



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

David Jefferson Cardoso Araújo

**TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO NA ZONA
COSTEIRA DE NATAL/RN**

**Natal
(2015)**

David Jefferson Cardoso Araújo

**TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO NA ZONA
COSTEIRA DE NATAL/RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof. Dra. Ada Cristina Scudelari

**Natal
(2015)**

Catálogo da Publicação na Fonte.
Biblioteca Central Zila Mamede. Setor de Informação e Referência

Araújo, David Jefferson Cardoso.

Transporte longitudinal de sedimento na zona costeira de Natal/RN /
David Jefferson Cardoso Araújo. – Natal, RN, 2015.

127 f.

Orientadora: Ada Cristina Scudelari.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal
do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Sanitária.

1. Ambiente costeiro - Dissertação. 2. Transporte sedimentar -
Dissertação. 3. Modelagem numérica - Dissertação. I. Scudelari, Ada
Cristina. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 551.35.054.2

David Jefferson Cardoso Araújo

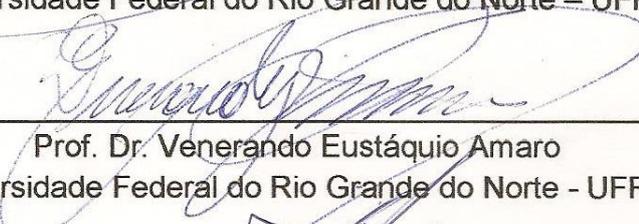
**TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO NA ZONA
COSTEIRA DE NATAL/RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

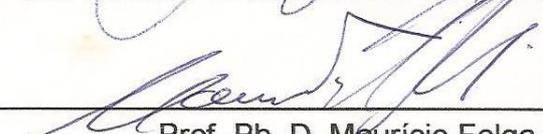
BANCA EXAMINADORA



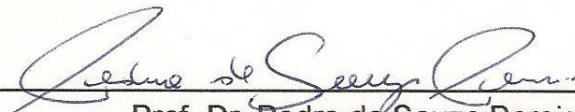
Prof. Dra. Ada Cristina Scudelari – Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN



Prof. Ph. D. Maurício Felga Gobbi
Universidade Federal do Paraná – UFPR



Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

**Natal
(2015)**

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à minha esposa, meus pais, à Prof. Dra. Ada Cristina Scudelari pelos ensinamentos, aos prezados amigos do DALMA, à CAPES por financiar a pesquisa e à qualquer outro profissional ou instituição que de alguma forma tenha contribuído para a realização desse trabalho.

TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO NA ZONA COSTEIRA DE NATAL/RN

RESUMO

O transporte longitudinal de sedimento (TLS) é fator condicionante para ocorrência de mudanças morfológicas em ambientes costeiros. Compreender seus mecanismos de movimento e transporte representa uma fonte de informação essencial para elaboração de projetos e planos de gerenciamento costeiro. Este estudo tem como propostas caracterizar, inicialmente, a circulação hidrodinâmica atuante na região de estudo, compreendida por quatro setores praias do litoral sul de Natal, e a partir daí avaliar o TLS médio anual obtido por meio de três reconhecidas equações (CERC, Kamphuis e Bayram *et al.*), definir qual formulação melhor se aplica a área de estudo em questão, e analisar a variabilidade sazonal, bem como a evolução decadal do transporte. A região costeira selecionada para esse trabalho constitui-se como um dos principais corredores turísticos da cidade, porém vem sofrendo sérios agravos decorrentes dos efeitos associados entre agentes hidrodinâmicos e sua ocupação desordenada. Como ferramenta foi utilizado o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), no qual se apresenta integrado uma série de modelos numéricos e uma base de dados devidamente calibrados e validados para serem utilizados na elaboração de projetos ao longo da zona costeira brasileira. As taxas de TLS foram obtidas para 15 perfis praias distribuídos ao longo da área de estudo. Suas extensões levaram em consideração a profundidade de fechamento calculada pela equação de Harllermeier, e a adoção de propriedades físicas do sedimento típicos de praias arenosas, com exceção do diâmetro médio dos grãos, o qual foi calculado por meio de um algoritmo de otimização baseado na formulação de perfil de equilíbrio proposta por Dean. De forma geral, os resultados mostraram uma intensificação dos agentes hidrodinâmicos sob condições de agitação marítima extremas, principalmente junto aos promontórios existentes na região. Dentre as equações analisadas, Bayram *et al.* foi definida como a mais adequada, com predominância de transporte no sentido sul-norte e as maiores taxas da ordem de 700.000 m³/ano a 2.000.000 m³/ano. A análise sazonal também indicou um predomínio de transporte longitudinal no sentido sul-norte, com as maiores taxas associadas às estações de outono e inverno. Nesses períodos se observam estados erosivos de praia, o que indica, portanto, uma relação direta entre a dinâmica sedimentar e a ocorrência de estados de mar mais energéticos. No que tange à evolução decadal do transporte, foi constatada uma diminuição da taxa de transporte da década de 50 a década de 70, seguida de um aumento até a década de 2000, que coincide com o início do processo de urbanização de alguns trechos do litoral contemplados.

Palavras chave: Ambiente costeiro; transporte sedimentar; modelagem numérica.

LONGITUDINAL SEDIMENT TRANSPORT OF THE COASTAL ZONE OF NATAL/RN

ABSTRACT

The longshore sediment transport (LST) is determinant for the occurrence of morphological changes in coastal environments. Understanding their movement mechanisms and transport is an essential source of information for the project design and coastal management plans. This study aims to characterize, initially, the active hydrodynamic circulation in the study area, comprised of four beach sectors from the south coast of Natal, assessing the average annual LST obtained through three proven equations (CERC, Kamphuis and Bayram *et al.*), defining the best formulation for the study area in question, and analyze the seasonal variability and the decadal transport evolution. The coastal area selected for this work constitutes one of the main tourist corridors in the city, but has suffered serious damage resulting from associated effects of hydrodynamic forcings and their disorderly occupation. As a tool was used the Coastal Modelling System of Brazil (SMC-Brazil), which presents integrated a series of numerical models and a database, properly calibrated and validated for use in developing projects along the Brazilian coastline. The LST rates were obtained for 15 beach profiles distributed throughout the study area. Their extensions take into account the depth of closure calculated by Harllermeier equation, and regarding the physical properties of the sediment, typical values of sandy beaches were adopted, except for the average diameter, which was calculated through an optimization algorithm based on equilibrium profile formulation proposed by Dean. Overall, the results showed an intensification of hydrodynamic forcings under extreme sea wave conditions, especially along the headlands exist in the region. Among the analyzed equations, Bayram *et al.* was the most suitable for this type of application, with a predominant transport in the south-north direction and the highest rates within the order of 700.000 m³/year to 2.000.000 m³/year. The seasonal analysis also indicated a longitudinal transport predominance in the south to north, with the highest rates associated with the fall and winter seasons. In these periods are observed erosive beach states, which indicate a direct relationship between the sediment dynamics and the occurrence of more energetic sea states. Regarding the decadal evolution of transportation, it was found a decrease in transport rate from the 50's to the 70's, followed by an increase until the 2000's, coinciding with the beginning of urbanization process in some stretches of the studied coastline.

Key words: Coastal environments; sediment transport; numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização de toda a zona costeira selecionada para o estudo.....	12
Figura 2	Precipitação média mensal obtida a partir da série de dados dos anos de 1961 a 1990, coletados na estação Meteorológica A-304, localizada em Natal.....	14
Figura 3	Temperatura média mensal obtida a partir da série de dados dos anos de 1961 a 1990, coletados na estação Meteorológica A-304, localizada em Natal.....	14
Figura 4	Direção dos ventos compreendida entre o período de 01/01/2014 a 03/12/2014, proveniente de dados coletados na estação A-304, Natal/RN, pelo INMET.....	15
Figura 5	Velocidade dos ventos compreendida entre o período de 01/01/2014 a 03/12/2014, proveniente de dados coletados na estação A-304, Natal/RN, pelo INMET.....	15
Figura 6	Delimitação dos setores praias estudados, discriminados por diferentes tonalidades de cores, e identificação das principais feições morfológicas existentes na região.....	18
Figura 7	Imagens retratando a expansão urbana na praia de Ponta Negra (PPN). (a) Surgimento das casas de veraneio durante a década de 60; (b) situação nos arredores da PPN no ano de 2009.....	19
Figura 8	Trecho de praia delimitado pela Via Costeira com presença de (a) hotéis instalados no limite do pós-praia; (b) presença de arenitos praias em alguns setores da praia.....	21
Figura 9	(a) Praia de Areia Preta com a presença de falésias presentes na Ponta de Mãe Luiza e (b) espigões delimitando trechos de praia, nas quais também é observada a formação de arenitos praias; e praia dos Artistas, na qual observam-se (c) as falésias da Ponta do Morcego (d) e a presença de arrecifes de arenitos.....	22
Figura 10	Deslizamento de terra ocorrido no bairro de Mãe Luiza impactando diretamente a praia de Areia Preta.....	23
Figura 11	Praias do Meio e do Forte: (a) arrecifes contínuos paralelos à linha de costa; (b) espigões delimitando o canal de entrada na foz do estuário do Potengi.....	24
Figura 12	Dunas móveis e fixas características do Morro do Careca, além da formação de <i>concreções lateríticas</i> nos arredores do morro e da praia de Alagamar.....	25
Figura 13	Trecho da Via Costeira com campos dunares localizados a oeste da via e hotéis e formação de <i>recifes de arenitos</i> localizados a leste.....	26

Figura 14	Presença de pequenas dunas vegetadas e alinhamento de arrecifes de arenitos ao longo da praia do Forte.....	27
Figura 15	Estudo de caracterização sedimentológica realizado pela Hidroconsult	28
Figura 16	Classificação sedimentológica em frente a Praia de Ponta Negra realizado em condições de maré de sizígia.....	20
Figura 17	Modelo digital de terreno resultante da interpolação das informações batimétricas disponibilizadas para o trabalho.....	38
Figura 18	Fluxograma representativo dos casos a serem criados para a propagação de ondas.....	39
Figura 19	Pontos DOW selecionados para caracterização do clima de ondas da área de estudo, com destaque em vermelho para o ponto escolhido....	56
Figura 20	Histograma da probabilidade de incidência das ondas para todos os pontos DOW selecionados.....	57
Figura 21	Histograma da altura significativa por direção de incidência em (a) condições regulares e (b) condições extremas.....	58
Figura 22	Regressão linear entre as alturas significativas do ponto P1e a média aritmética geral dos pontos analisados em (a) condições regulares e (b) condições extremas.....	59
Figura 23	Estatística descritiva de altura significativa de onda: (a) série temporal de ondas, (b) rosa de direções de onda.....	61
Figura 24	Estatística descritiva de altura significativa de onda: (a) histograma de Hs, (b) função de distribuição de Hs.....	61
Figura 25	Série temporal compreendida entre 1948 e 2009 referente à informações de período de pico.....	62
Figura 26	Estatística descritiva do período de pico: (a) histograma de Tp, (b) função de distribuição de Tp.....	62
Figura 27	Distribuição conjunta entre altura significativa de onda e período de pico.....	63
Figura 28	Diagrama de distribuição conjunta entre: (a) direção de incidência das ondas e altura significativa e (b) direção de incidência das ondas e período de pico. Escalas de cores indicam frequências de ocorrências dos parâmetros em análise.....	63
Figura 29	Gráficos de ajustamento do regime médio anual escalar de (a) Hs, por meio de uma função de distribuição lognormal e (b) Tp, por meio da função de distribuição Gumbel de Máximos.....	65
Figura 30	Ajustes de valores extremos por máximos anuais e distribuição de valores extremos generalizados para (a) Hs e (b) Tp.....	66

