 39-50.

Araújo, D.J.C.; Scudelari A.C.; Amaro V.E. 2015. **Evolução décadal da taxa de transporte longitudinal de sedimento em praias urbanas da zona costeira de Natal/RN**. In: CONGRESSO SOBRE PLANEAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 8, Aveiro, 2015. Anais, Aveiro, APRH, p. 1-15.

Bayram, A.; Larson, M.; Hanson, H. 2007. A new formula for the total longshore sediment transport rate. Coastal Engineering, 540(9): 700-710.

Bezerra, F.H.R.; Amaro, V.E.; Vita-Finzi, C.; Saadi, A. 2001. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 14: 61-75.

Bird, E.C.F. 1985. Coastline Changes: A Global Review. Chichester, John Wiley & Sons, 219p.

Bird, E.C.F. 2008. **Coastal geomorphology: an introduction, 2nd Edition**. Chichester, John Wiley & Sons, 411p.

Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. 1999. **A third-generation wave model for coastal regions**. Part I: Model description and validation. Journal of Geophysical Research, 104(c4): 7649-7666.

Busman, D.V.; Amaro, V.E.; Prudencio, M.C.; Lima, F.G.F.; Matos, M.F.A.; Moura, J.E. 2013.
Shoreline changes from 1986 to 2010 on Ponta Negra beach, Natal / RN, Northeast Brazil.
In: INTERNATIONAL SHORT COURSE/CONFERENCE ON APPLIED COASTAL
RESEARCH, Lisboa, 2013. Resumo, Lisboa, SCACR, p. 1-2.

Busman, D.V.; Amaro, V.E.; Prudencio, M.C. 2014. **Comparison of prognostic models in different scenarios of shoreline position on Ponta Negra beach in Northeast, Brazil**. World Academy of Science, Engineering and Technology, 8: 17-21.

Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R. 2011. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. Coastal Engineering, 58(9): 851-862.

Camus, P.; Mendez, F.J.; Medina, R.; Tomas, A.; Izaguirre, C. 2013. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. Coastal Engineering, 72: 56-68.

Cooley, T.; Anderson, G.P.; Felde, G.W.; Hoke, M.L.; Ratkowski, A.J.; Chetwynd, J.H.; Gardner, J.A.; Adlergolden, S.M.; Matthew, M.W.; Berk, A.; Bernstein, L.S.; Acharya, P.K.; Miller, D.; Lewis, P. 2002. **FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation**. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 3, Toronto, 2002. Resumo, Toronto, IEEE, p.1414-1418.

Córdoba, V.C.; Jardim de Sá, E. F.; Sousa D.C.; Antunes, A. F. 2007. **Bacia de Pernambuco-Paraíba**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, 15 (2): 391-403.

Crist, E.P.A. 1985. **TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data**. Remote Sensing of Environment, 17(3): 301-306.

Dalinghaus, C.; Almonacid-Caballer, L.R.; Rodriguez, E.M.G.; Klein, A.H.F. 2018. Sistema de modelagem costeira do Brasil: estudos de caso. Florianópolis: Editora da UFSC. Disponível em: <a href="http://editora.ufsc.br/estante-aberta/">http://editora.ufsc.br/estante-aberta/</a>. Acesso em: 06 abr. 2019.

Danforth, W.W.; Thieler, E.R. 1992. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) user's guide: version 1.0**. In: Open-File Report 92-355, Wood Holes, U.S. Geological Survey, p.1-41. (USGS Numbered Series).

Daniels, R.C. Using ArcMap to extract shorelines from LANDSAT TM & ETM+ data. 2012. In: ESRI INTERNATIONAL USERS CONFERENCE, 32, San Diego, 2012. Anais, San Diego, ESRI, p. 1-23.

Davis Jr., R.A.; Fitzgerald, D.M. 2004. **Beaches and Coasts**. Oxford, Blackwell Science Ltd., 419p.

Dean, R.G. 1977. Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts. Ocean engineering technical report, 12, University of Delaware, 45p.

Defeo, O.; Mclachlan, A.; Schoeman, D.S.; Schlacher, T.A.; Dugan, J.; Jones, A.; Lastra, M.; Scapini, F. 2009. **Threats to sandy beach ecosystems: A review**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 81: 1-12.

Dolan, R.; Hayden, B.; Heywood, J. 1978. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2: 21-39.

Dominguez J. M. L.; Bittencourt A.C.S.P. 1996. **Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in northeastern Brazil**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68:355-371.

El-Robrini, M.; Souza Filho, P.W.M. 1994. A Plataforma Continental do Amazonas e as Evidências das Oscilações do Nível do Mar durante o Quaternário Superior Terminal. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 38. Camboriú, Anais, SBG, 1: 417-419.

Fernandez, G.B.; Rocha, T.B.; Barboza, E.G.; Dillenburg, S.R.; Rosa, M.L.C.; Angulo, R.J.; Souza, M.C.; Oliveira, L.H.S; Dominguez, J.M.L. 2019. **Natural Landscapes Along Brazilian Coastline**. *In*: SALGADO, A.A.R.; SANTOS, L.J.C.; PAISANI, J.C. (Eds.), The Physical Geography of Brazil - Environment, Vegetation and Landscape. Springer, Cham, p. 199-218.

Feyisa, G.L.; Meilby, H.; Fensholt, R.; Proud, S.R. 2014. Automated Water Extraction Index: a new technique for surface water mapping using LANDSAT imagery. Remote Sensing of Environment, 140: 23-35. Ford, M. 2013. Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. Remote Sensing of Environment, 135: 130-140.

França, D.G.M.; Siani, S.M.O.; Moraes, E.C. 2015. Avaliação da correção atmosférica por FLAASH sobre cenas OLI LANDSAT-8. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, João Pessoa, 2015. Anais, João Pessoa, INPE, p. 6526-6533.

Franco, C.G.M.; Amaro, V.E.; Souto, M.V.S. 2012. **Prognóstico da erosão costeira no litoral setentrional no Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040**. Revista de Geologia (Fortaleza), 25(2): 37-55.

Franke, R. 1982. Scattered data interpolation: test of some methods. Mathematics of Computation, 38: 181-200.

Gao, B.C. 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58: 257-266.

González, M.; Medina, R.; Gonzalez-Ondina, J.; Osorio, A.; Méndez, F.J.; García, E. 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Computers & Geosciences, 33: 916-931.

Gruber, N.L.S.; Barboza, E.G.; Nicolodi, J.L. 2003. Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: subsídios para gestão integrada da zona costeira. Gravel, 1: 81-89.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2011. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 176p.

IH Cantábria - MMA. 2017a. Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Manual do Usuário – SMC 3.0. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 172p.

IH Cantábria - MMA. 2017b. Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Manual de Referência – Modelo de correntes por quebra em praia - COPLA MC/SP. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 80p.

IH Cantábria - MMA. 2018. Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Documento Temático - Ondas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 80p. INMET. 2018. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <a href="http://www.inmet.gov.br/>br/>http://www.inmet.gov.br/>http://www.http://www.http://www.inmet.gov.br/>http://www.inmet.gov.b

IOC/UNESCO, IMO, FAO, UNDP. 2011. A Blueprint for Ocean and Coastal Sustainability. An Inter-agency Paper towards the Preparation of the UN Conference on Sustainable Development (Rio+20). IOC/UNESCO, Paris, 42p.

Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. 2018. **The state of the world's beaches**. *Scientific reports*, 8(1), 6641.

Jorge, D.S.F.; Amore, D.J.; Barbossa, C.F. 2015. Efficiency estimation of four different atmospheric correction algorithms in a sediment-loaded tropic lake for LANDSAT 8 OLI sensor. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, João Pessoa, 2015. Anais, João Pessoa, INPE, p. 4428-4435.

Himmelstoss, E.A.; Henderson, R.E.; Kratzmann, M.G.; Farris, A.S. 2018. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S.** Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110p.

Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Cistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woolen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetma, A.; Reynolds, R.; Jenne, R.; Joseph, D. 1996. The NCEP/ NCAR Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorology Society, 77: 437-471.

Kauth, R.J.; Thomas, G.S. 1976. **The Tasselled Cap - A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT**. In: PROCEEDINGS, SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 159, Indiana, 1976. Anais, Indiana, Laboratory for Applications of Remote Sensing, p. 41–51.

Maglione, P.; Parente, C.; Vallario, A. 2014. Coastline extraction using high-resolution WorldView-2 satellite imagery. European Journal of Remote Sensing, 47(1): 685-699.

Marin, F.D.O. 2009. A Subcorrente Norte do Brasil ao largo da Costa do Nordeste. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 140p.

Mil-Homens, J.; Ranasinghe, R.; van Thiel de Vries, J.S.M.; Stive, M.J.F. 2013. **Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas**. Coastal Engineering, 75: 29-39.

Mínguez, R.; Espejo, A.; Tomás, A.; Méndez, F.J.; Losada, I.J. 2011. **Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data.** Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 28(11): 1466-1485.

Moraes, A.C.R. 2007. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do litoral brasileiro**. São Paulo, Editora Annablume, 232p.

Nassar, K.; Mahmod, W. E.; Fath, H.; Masria, A.; Nadaoka, K.; Negm, A. 2018. Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(1), 81-95.

Neumann, B.; Vafeidis, A.T.; Zimmermann, J.; Nicholls, R.J. 2015. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding-a global assessment. PloS ONE 10(3): 1-34.