Figura 31	Malhas utilizadas na propagação de ondas associadas aos (a) casos com ondas de Leste, (b) casos com ondas vindas de Leste-Sudeste e (c) casos com ondas vindas de Sudeste.....	68
Figura 32	Gráficos de isolinhas de altura significativa (H_s) e vetores de H_s mais topografia, respectivamente, sob (a) e (b) condições de agitação marítima médias em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Leste ($H_s = 1,37$ m; $T_p = 7,99$ s; $\theta = N90^\circ E$).....	71
Figura 33	Gráficos de isolinhas de altura significativa - H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b), sob condições extremas de agitação marítima em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Leste ($H_s = 2,27$ m x; $T_p = 17,78$ s; e $\theta = N90^\circ E$).....	72
Figura 34	Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima média em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Leste-Sudeste ($H_s = 1,5$ m x; $T_p = 7,19$ s; e $\theta = S67,5^\circ E$).....	74
Figura 35	Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima extrema em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Leste-Sudeste ($H_s = 2,34$ m x; $T_p = 11,88$ s; e $\theta = S67,5^\circ E$).....	75
Figura 36	Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima médias em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Sudeste ($H_s = 1,52$ m; $T_p = 6,52$ s; e $\theta = S45^\circ E$).....	76
Figura 37	Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima extremas em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Sudeste ($H_s = 2,20$ m x; $T_p = 9,11$ s; e $\theta = S45^\circ E$).....	77
Figura 38	Correntes longitudinais geradas por ondas incidentes de Leste : (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.....	80
Figura 39	Correntes longitudinais geradas por ondas de incidente de ESE: (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.....	82
Figura 40	Correntes longitudinais geradas por ondas de incidente de SE: (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.....	83
Figura 41	Perfis praias utilizados para o cálculo do transporte longitudinal de sedimento.....	86
Figura 42	Transporte sedimentar médio anual, obtido com série histórica de 1948 a 2009, e calculado com as equações de (a) CERC, (b) Kamphuis e (c) Bayram <i>et al.</i>	90

Figura 43	Análise de ajuste entre as curvas do transporte de sedimento bruto, obtidas para as três equações utilizadas, e o Fluxo médio de energia..	92
Figura 44	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 1, calculados através das equações de (a) CERC, (b) Kamphuis e (c) Bayram <i>et al.</i> .	98
Figura 45	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 4, calculados através das equações de (a) CERC, (b) Kamphuis e (c) Bayram <i>et al.</i> .	98
Figura 46	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 5, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram <i>et al.</i> (2007).....	99
Figura 47	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 9, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram <i>et al.</i> (2007).....	99
Figura 48	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 11, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram <i>et al.</i> (2007).....	100
Figura 49	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 13, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram <i>et al.</i> (2007).....	100
Figura 50	Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 15, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram <i>et al.</i> (2007).....	101
Figura 51	Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação CERC (USACE, 1984), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.....	105
Figura 52	Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação de Kamphuis (1991), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.....	106
Figura 53	Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação de Bayram <i>et al.</i> (2007), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores do diâmetro médio do sedimento para me três posições dos perfis selecionados – Ante-Praia (AT), Estirâncio (ES) e Pós-Praia (PP).....	30
Tabela 2	Velocidade de queda dos grãos para areias de densidade $\rho_s = 2650$ kg/m ³	48
Tabela 3	Coeficientes de calibração obtidos por Mil-Homens <i>et al.</i> (2013) para cada formulação utilizada no trabalho.....	54
Tabela 4	Coordenadas dos pontos DOW selecionados para caracterização do clima de ondas adjacente a região de estudo.....	56
Tabela 5	Probabilidade de ocorrência de altura significativa de onda (Hs) e período de pico (Tp). Os termos 50% e 12 correspondem, respectivamente, ao valor de altura de onda não superado em 50% do tempo e a altura significativa de onda superada 12 horas ao ano.	60
Tabela 6	Parâmetros característicos de regime médio escalar de ondas para altura significativa (Hs) e período de pico (Tp). Para Hs estão associados os parâmetros referentes a média da distribuição (μ), desvio padrão (σ) e o coeficiente de correlação (R^2). Enquanto que para Tp estão associados a moda da distribuição (λ), o parâmetro de escala (δ) e o coeficiente de correlação (R^2).....	65
Tabela 7	Parâmetros de onda utilizados para os casos de propagação. Índices subscritos 50% e 12 correspondem a condições médias e extremas (ou valores superados doze horas ao ano) de estado do mar, respectivamente. O parâmetro γ corresponde ao fator de alargamento do pico e σ_θ ao parâmetro de dispersão angular.....	69
Tabela 8	Profundidade de fechamento característica de cada perfil traçado, bem como os valores de Hs e Tp utilizados como variáveis da equação de Harllermeier.....	80
Tabela 9	Diâmetro médio (D_{50}), parâmetro de forma (A_D) e classificação granulométrica de Wentworth dos sedimentos para cada perfil traçado.....	81
Tabela 10	Fluxo médio de energia e transporte longitudinal de sedimento líquido obtido em m ³ /ano, utilizando-se as equações de CERC, Kamphuis e Bayram <i>et al.</i>	84

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 TRANSPORTE LITORÂNEO DE SEDIMENTO	5
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	12
3.1 DESCRIÇÃO REGIONAL	12
3.1.1 Clima e Regime de Ventos	13
3.1.2 Aspectos Oceanográficos	16
3.1.3 Geologia e Geomorfologia	17
3.2 DESCRIÇÃO DOS SETORES PRAIAS	17
3.2.1 Setor de Estudo I	18
3.2.2 Setor de Estudo II	20
3.2.3 Setor de Estudo III	21
3.2.4 Setor de Estudo IV	24
3.2.5 Geomorfologia Local	24
3.2.6 Informações Sedimentológicas	27
4 METODOLOGIA	31
4.1 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA EMPREGADO	31
4.1.1 Modelo Integral de Morfodinâmica de Praias – Mopla	32
4.1.2 Modelo Espectral de Propagação de Onda – Oluca-SP	33
4.1.3 Modelo de Correntes Induzidas pela Quebra de Ondas – Copla-SP	34
4.1.4 Análise de Longo Prazo aplicada ao Cálculo do Transporte de Sedimento ..	34
4.1 CLIMA DE ONDAS EM PROFUNDIDADES INTERMEDIÁRIAS	34
4.1.1 Base de Dados	35
4.1.2 Seleção do Ponto DOW e Caracterização do Clima de Onda	37
4.2 DADOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS PARA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA.....	37
4.3 MALHAS UTILIZADAS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA.....	38
4.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA	39
4.5 CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS	43
4.6 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS.....	44
4.6.1 Profundidade de Fechamento	46
4.6.2 Caracterização Sedimentológica	47
4.6.3 Formulações Matemáticas Utilizadas para Calcular O Transporte Longitudinal de Sedimento	49

4.6.4 Coeficientes Adimensionais Utilizados nas Formulações.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 CLIMA DE ONDAS AO LARGO DA ÁREA DE ESTUDO.....	55
5.1.1 Estatística Descritiva da Altura Significativa de Onda.....	60
5.1.2 Estatística Descritiva do Período de Pico de Onda.....	61
5.1.3 Distribuição Conjunta Entre Direção de Incidência (Dir), Hs e Tp.....	62
5.1.4 Análise do Regime Médio de Ondas.....	64
5.1.5 Análise do Regime Extremo de Ondas.....	65
5.1.6 Considerações Sobre o Clima de Ondas ao Largo Área de Estudo.....	66
5.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA.....	67
5.2.1 Ondas Associadas a Condições Médias e Extremas de Agitação Marítima ..	69
5.2.2 Considerações Sobre a Propagação de Ondas até a Costa.....	78
5.3 CORRENTES ASSOCIADAS A CONDIÇÕES MARÍTIMAS MÉDIAS E EXTREMAS	79
5.3.1 Considerações Sobre as Correntes Induzidas.....	84
5.4 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO.....	84
5.4.1 Profundidade de Fechamento e Perfis Praiais.....	85
5.4.2 Diâmetro Médio do Sedimento (D_{50}).....	87
5.4.3 Transporte Médio Anual de Sedimento Proveniente de Toda Série Histórica de Onda.....	88
5.4.4 Considerações Sobre o Transporte Longitudinal Médio Anual de Sedimento Proveniente de Toda Série Histórica de Onda.....	92
5.4.5 Variabilidade Sazonal do Transporte Longitudinal de Sedimento.....	97
5.4.6 Considerações Sobre a Variabilidade Sazonal do Transporte Longitudinal de Sedimento.....	102
5.4.7 Evolução Decadal do Transporte Longitudinal de Sedimento.....	103
5.4.8 Considerações Sobre a Evolução Decadal do Transporte Longitudinal de Sedimento.....	108
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
ANEXO I.....	117

1 INTRODUÇÃO

São vários os fatores que influenciam os processos atuantes sobre os ambientes costeiros, condicionando a evolução da linha de costa e suas diversas feições. As principais modificações estabelecidas nesse tipo de ambiente são provenientes de fenômenos resultantes da interação entre componentes energéticos (tais como vento, correntes e ondas) e materiais (como o sedimento e água) e podem ser entendidas como um mecanismo de retroalimentação, uma vez que as modificações geomorfológicas alteram os processos hidrodinâmicos que, por sua vez, afetam e condicionam as feições costeiras (BIRD, 2008).

O transporte litorâneo de sedimentos, conduzido pela dinâmica dos fluidos, é fator condicionante para a ocorrência de mudanças morfológicas em zonas costeiras (COWELL e THOM, 1994). Dependendo das potencialidades de movimento e transporte envolvidos nesse fenômeno e das características físicas do sedimento, significativos processos erosivos e de sedimentação podem ser desencadeados. Esses efeitos podem decorrer em escalas temporais de curto ou longo prazo, porém, quanto mais intensa for a ocupação e o desenvolvimento de atividades antrópicas nas regiões costeiras, mais perceptíveis são os seus impactos.

Portanto, o conhecimento e a capacidade de se prever o transporte de sedimento litorâneo é essencial para a elaboração de projetos, bem como para auxiliar a tomada de decisões estratégicas de gerenciamento costeiro.

Por estarem localizadas em uma faixa de transição, na qual atuam processos atmosféricos, terrestres e marinhos, as zonas costeiras são caracterizadas por sua dinâmica complexa e diferenciada, além de integrarem ambientes altamente sensíveis.

Atrelado às suas especificidades naturais, o crescimento acelerado e mal planejado da ocupação humana nessas zonas, seja por causas econômicas ou socioambientais, põe em risco a sua estabilidade ecológica e comprometem sua capacidade de resiliência. Os efeitos adversos potencialmente causados por estas alterações podem apresentar-se em diferentes escalas espaço-temporais e modificar significativamente a paisagem local.

Uma das causas mais comuns, resultante da complexa interação entre a dinâmica natural e as ações antrópicas em um ambiente costeiro, é o processo de erosão, sendo a forma mais visível da manifestação desse fenômeno dado pela

recessão da linha de costa (CHARLIER e DE MEYER, 1998). Dentre as possíveis medidas mitigadoras para a prevenção e remediação dos impactos estabelecidos em regiões litorâneas devido à erosão estão as técnicas de engenharia *hard* e *soft*. A primeira consiste na instalação de estruturas rígidas de proteção, a exemplo de espigões, diques e enrocamento, enquanto a segunda apresenta como vantagem a capacidade de acomodação às mudanças dinâmicas do ambiente, criando condições para o reestabelecimento natural do seu equilíbrio, a exemplo de engorda de praia e *management realignment*.

Nesse estudo, a região definida como área de trabalho contempla praias com diferentes graus de urbanização. Dentre as praias susceptíveis aos efeitos da urbanização estão a praia de Ponta Negra, praia de Areia Preta, praia dos Artistas e a praia do Meio. O trecho de praia defronte à Via Costeira e à Praia do Forte, apesar de estarem inseridas nas proximidades de Zonas de Proteção Ambiental (ZPA) e em área de domínio militar (especificamente nas imediações da praia do Forte), ainda são influenciadas por interferências antrópicas. A partir da década de 1920, principalmente as praias de Areia Preta, dos Artistas e do Meio começaram a ser ocupadas por veranistas, se tornando, posteriormente, em alguns dos principais pontos de interesse turístico e lazer da cidade, o que culminou com a construção de vários equipamentos urbanos a exemplo de casas de veraneio, hotéis e edifícios de alto padrão. No entanto, atualmente o principal corredor turístico da cidade Natal é a Praia de Ponta Negra e os hotéis presentes na Via Costeira (SEMURB, 2010a e 2010b).