Peterson, R.G.; Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. Progress in oceanography, 26(1): 1-73.

Pinheiro, L.R.S.G.; Gurgel, D.F.; Barros, J. E. C.; Teixeira, A.F.N.; Scudelari, A.C.; Amaro, V.E. 2017. Caracterização do clima de ondas em profundidades intermediárias da plataforma continental do Rio Grande do Norte, NE/BR. Geologia, 30(2): 282-302.

Post, J.C.; Lundin, C.G. 1996. Guidelines for integrated coastal zone management. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series. Washington, World Bank, 28p.

Reguero, B.G.; Menéndez, M.; Méndez, F.J.; Mínguez, R.; Losada, I.J. 2012. A Ocean Global Wave (GOW) Calibrated Reanalisys from 1948 Onwards. Coastal Engineering, 65: 38-55.

Ribeiro, F. 2014. **Caracterização das correntes da plataforma continental interna da Praia de Ponta Negra**. Dissertação de Doutorado, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, 54p. Rios, V.P.L.; Amaro, V.E.; Vieira, M.M.; Matos, M.F.A.; Prudencio, M.C.; Camara, M.R.
2016. Influência Neotectônica na Morfologia do Sistema de Ilhas Barreiras, Nordeste do
Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, 17, 399-416.

Rios, V.P.L. & Amaro, V.E. 2012. Caracterização dos depósitos sedimentares Holocênicos no sistema de ilhas barreiras do estuário Diogo Lopes, litoral setentrional do Rio Grande do Norte. Revista de Geologia, 25(2), 55-79.

Roy, D.P.; Wulder, M.A.; Loveland, T.R.; Woodcock, C.E.; Allen, R.G.; Anderson, M.C.; Helder, D.; Irons, J.R.; Johnson, M.D.; Kennedy, R.; Scambos, T.A.; Schaal, C.B.; Schott, J.R.; Sheng, Y.; Vermote, E.F.; Belward, A.S.; Bindschadler, R.; Cohen, W.B.; Gao, F.; Hipple, J.D.; Hostert, P.; Huntington, J.; Justice, C.O.; Kilic, A.; Kovalskyy, V.; Lee, Z.P.; Lymburner, L.; Masek, J.G.; McCorkel, J.; Shuai, Y.; Trezza, R.; Vogelmann, J.; Wynne, R.H.; Zhu, Z. 2014. Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. Remote Sensing Environment, 145: 154-172.

Sánchez-García, E.; Pardo-Pascual, J.E.; Balaguer-Beser, Á.A.; Almonacid-Caballer, J. 2015. **Analysis of the shoreline position extracted from Landsat TM and ETM+ imagery**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, 991-998.

Santos, M.S.T.; Amaro, V.E.; Ferreira, A.T.S.; Santos, A.L.S. 2012. **Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão, Nordeste do Brasil**. Revista de Geologia (Fortaleza), 25, 7-19.

Sarp, G.; Ozcelik, M. 2017. Water body extraction and change detection using time series:
A case study of Lake Burdur, Turkey. Journal of Taibah University for Science, 11(3): 381-391.

Scudelari, A.C.; Neves, C.F.; Amaro, V.E.; Santos, O.F. 2016. Ponta Negra Beach, Natal, Brazil: A Roll and Rock Story. Journal of Coastal Research: Special Issue, 75: 815-819.

Shi, H.; Singh, A. 2003. Status and interconnections of selected environmental issues in the global coastal zones. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 32(2): 145-152.

Song, C.; Woodcock, C.E.; Seto, K.C.; Lenney, M.P.; Macomber, S.A. 2001. Classification and Change Detection Using LANDSAT TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? Remote Sensing of Environment, 75(2): 230-244.

Souza, C.R.G. 2002. Coastal erosion risk assessment, shoreline retreat rates and causes of coastal erosion along the state of São Paulo coast, Brazil. Pesquisas em Geociências, 28(2), 459-474.

Souza, C.R.G.; Suguio, K. 2003. **The Coastal erosion Risk Zoning and the São Paulo State Plan for coastal management**. Journal of Coastal Research, Special Issue, 35: 530-547.

Souza, C.R.G. 2009a. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. Journal of Integrated Coastal Zone Management, 9(1): 17-37.

Souza, C.R.G. 2009b. A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Conseqüências, Indicadores de Monitoramento e Risco. *In*: Bononi, V.L.R.; Santos Junior, N.A. (Org.), Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de Um Ano de Conhecimento Acumulado, pp.48-69, Instituto de Botânica – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Souza, Z. S.; Ferreira, A. C.; Dutra, R. R. 2012. Carta Geológica - Folha Natal (SB-25-V-CV). Escala 1:100.00.