Os constantes agravos à costa provenientes de eventos erosivos podem ser constatados pela presença de estruturas de defesa à agitação marítima ao longo da área de estudo. Nesse aspecto, vale-se ressaltar a situação da Praia de Ponta Negra, a qual, durante os últimos quatro anos, vem sofrendo sérios agravos principalmente em suas imediações mais urbanizadas (AMARO *et al.*, 2014).

A partir da década de 80 a urbanização nas proximidades da Praia de Ponta Negra começou a se desenvolver intensivamente. Desde então, muitas construções foram implantadas, favorecendo a ocupação da costa e aumentando consideravelmente sua densidade populacional (BUSMAN *et al.*, 2013).

Associadas a causas naturais, a exemplo da característica morfológica de baía em forma de zeta, uma intensa deriva litorânea unidirecional de sul para norte (DINIZ, 1998; VITAL, 2006) e a ocorrência de estados do mar mais energéticos, a

ocupação da orla da Praia de Ponta Negra, sem o adequado reconhecimento das características geológico-geomorfológicas, sobretudo no quadro de interação com a dinâmica dos processos costeiros entre o sistema praia-duna, favoreceram um avançado quadro de erosão que se acentuou ainda mais durante os anos de 2011 e 2012. Os principais agravos foram constatados durante o período de outono-inverno, porém, em um contexto geral, o somatório desses fatores resultou na destruição de equipamentos urbanos desde o Morro do Careca (principal feição morfológica da praia) até os hotéis instalados na via costeira, além de intensificarem problemas ambientais crônicos (AMARO *et al.*, 2012a).

Visando a proteção das áreas afetadas pelo processo de erosão contra posteriores danos à região urbanizada da praia, foi proposta a realização de uma obra emergencial de enrocamento, iniciada em 24 de Abril de 2013 e atualmente finalizada.

A revitalização e a definição do tipo de intervenção mais adequada para esse trecho da orla costeira de Natal, bem como o conhecimento integrado dos processos costeiros atuantes neste e nos demais trechos da costa, se tornam ainda mais importantes quando se é considerado: a relevância de toda essa região para a economia do estado, uma vez que se apresenta como área de relevante interesse turístico, com potencialidade para a instalação de grandes obras civis; os prejuízos aos cofres públicos quando da não eficácia de projetos propostos; prejuízos ambientais por meio da degradação do ambiente natural; e os prejuízos sociais devido às alterações dos serviços ecossistêmicos e aos riscos impostos à população usuária da praia.

Portanto, considerando que a taxa do transporte longitudinal é, provavelmente, o fator mais importante (e a maior incógnita) no projeto de estruturas que impeçam substancialmente o fluxo de sedimentos ao longo de uma costa (WHITE, 1998), e que, agentes hidrodinâmicos como ondas e correntes são os principais indutores da dinâmica sedimentar, a determinação e compreensão desses processos consistem em atividade essencial para a durabilidade, segurança e custo de projetos, além representar uma importante fonte de informação para os gestores tomadores de decisão, auxiliando, sobretudo, subsequentes programas de monitoramento ambiental.

Este estudo tem como proposta avaliar a taxa de transporte longitudinal de sedimento (TLS), bem como os agentes hidrodinâmicos indutores desse processo,

ao longo de região localizada na zona costeira do litoral sul de Natal. Apesar da resposta dos processos hidrodinâmicos e do TLS serem tratados de forma integrada sobre a região de estudo, será dada uma maior atenção à região mais urbanizada da praia de Ponta Negra, na qual estão sendo efetuadas intervenções para conter agravos provenientes de processos erosivos. Como ferramenta foi utilizado o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) (IH-CANTABRIA, 2013a), o qual integra uma série de modelos apropriados para serem utilizados ao longo do litoral brasileiro.

Dentre os principais objetivos do trabalho se enquadram a caracterização do clima de ondas ao largo da área de estudo, a determinação dos campos de onda e corrente por meio de modelagem numérica, a comparação de resultados de TLS médios anuais provenientes de três diferentes formulações incorporadas ao SMC-Brasil - (CERC (USACE, 1984); Kamphuis (KAMPHUIS, 1991); e Bayram (BAYRAM *et al.*, 2007) - como subsídio para definir qual formulação melhor se aplica a área de estudo e avaliações da variabilidade sazonal e da evolução decadal do TLS.

Este trabalho se encontra organizado em 6 capítulos. No presente capítulo (Capítulo 1) são apresentados o tema principal do estudo, as motivações e justificativas que conduziram a escolha do tema e da área de trabalho, além dos objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2 é feita uma breve discussão dos conceitos e principais mecanismos e características envolvidos no TLS. São ainda apresentados estudos enquadrados nessa mesma linha de raciocínio, com abordagens importantes a respeito dos aspectos construtivos desse trabalho.

No capítulo 3 é realizada a descrição regional e local da área de estudo, a qual contempla, além de outros levantamentos, informações meteoceanográficas e morfológicas. No capítulo 4 são apresentados os principais modelos e equações utilizados, além dos procedimentos metodológicos para implementação da atividade de modelagem.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os principais resultados a respeito do clima de ondas ao largo da região de estudo, da propagação dos campos de onda e corrente, e das diferentes abordagens propostas para analisar o TLS. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões a cerca dos temas abordados no trabalho, além de serem apontadas algumas sugestões para estudos posteriores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e mecanismos físicos associados ao transporte de sedimento, além de trabalhos relevantes e a cerca do tema tratado e particularmente importantes para a construção do presente estudo.

2.1 TRANSPORTE LITORÂNEO DE SEDIMENTO

O transporte litorâneo pode ser definido como o movimento de sedimento próximo à costa devido aos efeitos das ondas e correntes. Este pode ser dividido em duas classes gerais: o transporte paralelo à costa (transporte longitudinal) e o transporte perpendicular à costa (transporte transversal). O movimento de sedimento transportado ao longo da costa é denominado deriva litorânea e a sua interrupção, seja por causas naturais ou induzidas pelo homem, pode alterar o equilíbrio existente em determinado ambiente, seja a longo ou curto prazo, ocasionando ou acelerando processos erosivos e resultando em prejuízos econômicos e ambientais (USACE, 1984).

Um típico exemplo dos possíveis efeitos oriundos de intervenções em ambientes costeiros sem o prévio conhecimento a respeito da dinâmica natural característica de uma determinada região (em especial o transporte de sedimentos), foi o ocorrido na Costa de Santa Barbara na Califórnia, em 1927, onde a construção de um quebra-mar, com o objetivo de fornecer proteção a um porto, represou quantidade de areia suficiente (aproximadamente 200.000 m³) para formar a Praia de Leadbetter, além de causar sérios problemas de erosão em áreas adjacentes (DEAN e DALRYMPLE, 2002).

Como já citado, o transporte de sedimentos pode ocorrer nos sentidos longitudinal e transversal em relação à linha de costa. E apesar desse último ter capacidade de mover grandes quantidades de sedimento, o mesmo se dá, ora na direção continente-oceano, ora na direção oceano-continente, de modo que a resultante anual é praticamente nula (FONTOURA, 2004). Já o transporte longitudinal ocorre como resultado de dois fenômenos: a suspensão do sedimento, resultante da quebra das ondas, que liberam uma grande quantidade de energia; e o seu transporte, resultante da incidência oblíqua das ondas sobre a linha de costa, gerando uma corrente conhecida como corrente longitudinal (SPROVIERI e FONTOURA, 2012).

Dependendo do tamanho das partículas do leito marinho e das condições do fluxo, o transporte de sedimentos pode ser realizado como uma carga de fundo ou em suspensão. A soma desses dois tipos de transporte é denominada - transporte total. Em termos gerais, são três as formas de deslocamento das partículas: rolamento ou deslizamento, saltos e em suspensão. Quando a transferência da quantidade de movimento do fluido para o leito marinho supera a tensão tangencial crítica existente entre as partículas e o fundo, essas são postas em movimento na forma de rolamento ou deslizamento, mas sempre em contato com o leito. Aumentando-se as resultantes gravitacionais e, conseqüentemente, as tensões tangenciais, algumas partículas podem se mover na forma de saltos, formando uma camada de fluido-sedimento próximo ao leito. Quando o valor da velocidade de corte (associada às características geométricas da seção de escoamento) excede a velocidade de queda das partículas, estas podem ser levantadas do leito até uma determinada altura, onde o cisalhamento das correntes e as forças turbulentas geradas pelas ondas são superiores ao seu peso e as colocam em regime de suspensão (IH - CANTABRIA, 2000).

O transporte longitudinal de sedimento ainda pode ocorrer tanto na zona de surfeo (região onde ocorre a quebra das ondas) quanto na zona de espraiamento (região alternadamente coberta pela subida e descida das ondas). Segundo Elfrink e Baldock (2002), a hidrodinâmica e o transporte de sedimento nesta última zona são importantes por uma diversidade de razões, das quais podem ser citadas: os efeitos erosivos em falésias e dunas e os mecanismos que determinam a capacidade de recuperação das praias após eventos de tempestade. Contudo, os mesmos autores citam que, devido às dificuldades de se realizar medições de campo de alta qualidade e da complexidade dos processos costeiros na zona de espraiamento, os mecanismos de transporte nesta, tradicionalmente, tem recebido menos atenção do que na zona de surfe.

Tipicamente, o transporte longitudinal de sedimentos é preponderante na zona de surfe (KRAUS *et al.*, 1982; KUMAR *et al.*, 2003). E apesar da maioria das técnicas e equações utilizadas para determinar essa taxa de transporte levarem em consideração a movimentação total de sedimento, o transporte em suspensão configura-se como o mais importante dentro desta zona (FONTOURA, 2004). Contudo, nas praias arenosas, esses dois tipos de movimentação são importantes, fato que não acontece nas praias dominadas por cascalho, por exemplo, em que,

para grãos de cascalho com diâmetro maior que 2 mm, o transporte pode ser considerado inteiramente como movimento de fundo (SOULSBY e DAMGAARD, 2005).

De fato, as principais formulações desenvolvidas para o cálculo do transporte de sedimento levam em consideração os transportes em suspensão e o de fundo justamente por terem sido desenvolvidas para praias arenosas (TOMASICCHIO *et al.*, 2013). Segundo Wellen *et al.*, (2000), a maior concentração de pesquisas e do consequente desenvolvimento de modelos e equações para as praias arenosas ocorreu como resultado da conhecida capacidade de defesa natural das praias dominadas por cascalho contra agentes hidrodinâmicos.

Informações a respeito da taxa de transporte de sedimento são essenciais para uma eficiente prática de gerenciamento costeiro. No entanto, essa é uma tarefa complexa, pois, além de considerar a interação dos processos hidrodinâmicos (marés, ondas e correntes), ainda devem ser avaliados os efeitos dos ventos, da turbulência gerada pelas ondas, da topografia, as características do sedimento, dentre outros fenômenos da zona litorânea (BAKHTYAR *et al.*, 2008; CAMENEN e LARROUDÉ, 2003).

Ao longo das últimas décadas foram e têm sido desenvolvidas várias formulações e técnicas para estimar o transporte de sedimento em zonas costeiras. Tomasicchio *et al.*, (2013) apresenta uma possível classificação dos métodos de sedimento de transporte, os quais são separados em três tipos:

- Os métodos energéticos, que podem ser divididos em dois subtipos:
 - A abordagem de fluxo de energia (por exemplo; INMAN e BAGNOLD, 1963; KOMAR, 1969; KOMAR e INMAN, 1970; CERC (USACE, 1984)); BAYRAM *et al.*, 2007) desenvolvidos especificamente para o transporte de sedimento costeiro;
 - E a abordagem do poder de escoamento (por exemplo: BAGNOLD, 1963, 1966; BAILARD, 1981), com aplicações mais gerais, incluindo ambientes fluviais;
- O método de equilíbrio de forças (por exemplo: FRIJLINK, 1952; BIJKER, 1967 e 1992; DAMGAARD e SOULSBY, 1996;);
- E os métodos obtidos a partir de análises dimensionais de parâmetros considerados importantes para o transporte de sedimentos (VAN DER

MEER, 1990; KAMPHUIS, 1991; SCHOONEES e THERON, 1993, dentre outros).

Dentre as fórmulas apresentadas, a mais utilizada na prática de engenharia costeira para o cálculo da taxa do transporte de sedimento longitudinal é a equação CERC (USACE, 1984), desenvolvida para ambientes de praia dissipativas de areia, havendo a necessidade de ser calibrada para ser utilizada em praias com sedimento mais grosseiros (BAYRAM *et al.*, 2007 ; TOMASICCHIO *et al.*, 2013).

Contudo, devido à existência de um grande número de fórmulas para o cálculo do transporte de sedimento, avaliar qual delas melhor se aplica a uma determinada área de estudo ou a um objetivo específico, consiste em um procedimento essencial quando se quer obter resultados ou previsões confiáveis.

A confiabilidade das equações de transporte de sedimento é verificada através de comparações com dados de campo ou de laboratório. Embora isto seja especialmente verdade para os métodos empíricos, até mesmo a mais sofisticada das formulas necessita de verificação (SCHOONEES e THERON, 1993). Além disso, uma base de dados de campo é essencial para calibrar fórmulas e modelos numéricos. Geralmente, testes de verificação realizados para certifica-se de que os modelos reproduzem resultados confiáveis para um local específico, acabam por altera-lo ou refina-lo (WHITE, 1998).

Dentre as técnicas e instrumentos para a coleta de dados em campo estão: o acúmulo de areia em molhes e quebra-mares; traçadores de areia (*sand tracers*); armadilhas de sedimentos (*sand traps*); sensores ópticos de retroespalhamento (OBS – *optical backscatter sensor*); sensores acústicos e medidores acústicos e eletromagnéticos de corrente (MILLER, 1999). O desenvolvimento de tais técnicas, principalmente das três últimas citadas, tem possibilitado avanços na capacidade de medir concentrações de sedimento na coluna de água, no reconhecimento das características do leito marinho e na compreensão dos processos envolvidos na interação fluido-sedimento (MILLER, 1999).

De um modo geral, métodos de previsão podem ser agrupados em uma das seguintes categorias: experiências observacionais, modelos físicos e modelos numéricos (SOULSBY, 1997). Quando devidamente calibrados, os modelos numéricos se apresentam como uma importante ferramenta de simulação e previsão. As vantagens de se utilizar tais modelos vão além da possibilidade de se obter resultados confiáveis. Muitas vezes, é impossível a realização de experimentos

em laboratórios ou através de outros métodos, seja pela dificuldade em se representar as características reais da área de estudo ou pelos altos custos e a necessidade de longos períodos de tempo envolvidos em todo o processo.

Na região do presente trabalho são poucos os estudos desenvolvidos no que se refere ao tema transporte de sedimentos. Contudo, cabe-se citar o trabalho realizado por Valentini de Souza (1981). O autor avaliou o transporte potencial de sedimento em um único perfil praiial próximo ao Pontal de Mãe Luiza, por meio das equações de Cadwell (1956), Komar II (KOMAR e INMAN (1970)), CERC (USACE, 1984), Castanho (1966), Bijker (1967) e Swamby (SWART (1976a e 1976b)). Para isso foram utilizadas informações batimétricas da carta DHN-810 de setembro de 1972, da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil, nas proximidades do Porto de Natal, e de agitação marítima e granulometria cedidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). As informações de agitação foram obtidas por ondógrafo de pressão em campanha de 4 registros diários de 15 minutos no período de abril de 1977 a março de 1978. Analisando as características de cada fórmula e suas aplicações à área de estudo, o autor concluiu que o transporte de sedimento para a região seria da ordem de 500.000 a 700.000 m³/ano de sentido S-N, sendo melhor estimado pelas fórmulas de Cadwell, CERC, Castanho, Komar II e Swamby. Contudo, também foram calculados valores da ordem de 900.000 e 1.100.000 m³/ano.

Araújo e Alfredini (2001) realizaram o cálculo da vazão de sedimentos longitudinal das praias de Suarão e Cibratel, município de Itanhaém-SP, utilizando as fórmulas Cadwell (1956), Kamphuis (1991) e Kamphuis aprimorada por Schoonees e Theron (1996). Os dados de onda utilizados nas fórmulas foram obtidos através de cálculos de empinamento e refração de onda, registradas em uma campanha de medições na praia de Una (Juréia) entre o período de 1982 a 1985. Os resultados obtidos apresentaram variações significativas. Tanto para a praia de Suarão, quanto para a de Cibratel, foi constatado que a fórmula de Kamphuis (1991) gerou as menores taxas de TLS, correspondente a 353.000 m³/ano e 352.000 m³/ano, respectivamente, enquanto que a fórmula de Schoonees e Theron (1996) gerou as maiores taxas, 547.000 m³/ano e 545.000 m³/ano, respectivamente.

Bayram *et. al.*, (2001), avaliaram a capacidade preditiva de seis conhecidas fórmulas de transporte de sedimento (BIJKER, 1967, 1971; ENGELUND e HANSEN

,1967; ACKERS e WHITE, 1973; BAILARD e INMAN, 1981; VAN RIJN ,1984a, 1984b e 1984c; e WATANABE, 1992), adaptadas para calcular a distribuição transversal do transporte litorâneo com base em três conjuntos de dados de campo: DUCK85, SUPERDUCK e SANDYDUCK. Nesse estudo, foi verificado que a formula de Van Rijn (1984 a, b e c), apresentou as previsões mais confiáveis sobre a faixa de situações de *swell* e condições de tempestade; A equação de Watanabe (1992) também produziu boas previsões para condições de tempestade, porém superestimou o transporte em condições de onda do tipo *swell*. Enquanto que a formulação proposta por Bailard e Inman superestimou o transporte em todas as condições de onda.

Camenen e Larroudè (2003) analisaram os limites de aplicabilidades de algumas formulas (BIJKER, 1968; VAN RIJN, 1984a, 1984b e 1984c e 1989; BAILARD, 1981; DIBAJNIA e WATANABE, 1992; e RIBBERINK, 1998), em relação aos principais parâmetros envolvidos no transporte de sedimentos, tais como a velocidade orbital das ondas, seu período, a granulometria do sedimento, dentre outros, e encontraram importantes discrepâncias entre os resultados obtidos.

Esteves *et al.*, (2009) desenvolveram um modelo para calcular o TLS total baseado em uma metodologia mais robusta (LT-MOD), porém aplicada a situações em que os dados de campo disponíveis sejam limitados, e o comparou com três conhecidas formulas para quantificar a taxa de TLS total (CERC (USACE, 1984); KAMPHUIS, 1991; e BAYRAM, 2007). O estudo foi desenvolvido utilizando experimentos de campo realizados nas linhas de costa do Brasil, de Portugal e da Dinamarca. Os resultados obtidos mostraram que, o LT-MOD, apesar de considerar suposições simplificadas a cerca da distribuição de sedimento e das propriedades de onda, quando comparado às outras formulas, apresentou respostas bem semelhantes, principalmente com relação a formula de Bayram (2007), considerada a mais completa das equações estudadas, uma vez que abarca uma série de propriedades não contempladas nas outras duas.

João Mil-Homens *et al.*, (2013) analisaram a habilidade preditiva das três formulas mais comumente utilizadas para o calculo do TLS (CERC (USACE, 1984); KAMPHUIS, 1991; e BAYRAM, 2007), avaliadas através do mais extenso banco de dados atualmente disponível, apresentado em (BAYRAM *et al.*, 2007). A calibração dos coeficientes das três formulas foi aperfeiçoada por meio de um algoritmo de otimização de mínimos quadrados, resultando em melhoras significativas com

relação as suas capacidades preditivas, verificadas através de métodos estatísticos. A performance das três equações foram bem similares, contudo Kamphuis (1991) apresentou melhores respostas, seguida de Bayram *et. al.*, (2007).

Gomes e Silva (2014) aplicaram o software SMC-Brasil à praia de Candeias, localizada na região Metropolitana de Recife, para simular mudanças na circulação longitudinal de sedimento e sua conseqüente influência sobre a morfologia praial devido à existência de um quebra-mar. Para calcular as taxas de transporte de sedimento foi empregada a equação de CERC (USACE, 1984) e adotado o coeficiente adimensional Del Valle *et al.*, (1993). As simulações numéricas realizadas com diferentes configurações do quebra-mar responderam muito bem à dinâmica costeira observada na região. Os resultados obtidos contribuíram significativamente para o entendimento da erosão costeira estabelecida na região.

Apesar das vantagens associadas ao uso de modelagem numérica, como já citado, muitas vezes se faz necessária sua validação e calibração por meio de informações confiáveis e de longo prazo intrínsecas da área de estudo. Neste trabalho, apesar da escassez de dados para esse tipo de procedimento, foi utilizado um sistema de modelagem no qual se encontra integrado uma base de dados devidamente calibrada e validada para ser utilizada na elaboração de projetos ao longo da zona costeira brasileira.

Informações a respeito da base de dados, das equações de transporte de sedimento efetivamente utilizadas nesse trabalho, bem como dos modelos numéricos aplicados, tanto para a propagação de ondas e correntes, quanto para o TLS, serão tratadas de forma mais detalhada nos tópicos subsequentes referentes aos procedimentos metodológicos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo é feita uma breve caracterização da área de estudo baseada fundamentalmente em dados secundário provenientes de estudos pretéritos. Dentre as informações contempladas, fazem parte descrições relacionadas a aspectos climáticos, oceanográficos e geomorfológicos. Em um primeiro momento realiza-se uma abordagem a nível regional, para então serem discretizados os setores praias selecionados para a aplicação desse estudo.

3.1 DESCRIÇÃO REGIONAL

A região de estudo contemplada nesse trabalho localiza-se no município de Natal, o qual se encontra inserido no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte (RN) no Nordeste do Brasil (Figura 1), fazendo limite ao norte com Extremoz; ao Sul com Parnamirim; ao Oeste com São Gonçalo do Amarante e Macaíba; e ao Leste com o oceano Atlântico. Apresenta uma área de aproximadamente 170,30 km² e abriga uma imensa gama de ecossistemas tais como estuários, restingas, dunas, falésias e baías, como é comum ao longo da zona costeira brasileira. (SEMURB, 2010a).

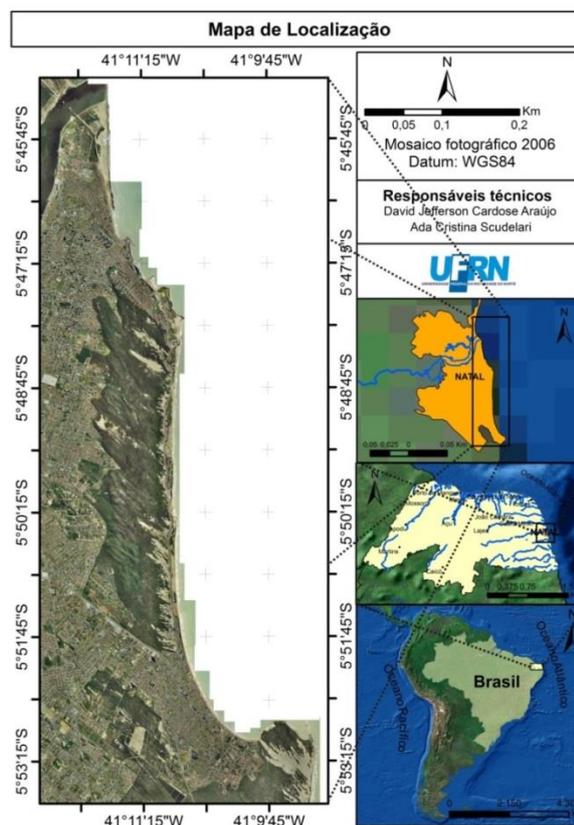


Figura 1. Mapa de localização de toda a zona costeira selecionada para o estudo.

O litoral do Rio Grande do Norte, baseado na sua localização geográfica, pode ser subdividido em dois setores específicos: o setor oriental, onde a linha de costa apresenta uma direção preferencial na direção Norte-Sul; e o setor setentrional, em que a linha de costa se apresenta na direção Leste-Oeste. O litoral Oriental, onde se localiza a área de estudo, é limitado ao sul pela praia do Sagi, município de Baía Formosa (divisa do RN com PB), e ao norte pelo Cabo Calcanhar, município de Touros. Sua extensão é de 166 km e representa 41% do litoral do RN, distribuídos em 101 km (61%) de praias arenosas planas e estreitas, e 65 km (39%) de falésias ativas, resultantes da chegada dos tabuleiros costeiros da Formação Barreiras até o mar (VITAL, 2006).