Suguio, K. 2003. Geologia Sedimentar. São Paulo, Editora Edgard Blucher, 400p.

Stramma, L.; Fischer, J.; Reppin, J. 1995. **The North Brazil Undercurrent**. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 42(5): 773-795.

Stramma, L.; England, M. 1999. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(9): 20863-20883.

Szabó, S.; Gácsi, Z.; Balázs, B. 2016. Specific features of NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories. Acta Geographica Debrecina Landscape & Environment Series, 10(3-4): 194-202.

Tabosa, W.F.; Lima, Z.; Vital, H.; Guedes, I.M.G. 2001. Monitoramento costeiro das praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte-NE/Brasil. Pesquisas em Geociências, 28(2), 383-392.

Thieler, E.R.; Danforth, W.W. 1994. Historical shoreline mapping (II): application of the Digital Shoreline Mapping and Analysis Systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. Journal of Coastal Research, 10(3): 600-620.

Thieler, E.R.; Himmelstoss, E.A.; Zichichi, J.L.; Ergul, A. 2009. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change**. In: Open-File Report 2008-1278, Reston, U.S. Geological Survey, p.1-79. (USGS Numbered Series).

Thomas, N.; Lucas, R.; Bunting, P.; Hardy, A.; Rosenqvist, A.; Simard, M. 2017. **Distribution** and drivers of global mangrove forest change, **1996–2010**. PloS ONE, 12(6): 1-14.

Tolman, H. L. 2002. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. Technical Note 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 133p.

Tomás, A. 2009. **Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo**. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, Tese de Doutorado, 310p.

Tomazelli, L.J.; Villwock, J.A.; Dillenburg, S.R.; Bachi, F.A.; Dehnhardt, B.A. 1998. Significance of present day coastal erosion and marine transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 70(2): 221-229.

Tucker, C.; Grant, D.M.; Dykstra, J.D. 2004. **NASA's global orthorectified Landsat data set**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 70(3): 313-322.

USACE. 1984. United States Army Corps of Engineers. Shore Protection Manual. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington. D.C., 1984.

Vital, H.; Amaro., V.E.; Stattegger, K.; Schwarzer, K.; Tabosa, W.F.; Frazão, E.P.; Silveira, I.M.; Caldas, L.H.O. 2002. Interactions of seal level and tectonics on large scale bedforms preserved on a tropical shelf: The Rio Grande do Norte Shelf, NE Brazil. Continental Shelves during the last glacial cycle. 2nd Conference. IGCP 464. São Paulo. Abstracts, 99-100.

Vital, H.; Silveira, I.M.; Amaro, V.E.; Melo, F.T.L.; Souza, F.E.S.; Chaves, M.S.; Lima, Z.M.
C.; Frazão, E.P.; Tabosa, W.F.; Araújo, A.B.; Souto, M.V.S. 2006. Rio Grande do Norte. *In*: MUEHE, D. (ed.). Erosão e progradação no litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente, p.155-172.

Vital, H.; Stattegger, K.; Amaro, V.E.; Schwarzer, K.; Frazão, E.P.; Tabosa, W.F.; Silveira, I.M. 2008. A modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: Continental shelf adjacent to northern Rio Grande do Norte State, northeastern Brazil. Journal of Sedimentary Research, 90: 175-188.

Vital, H.; Silveira, I.M.; Tabosa, W.F.; Lima, Z.M.C.; Lima-Filho, F.P.; Souza, F.E.S.; Chaves, M.S.; Pimenta, F.M.; Gomes, M.P. 2016. **Beaches of Rio Grande do Norte**. In: SHORT A.D.; KLEIN, A.H.F. (eds.) Brazilian Beach Systems. Coastal Research Library, p. 201-229.

Weatherall, P.; Marks, K.M.; Jakobsson, M.; Schmitt, T.; Tani, S.; Arndt, J.E.; Rovere, M.; Chayes, D.; Ferrini, V.; Wigley, R. 2015. A new digital bathymetric model of the world's oceans. Earth and Space Science, 2(8): 331-345.

Wilkinson, C. 2008. **Status of coral reefs of the world: 2008**. Townsville, Reef and Rain Forest Research Centre, 298 p.

Whittaker, A. C. 2012. How do landscapes record tectonics and climate? Lithosphere, 4(2): 160-164.

Wright, L.D.; Short, A.D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. Marine geology, 56(1-4): 93-118.

Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, 27(14): 3025–3033.

Young, N.E.; Anderson, R.S.; Chignell, S.M.; Vorster, A.G.; Lawrence, R.; Evangelista, P.H. 2017. A survival guide to LANDSAT preprocessing. Ecology, 98(4): 920-932.