3.1.1 Clima e Regime de Ventos

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da cidade de Natal é do tipo **As**, caracterizado como tropical úmido apresentando precipitações de outono-inverno (ANDRADE, 1977). As chuvas, de ocorrência rápida e moderada, se concentram principalmente entre os meses de Abril a Agosto. Além disso, o clima da região apresenta uma série de modificações interanuais associadas aos fenômenos El Niño e La Niña, fator determinante para a ocorrência de períodos mais ou menos chuvosos ao longo dos ciclos anuais (AMARO *et al.*, 2012b).

De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir da estação meteorológica A – 304, localizada em Natal, no período de 1961 a 1990, observa-se maiores índices pluviométricos médio mensais entre os meses de março e julho, com variação de aproximadamente 15 a 270 mm (Figura 2). Para o mesmo período, verifica-se uma variação de temperatura pouco significativa, com decréscimo desse parâmetro a partir do mês de março e aumento a partir do mês de agosto, com média mensal mínima de 24,3°C e máxima de 27,2°C, aproximadamente (Figura 3).

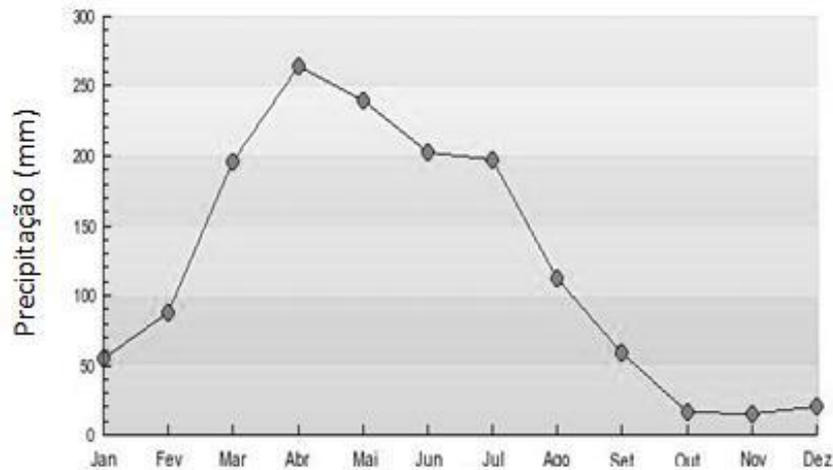


Figura 2. Precipitação média mensal obtida a partir da série de dados dos anos de 1961 a 1990, coletados na estação Meteorológica A-304, localizada em Natal. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/mapaEstacoes>

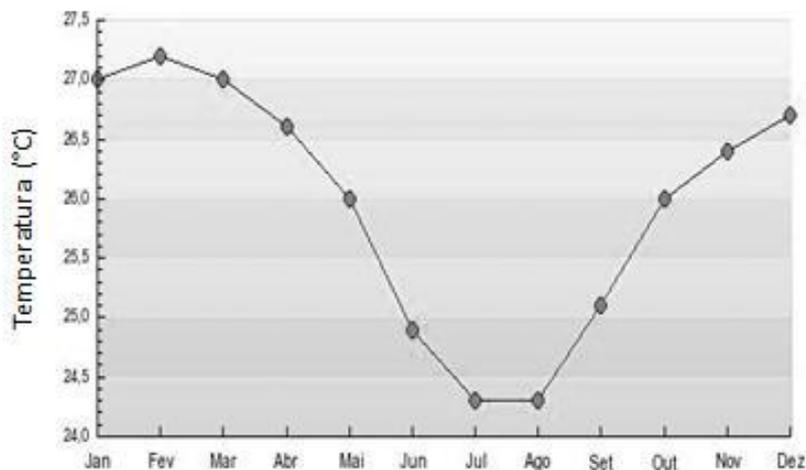


Figura 3. Temperatura média mensal obtida a partir da série de dados dos anos de 1961 a 1990, coletados na estação Meteorológica A-304, localizada em Natal. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/mapaEstacoes>

Como apresentado em Amaro *et al.*, (2012b), os ventos da região são provenientes principalmente do quadrante SE, com uma variância sazonal entre leste-sudeste (ESE), sul-sudeste (SSE) e sul (S), e direção controlada pela Zona de Convergência Intertropical, a qual influencia fortemente os ventos alísios de SE no Nordeste do Brasil. A partir da análise de dados provenientes desta mesma estação meteorológica citada a pouco, para os anos de 2010 a 2012, o mesmo autor observou uma variação sazonal e nictimeral de velocidade (com faixa de valores compreendidos entre 2 e 10 m/s), sendo os meses de julho a outubro caracterizados pelos maiores registros. Para o período de 01/01/2014 a 03/12/2014, verifica-se uma

predominância de ventos do quadrante SE (direção variando de 90° a 180°) (Figura 4), com velocidade variando de 2 a 8 m/s (Figura 5).

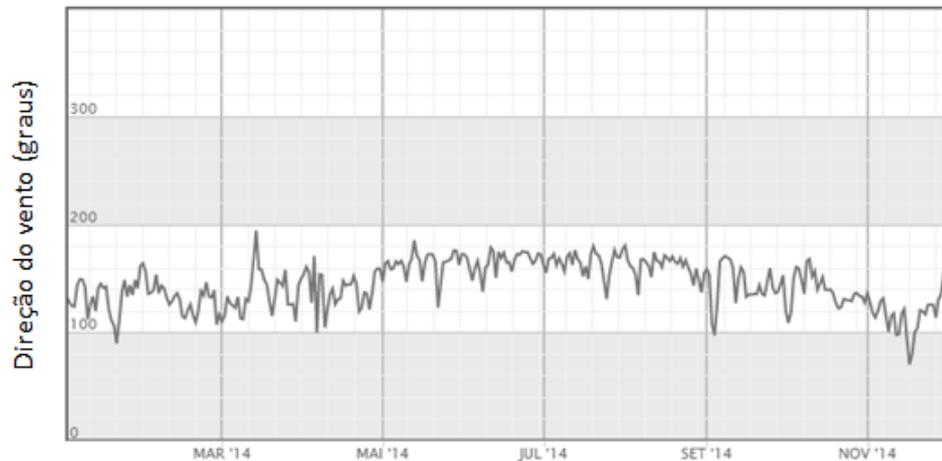


Figura 4. Direção dos ventos compreendida entre o período de 01/01/2014 a 03/12/2014, proveniente de dados coletados na estação A-304, Natal/RN, pelo INMET. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>

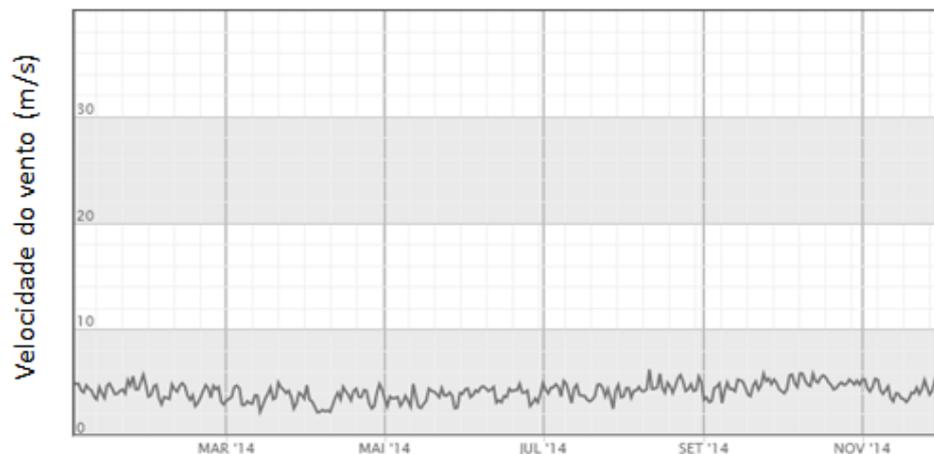


Figura 5. Velocidade dos ventos compreendida entre o período de 01/01/2014 a 03/12/2014, proveniente de dados coletados na estação A-304, Natal/RN, pelo INMET. Fonte: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>.

Especificamente para o litoral oriental do Estado, o clima é caracterizado como úmido e sub-úmido, com médias anuais pluviométricas situando-se acima de 1200 mm para a zona situada entre os municípios de Baía Formosa e Nísia Floresta, e entre 800 e 1200 mm para as regiões que se estendem de Parnamirim/Natal a Touros, podendo exibir variações associadas aos fenômenos de El Niño e La Niña (SEPLAM, 2013).

3.1.2 Aspectos Oceanográficos

Com relação às marés, na região próxima ao Porto de Natal prevalece o regime de mesomarés, com variação média de 2,4 - 0,2 metros nas marés de sizígia e 1,9 - 0,8 metros nas marés de quadratura, com padrão normal de duas preamaras e duas baixamar por dia (AMARO *et. al.*, 2012b). O nível médio do mar para a região, de acordo com a carta náutica DHN/MB, nº 810, é de 1.3 m.

Estudos que contemplam a caracterização do clima de ondas no litoral de Natal indicam a predominância de propagação nas direções SE e leste (AMARAL, 2000; AMARO *et al.*, 2012b). Cunha (2004), baseado nos registros de dois anos de medidas (1998-1999) das alturas de ondas, realizadas na estação ondográfica Leste-Reis Magos, a uma profundidade média de 14 m, pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH) e da HIDROCONSULT S.A, relata ondas de curto período apresentando uma distribuição homogênea, caracterizada por uma função lognormal, com altura média de 1,14 m, com período mais frequente de 6,2 s e uma média de 6,4 s. Os registros foram obtidos com um ondógrafo de pressão marca OSPOS 62-B2, fabricado pela Van Essen, nas coordenadas (5°46'05''S e 35°11'01''W). O mesmo autor ainda ressalta alternâncias nas condições energéticas ao longo do ano, com um período de menor energia de dezembro a maio, e outro de maior, entre junho e novembro, com alturas entre 0,4 e 2,6 m, além de uma combinação de ondas do tipo *swell* e *sea*, sendo mais pronunciada as do tipo *sea*. Com relação a distribuição direcional, ele observou que as ondas de maior energia estão relacionadas principalmente com as de direção ESE e, secundariamente, com o rumo Leste.

Rosman e Scudelari (2009), através de modelagem numérica, verificaram a ocorrência de velocidades de corrente em torno de 0,05 a 0,30 m/s, com direção predominante de sul para norte, ao largo da porção do litoral que vai da praia de Ponta Negra à praia do Forte. Em regiões mais próximas da costa na praia de Ponta Negra e no trecho de praia defronte a Via Costeira, observaram influência de intensidades situadas em torno de 0,05 e 0,10 m/s, enquanto que para região delimitada pela Ponta de Mãe Luiza e a praia do Forte, foram verificadas maiores velocidades de corrente, chegando a 0,3 m/s. Resultados semelhantes foram obtidos por meio de medições *in situ*, nas quais se utilizou perfilador acústico *Aquadopp-Profiler®* da Nortek A.S., para o período de 01/10 a 05/10/2014, nas

proximidades da praia de Ponta Negra, no ponto geográfico (5°52'48.20"S; 35° 10'54.99"W) (AMARO *et al.*, 2012b).

3.1.3 Geologia e Geomorfologia

Este setor do litoral compreende uma faixa sedimentar onde se localiza o contato, ainda não definido, entre as bacias Potiguar e Pernambuco-Paraíba (VITAL, 2006). Uma característica morfológica marcante é a sequência de baías em forma de zeta, sendo mais pronunciada em áreas ao sul de Natal (DINIZ, 1998). Além disso, são verificadas rochas sedimentares do Cretáceo, recobertas por rochas do Grupo Barreiras e sedimentos Quaternários como dunas, terraços marinhos e aluvionares e coberturas arenosas diversas. Quanto as feições geomorfológicas, são encontradas praias arenosas relativamente planas e estreitas, falésias ativas, tabuleiros costeiros, campos de dunas móveis e vegetadas, linhas de recife de arenitos de praia e planícies flúvio-estuarinas. (VITAL, 2006).

3.2 DESCRIÇÃO DOS SETORES PRAIAIS

A área de estudo selecionada para a realização desse trabalho abrange a zona costeira frontal da cidade de Natal entre a praia de Ponta Negra e a praia do Forte. De forma a facilitar a análise e discussão dos processos hidrodinâmicos estabelecidos nessa porção do litoral, esse trecho foi subdividido em quatro setores: o setor I se estende desde a Praia de Alagamar, por trás do Morro do Careca, até o Hotel SERHS, localizado no início da via costeira, apresentando aproximadamente 5.7 km; o setor II se estende desde o Hotel SERHS até a Ponta de Mãe Luiza, no final da Via Costeira, apresentando 6.76 km; o setor III se estende da Ponta de Mãe Luiza a praia dos Artistas, com aproximadamente 3,1 km, e o setor IV que abriga as praias do Meio e do Forte, com extensão aproximada de 2,87 km. Os quatro setores totalizam então a extensão de 18,43 km (Figura 6).

Na figura 6 se encontram delimitados os setores praias selecionados para aplicação desse estudo, discriminados por diferentes tonalidades de cores, além de alguns elementos morfológicos de referência para esse trecho do litoral. Uma descrição mais detalhada a cerca dos principais elementos morfológicos e das praias englobadas em cada setor se encontra apresentada nos tópicos que se seguem.

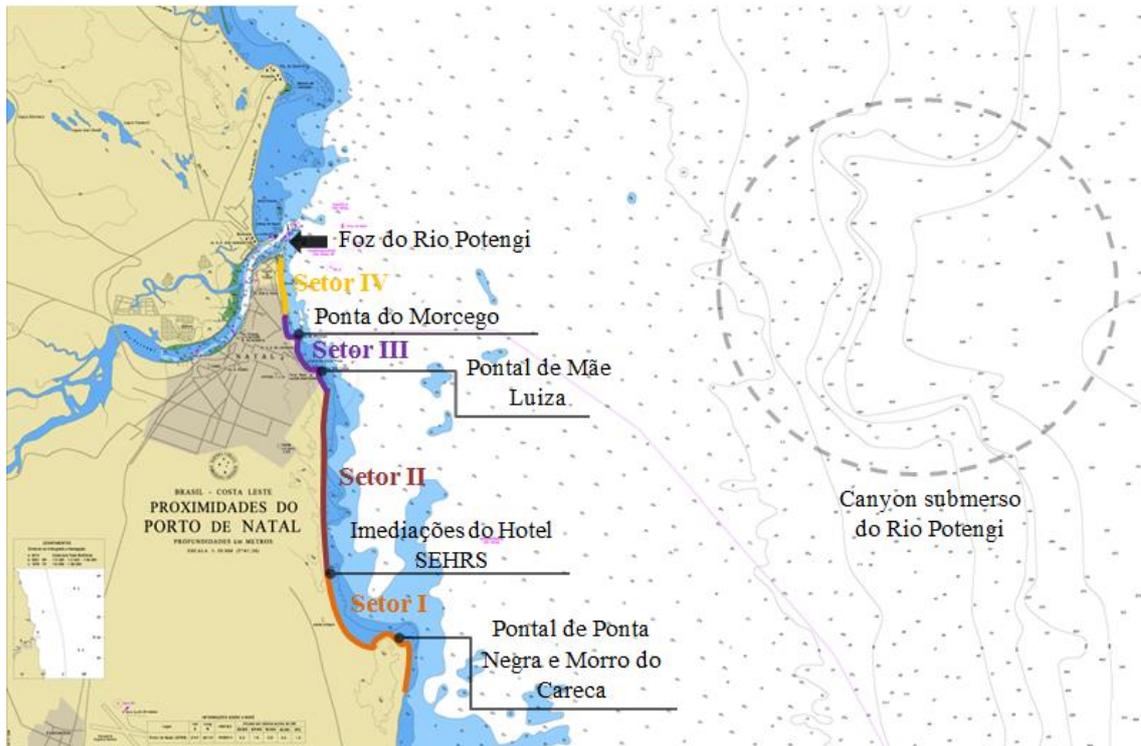


Figura 6. Delimitação dos setores praias estudados, discriminados por diferentes tonalidades de cores, e identificação das principais feições morfológicas existentes na região.

3.2.1 Setor de Estudo I

A praia de Ponta Negra, principal referência do primeiro setor, localiza-se no bairro de mesmo nome, estando este inserido na zona administrativa sul da cidade de Natal/RN, e possui uma extensão de cerca de 4 km (praia urbanizada).

A praia está inserida em uma zona especial de interesse turístico e faz limite com outras duas zonas de proteção ambiental, a ZPA-06 (zona de proteção ambiental do Morro do Careca e dunas associadas) e a ZPA-02 (zona de proteção ambiental do Parque das Dunas) (SEMURB, 2010a). Por ser um dos principais pontos turísticos do estado, e, portanto, um atrativo para empreendimentos dos setores comercial (como bares e restaurantes) e hoteleiro, bem como para a população, a praia de Ponta Negra apresenta um papel relevante para a economia do município, ressaltando-se ainda mais a necessidade de estudos e projetos que viabilizem o desenvolvimento sustentável da mesma e das regiões em seu entorno.

Com o passar do tempo, a valoração imobiliária nas imediações dessa praia resultou na expansão de atividades econômicas atreladas ao turismo, tais como hotéis, restaurantes e quiosques. Apesar da marcante influência dessas atividades

sobre a economia do município e do estado, a falta de planejamento e gestão, principalmente no que tange às características geológicas-geomorfológicas da área, influenciadas pela dinâmica dos processos costeiros que ali atuam, resultou em mudanças significativas da paisagem (Figura 7), e no equilíbrio dinâmico da praia.

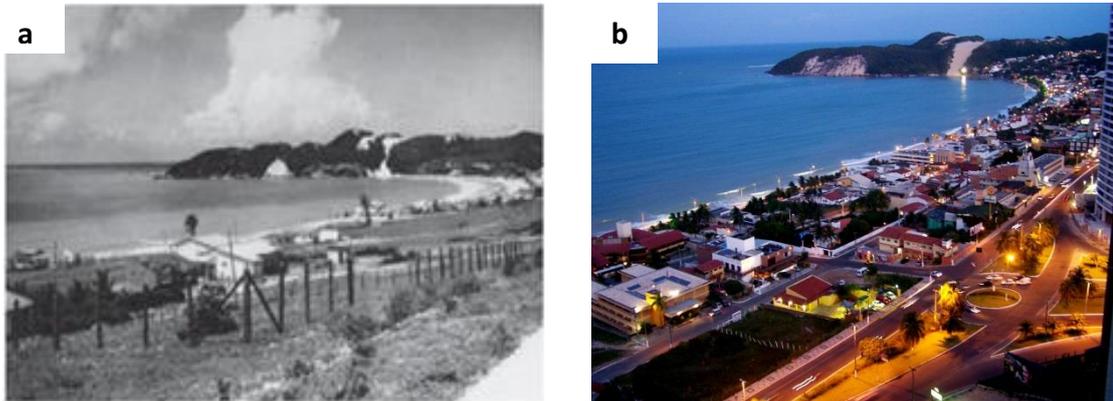


Figura 7. Imagens retratando a expansão urbana na praia de Ponta Negra (PPN). (a) Surgimento das casas de veraneio durante a década de 60; (b) situação nos arredores da PPN no ano de 2009. Fonte: <http://sospontanegra.blogspot.com/>

O processo erosivo vigente na praia de Ponta Negra não é resultado de eventos isolados. Ele vem se desenvolvendo ao longo do tempo e se intensificando a partir das modificações espaciais decorrentes das expansões urbana e econômica e da ocorrência de eventos naturais mais energéticos. Por exemplo, relatos do avanço do nível do mar e seus efeitos adversos são recorrentes em vários pontos da costa Potiguar, cabendo-se ressaltar os efeitos erosivos na embocadura do Rio Potengi, na praia do Meio, do Forte, e na própria praia de Ponta Negra e Via Costeira (AMARO *et al.*, 2102b; BUSMAN *et al.*, 2013; BUSMAN, *et al.*, 2014).

Em compêndio fotográfico das modificações de paisagem na orla da Praia de Ponta Negra entre os períodos de 2009 e 2012 (AMARO *et al.*, 2012a), foi constatado que o trecho compreendido entre a Av. Erivan França (trecho no qual ela sobe a colina em direção ao bairro de Ponta Negra) e o final do calçadão no sentido norte, é a região que mais tem sofrido os efeitos erosivos da última década, sobretudo no período de outono-inverno (março a agosto). Além disso, as altas marés decorrentes no ano de 2012 acentuaram ainda mais os danos à infraestrutura da praia, servindo como indicativo do mau planejamento dessas obras e das estruturas de engenharia construídas na tentativa de proteção contra posteriores episódios destrutivos.

Após se constatar a ineficácia de algumas obras pontuais para conter a degradação física da orla, em 13 de julho de 2012 a prefeitura decreta estado de calamidade pública. No dia 2 de Agosto a prefeitura dá início a obras de proteção, com a colocação de sacos preenchidos com areia da própria praia e a operação de máquinas que removiam areia do estirâncio e a empurrava em direção ao calçadão. No entanto, essas medidas não surtiram efeitos positivos, pelo contrário, só ampliaram os trechos já destruídos (AMARO *et al.*, 2012b).

Por fim, foi decidida a implantação de um enrocamento em toda a extensão do calçadão. Atualmente a obra se encontra finalizada, porém já foram constatados erros de projeto no que tange ao peso e dimensão das rochas utilizadas, o que pode implicar diretamente no tempo de vida útil da estrutura.

3.2.2 Setor de Estudo II

O segundo setor, apesar de ter sua faixa de praia menos frequentado pelo público em geral, apresenta, em toda sua extensão: grandes empreendimentos do ramo hoteleiro, segmento significativo para o turismo e economia do estado; a rodovia RN 301- Via Costeira (AV. Sen. Dinarte Mariz), elemento fundamental, uma vez que corresponde a um dos mais importantes meios de ligação entre os litorais norte e sul, principalmente depois da construção da Ponte Newton Navarro, a qual comunica a zona norte com as demais regiões administrativas da cidade; e o Parque das Dunas, correspondente a ZPA-02. Neste setor também são evidenciados processos erosivos nos limites dos hotéis e nas bordas do tabuleiro.

Como principais agravantes desse processo, podem ser citados a exposição da praia à ação das ondas, apesar da existência de arenitos praias em alguns trechos específicos (Figura 8b), e os efeitos influenciados por meio de modificações antrópicas, a exemplo dos sistemas de drenagem voltados à praia (OLIVEIRA *et al.* 2013) e das interrupções nas vias de ligação de transporte sedimentar entre a praia e as dunas do Parque das Dunas, proveniente das instalações dos hotéis e da própria Via Costeira (Figura 8a).

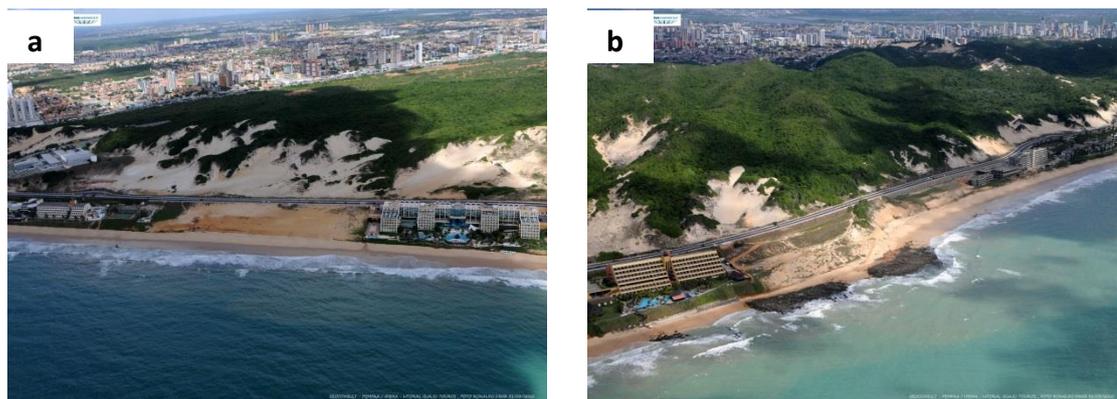


Figura 8. Trecho de praia delimitado pela Via Costeira com presença de (a) hotéis instalados no limite do pós-praia; (b) presença de *bechrocks* em alguns setores da praia. Fonte: IDEMA.

3.2.3 Setor de Estudo III

O terceiro setor, aqui representado pelas praias de Areia Preta e dos Artistas (Figura 9), está compreendido pelos bairros de Areia Preta, Mãe Luiza e Praia do Meio. Na praia de Areia Preta observa-se uma pequena faixa de praia, segmentado por espigões, a presença de falésias, além de elementos simbólicos e turísticos como o Farol de Mãe Luiza e o Relógio Solar. De acordo com o macrozoneamento do município de Natal, a região do Farol de Mãe Luiza e o seu entorno é considerada Zona de Proteção Ambiental.



Figura 9.(a) Praia de Areia Preta com a presença de falésias presentes na Ponta de Mãe Luiza e (b) espigões delimitando trechos de praia, nas quais também é observada a formação de *arenitos praias*; e praia dos Artistas, na qual observam-se (c) as falésias da Ponta do Morcego (d) e a presença de arrecifes de arenitos. Fonte: IDEMA.

A atual realidade e paisagem da praia e de suas imediações, caracterizada pela presença de vias expressas de tráfego de automóveis e prédios residenciais de luxo, contrastando com o bairro periférico de Mãe Luiza (Figura 9a), nada se assemelha a tempos mais remotos, nos quais os únicos moradores eram os próprios pescadores da região. A ocupação desordenada dessa região, dada inicialmente pela construção de uma via na década de 50 e posteriormente com a implantação da Via Costeira, na década de 80, e agravada pela construção de edificações muito próximas ao mar em terrenos de dunas, isolando definitivamente as dunas da praia, interferiu no balanço sedimentar, causando o retrocesso da linha de costa e sérios problemas de erosão (CUNHA E MAIA, 2010).

Em busca de uma solução para este problema, foi desenvolvido um projeto de pesquisa para a Recuperação da Praia de Areia Preta, através de um convênio entre a Prefeitura do Natal e a UFRN, com a participação da Universidade de Barcelona, e também com pesquisadores da UFC, UFF, UNP e do IFRN. O projeto se baseou em

uma alternativa mista de proteção e recuperação desse trecho da costa, compreendendo um aterro hidráulico (efetuado de forma parcial) entre as pontas de Mãe Luiza e Morcego, estando limitado ao norte por um espigão de contenção de areias semi-submerso, e segmentado em três trechos por outros dois espigões, também semi-submersos, como observado nas figuras 9a e 9b (CUNHA E MAIA, 2010). Apesar da função de proteção, ainda é perceptível os efeitos da agitação marítima sobre a paisagem local.

Um outro exemplo típico da ocupação desordenada e da falta de infraestrutura de saneamento, principalmente no bairro de Mãe Luiza, foi o ocorrido após as intensas chuvas que caíram na cidade durante o mês de Junho de 2014, resultando em significativos deslizamentos de terra. O evento provocou a interrupção de vias, destruição e interdição de casas e soterramento de veículos, além de colocar em risco a vida da população local e demais transeuntes, e acrescentar uma considerável quantidade de sedimento à praia, como pode ser observado na Figura 10.



Figura 10. Deslizamento de terra ocorrido no bairro de Mãe Luiza impactando diretamente a praia de Areia Preta. Fonte: www.marconepedroblogspotcombr.blogspot.com

A praia dos Artistas, também contemplada pelo setor III, é caracterizada pela presença de falésias e arrecifes naturais que atuam como elementos de proteção natural aos agentes hidrodinâmicos. O principal ponto turístico da praia corresponde aos estabelecimentos e o deck que margeiam a Ponta do Morcego (falésia viva). A

agitação marítima intensa dessa região pode ser constatada pela frequente necessidade em se realizar reparos no deck que margeia o pontal.

3.2.4 Setor de Estudo IV

O quarto setor contempla as praias do Meio e do Forte. A principal feição desse setor corresponde à sequência de arrecifes contínuos paralelos à linha de costa (Figura 11a e 11b), que proporcionam a formação de piscinas naturais nos eventos de baixamar e ficam parcialmente submersos durante a preamar. Os principais símbolos desse setor são a estátua de Iemanjá e o Forte dos Reis Magos. Neste setor está compreendido a ZPA 7, referente à região do Forte dos Reis Magos e o seu entorno. Como estrutura artificial, pode ser observado um espigão dando continuidade ao arrecife no extremo Norte da praia do Forte, que juntamente com um moche ligado à praia da Redinha, delimitam o canal de entrada na foz do estuário do Rio Potengi (Figura 11 b).



Figura 11. Praias do Meio e do Forte: (a) arrecifes contínuos paralelos à linha de costa; (b) espigões delimitando o canal de entrada na foz do estuário do Potengi. Fonte: IDEMA.

3.2.5 Geomorfologia Local

Apesar de característica em comum, a exemplo de praias possuindo inclinações médias a baixas, observa-se que cada setor analisado apresenta feições morfológicas marcantes, com forte influência sobre os processos costeiros.

Uma das principais feições geomorfológicas presente no setor I é o Morro do Careca, formado por dunas fixas e móveis com até 120 m de altura (Figura 12). A presença de vegetação fixadora ocasiona a deposição de matéria orgânica sobre o

pacote arenoso, fazendo com que a camada superficial do pacote sedimentar tenha coloração acinzentada. Já as dunas móveis são constituídas de sedimentos arenosos, bem selecionados, com granulometria fina, semelhantes as do sedimento praial (FCPC, 2008). Observa-se ainda a presença de concreções lateríticas nos arredores do Morro do Careca e da praia de Alagamar.

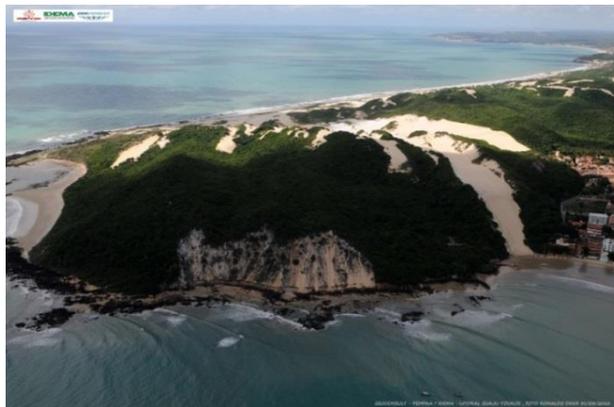


Figura 12. Dunas móveis e fixas características do Morro do Careca, além de concreções lateríticas nos arredores do morro e da praia de Alagamar. Fonte: IDEMA.

O trecho que compreende a Via Costeira pode ser considerado de superfície plana e suave dominada geomorfologicamente por tabuleiro costeiro, correlacionado aos sedimentos do grupo barreiras e sedimentos arenosos de cobertura de espraiamento de idade sub-recente (TECHNOR ENGENHARIA, 2007.). Na região costeira de Natal, estas formações geralmente terminam de forma abrupta em paredes nas margens do estuário do Potengi e formam falésias nas praias (CUNHA, 2004). A oeste da Via Costeira pode ser observado o tabuleiro costeiro recoberto por corredores interdunares e cordões dunares, vegetados e expostos, além de afloramentos do Grupo Barreiras. A leste desta mesma Via, onde localizam-se os empreendimentos hoteleiros, são observados níveis de terraços separados por rampas ou falésias, geralmente cobertos por depósitos de areias eólicas, localizados entre as feições de tabuleiros costeiros, faixas de pós-praia e estirâncio e a presença de arenitos praias em determinados setores (Figura 13) (TECHNOR ENGENHARIA, 2007).



Figura 13. Trecho da Via Costeira com campos dunares localizados a oeste da via e hotéis e formação de arenitos praias localizados a leste. Fonte: IDEMA

Na região de estudo, as falésias mais notáveis se encontram localizadas na Ponta de Mãe Luiza e na Ponta do Morcego (setor III), também considerados promontórios naturais, muito provavelmente desenvolvidos por meio do ataque diferencial das ondas sobre as rochas da Formação Barreiras (DINIZ, 2002; NUNES, 2011). Nesse setor ainda podem ser observados resquícios da formação Barreiras formando terraços de construção, constituídos de arenitos praias provenientes da destruição de falésias, apresentando superfícies irregulares e avançado processo diagenético, devido à concentração de óxido de ferro e material argiloso, e a presença de *beachrocks* contínuos, localizados, principalmente, em parte da praia dos Artistas (NUNES, 2011).

Na Praia do Forte é observado um pequeno cordão de Dunas podendo alcançar até 8 metros de altura (Figura 14). Apesar delas serem vegetadas, por meio da ação eólica parte da areia é deslocada e se deposita na via principal de acesso à praia – Avenida da Praia do Forte (CUNHA, 2004). E como já comentado, em toda a extensão das praias do Meio e do Forte, pode ser observada a presença de arrecifes de arenito contínuos, que possibilitam a existência de piscinas naturais nas situações de baixamar.



Figura 14. Presença de pequenas dunas vegetadas e alinhamento de arrecifes de arenitos ao longo da praia do Forte. Fonte: Google Earth, 2015.

3.2.6 Informações Sedimentológicas

As principais fontes de sedimento para os ambientes costeiros provêm de rios, plataforma continental interna adjacente e da plataforma costeira. As características granulométricas e a quantidade de sedimento estão intimamente relacionadas às áreas fontes, além das características hidrodinâmicas locais, responsáveis pela sua mobilização ao longo da costa. No litoral do Rio Grande do Norte, os atuais registros de erosão têm origem principalmente ao reduzido aporte fluvial, decorrente das pequenas dimensões das bacias regionais fluviais, e a perda de sedimentos para o continente (DOMINGUEZ e BITTENCOURT, 1996).

Na região de estudo, as areias de granulometria mais grossa estão presentes nas praias localizadas ao sul (de Ponta Negra a Areia Preta), associadas às rochas da Formação Barreiras, enquanto as areias finas e muito finas predominam nas praias do Meio e do Forte (VALENTINI de SOUZA, 1981; CUNHA, 2004), como pode ser observado na figura 15. Cunha (2004) ressalta que Formação Barreiras é a principal fonte de material para as praias e que estas podem ser a fonte para a plataforma, sendo o movimento inverso pouco provável. Conclusão essa, denotada pelo conteúdo de carbonatos presentes na plataforma interna e na praia.

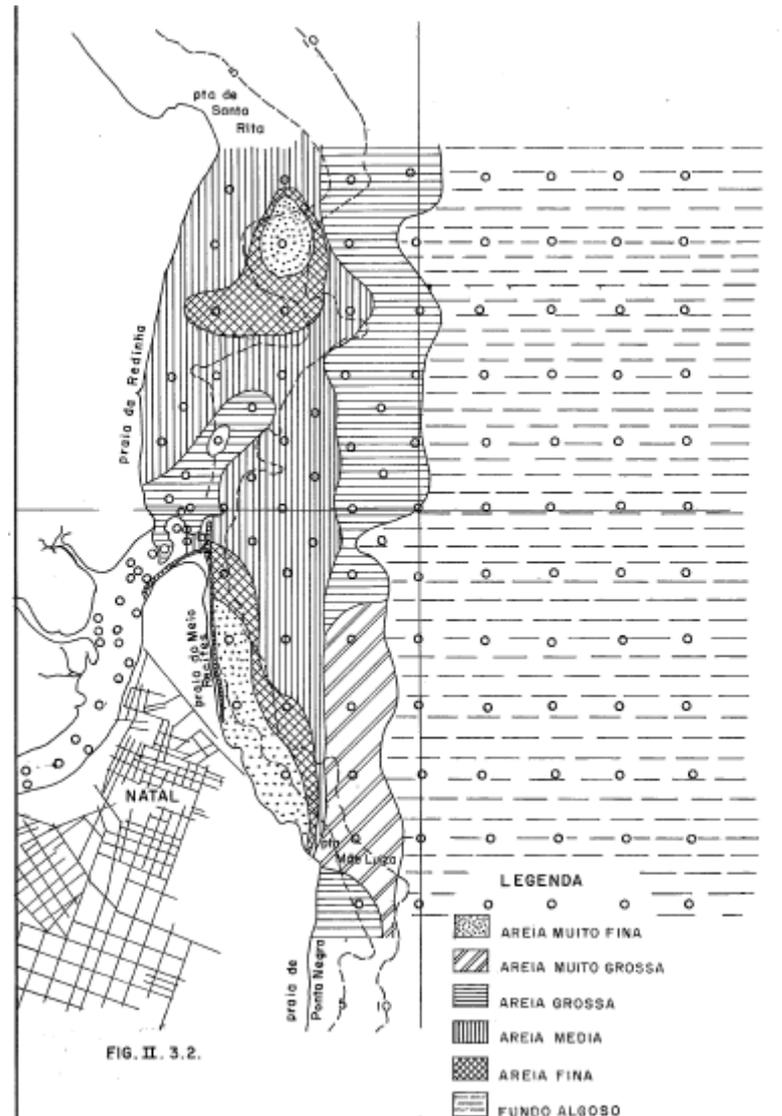


Figura 15. Estudo de caracterização sedimentológica realizado pela Hidroconsult. Fonte: Valentini de Souza (1981).

Oliveira (1978) cita que na região de Natal, a granulometria dos componentes dos arrecifes de arenitos mostram uma estreita semelhança com os sedimentos praias, constituídos de areias mais grossas, próprias das praias do setor sul, que derivam para as de grão médio, característica das praias localizadas ao norte.

Em estudo realizado pelo LABOMAR, em 2007, referente ao relatório técnico de análise ambiental do litoral de Ponta Negra para a implantação do emissário submarino, foi verificada que em frente à praia, a uma distância inferior a 5 Km da mesma, há a existência de sedimentos grossos, constituído de areia média, grossa e muito grossa; e nas regiões localizadas próximas ao Morro de Careca há presença de sedimentos muito finos (figura 16).

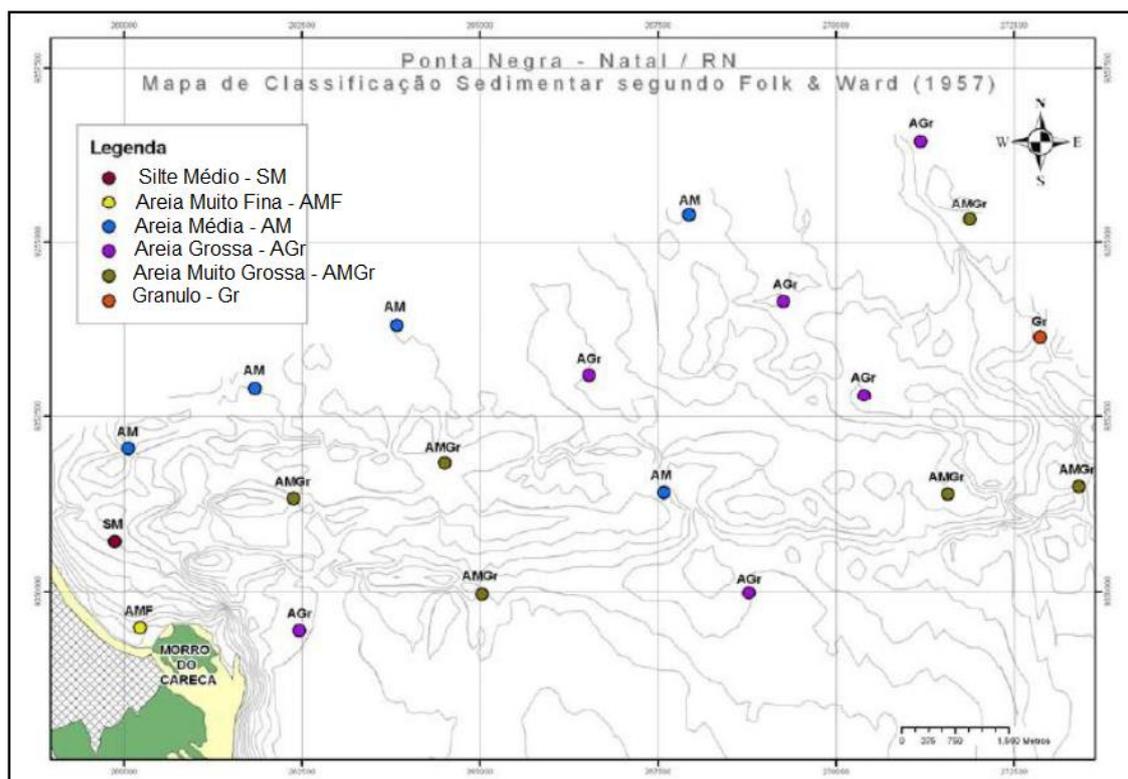


Figura 16. Classificação sedimentológica em frente a Praia de Ponta Negra realizado em condições de maré de sizígia. Fonte: LABOMAR (2007).

Além disso, de acordo com o Laudo Pericial Referente à Erosão da praia de Ponta Negra (AMARO *et. al.*, 2012b), análises granulométricas mostraram uma variação longitudinal mais fina junto ao Morro do Careca, com uma aparente variação uniformemente crescente no valor do diâmetro mediano dos grãos na direção da Via Costeira. Nesse estudo foram realizadas coletas em 3 pontos (representativos do Pós-Praia-PP, Estirâncio-ES e Ante-Praia-AP) ao longo de três perfis – Perfil 1, Perfil 2 e Perfil 3 -, tendo estes como referência o Morro do Careca, o Hotel Ingá e o Hotel Plaza, respectivamente. A partir do monitoramento topográfico desses perfis, no período de 05/06 a 30/10/2012, foi observado que todos apresentaram balanço sedimentar semelhante, com perda de sedimentos principalmente entre os meses de julho a agosto e recomposição a partir do mês de outubro. Por meio de coletas e análises laboratoriais foi possível determinar o diâmetro médio dos sedimentos (D_{50}), os quais se encontram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores do diâmetro médio do sedimento para me três posições dos perfis selecionados – Ante-Praia (AT), Estirâncio (ES) e Pós-Praia (PP). Fonte: Modificado de Amaro *et. al.*, (2012b).

	Perfil 1			Perfil 2			Perfil 3		
	D ₅₀ (mm)			D ₅₀ (mm)			D ₅₀ (mm)		
	AT	ES	PP	AT	ES	PP	AT	ES	PP
05/06/2012	0.096	0.158	0.370	0.272	0.202	-	0.575	0.281	0.255
04/07/2012	0.094	0.174	0.312	0.300	0.184	-	0.221	0.273	0.259
02/08/2012	0.094	0.184	0.380	0.329	0.259	-	0.181	0.329	0.258
31/08/2012	0.095	0.164	0.386	0.306	0.186	0.265	0.317	0.486	0.265
01/10/2012	0.099	0.170	0.505	0.311	0.274	-	0.265	0.306	0.270
30/10/2012	0.099	0.173	0.304	0.257	0.363	-	0.282	0.290	-

4 METODOLOGIA

Neste capítulo se encontram apresentados o sistema de modelagem costeira empregado no trabalho e todos os procedimentos metodológicos necessários para a sua aplicação. Os tópicos abordados se encontram estruturados em uma sequência lógica coincidente com as etapas de modelagem necessárias para o cálculo do transporte longitudinal de sedimento.

Primeiramente são descritos os procedimentos que possibilitaram a caracterização do clima de ondas ao largo da região de estudo. Esta informação foi obtida da própria base de dados do SMC-Brasil e fornece parâmetros de onda fundamentais para as etapas posteriores da atividade de modelagem.

Em seguida são apresentadas as informações batimétricas utilizadas para gerar o modelo digital de terreno, bem como os condicionantes levados em consideração para a elaboração das malhas de propagação de ondas e correntes.

Uma vez discriminados o clima de ondas ao largo da região de estudo, os dados batimétricos e as malhas utilizadas no projeto de modelagem, são apresentados todos os parâmetros de entrada e condições estabelecidas para a propagação das ondas até a costa. Da mesma forma são descritos os procedimentos adotados para a geração das correntes.

Por último são descritos os procedimentos necessários para a obtenção das informações sedimentológicas, as formulações utilizadas e os demais parâmetros necessários para calcular o transporte longitudinal de sedimento.

4.1 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA EMPREGADO

Neste trabalho, as informações referentes à atuação dos processos hidrodinâmicos sobre a costa e as potenciais taxas de transporte longitudinal de sedimento características da região costeira estudada foram obtidas por meio da aplicação do *Sistema de Modelagem Costeira do Brasil* (SMC – Brasil). O SMC-Brasil consiste em uma ferramenta computacional desenvolvida inicialmente pelo Instituto Hidráulico Ambiental da Universidade da Cantábria (IH-Cantábria), com o apoio da Diretoria Geral Costeira do Ministério do Meio Ambiente da Espanha, sendo, posteriormente, adaptada e transferida para o Brasil por meio de um projeto de colaboração bilateral intitulado *Transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão do litoral brasileiro*, no qual se envolveram várias instituições: Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID),

Ministério do Meio Ambiente do Brasil (MMA), Secretaria do Patrimônio da União (SPU), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o IH- Cantábria.

Ao SMC-Brasil se encontra integrado uma série de modelos numéricos, estruturados e especificamente organizados de acordo com as escalas espaciais e temporais dos processos a serem modelados. Sua estrutura é composta por cinco módulos fundamentais (IH-CANTABRIA, 2013a):

- Pré-Processo, que permite caracterizar e processar informações para os diferentes modelos numéricos;
- Análises de Curto Prazo de Praias, a qual contém ferramentas numéricas capazes de analisar a morfodinâmica de um sistema costeiro em uma escala espaço/temporal de curto prazo (escala de horas até dias);
- Análise de Longo Prazo de Praia, a qual permite modelar o sistema em uma escala espaço/temporal de médio e longo prazo (escala de meses, estações, anos e décadas);
- Modelagem de Terreno permite modificar os contornos do fundo (batimetria) e laterais (estruturas), o qual é fundamental para avaliar diferentes cenários de um projeto de engenharia;
- E o Tutor de Engenharia de Costas, que consiste em uma ferramenta de apoio teórico, conceitual e de informação básica para os diferentes modelos numéricos do sistema.

Para o presente estudo serão utilizadas as ferramentas disponíveis nas Análises de Curto e Longo Prazo. Por meio da Análise de Curto Prazo serão calculados os campos de onda e corrente atuantes sobre a costa, fazendo uso do Modelo Integral de Evolução Morfológica de Praia Devido à Ação de Ondas e Correntes (Mopla). Enquanto que a Análise de Longo Prazo de Praia possibilita o cálculo do transporte longitudinal de sedimento por meio da aplicação de equações teóricas.

4.1.1 Modelo Integral de Morfodinâmica de Praias – Mopla

O modelo integral de Morfodinâmica de Praias (Mopla) é um programa capaz de realizar a propagação de um trem de ondas desde profundidades indefinidas até a linha de costa, calcular as correntes geradas na zona de quebra das ondas e simular a evolução morfodinâmica de uma praia. O Mopla é composto por seis

modelos numéricos organizados em dois grupos: os que modelam os processos associados à propagação de um trem de ondas monocromático e os que modelam a propagação de um estado do mar, representado mediante um espectro de energia de ondas (IH-CANTABRIA, 2013b).

Como subsídio para a modelagem do transporte longitudinal de sedimento serão utilizados dois dos modelos enquadrados no segundo grupo: o modelo de Propagação de Onda (Oluca-SP) e modelo de Correntes Induzidas pela Quebra da Onda (Copla-SP). Esses modelos são aplicados à modelagem de eventos extremos ou em casos em que se deseja uma maior precisão do cálculo das alturas de onda. Apesar da não ocorrência de eventos extremos, tais como tempestades, na área de estudo, serão denominados eventos extremos aqueles estados de mar no quais predominam as maiores alturas significativas de onda.

4.1.2 Modelo Espectral de Propagação de Onda – Oluca-SP

A propagação de ondas em zonas de pouca profundidade pode ser realizada por meio de duas famílias de modelos numéricos, aqueles que resolvem a fase (MRF), com base nas equações de balanço da quantidade de movimento e no fluxo de massa, e aqueles que calculam a fase (MPF), os quais resolvem as equações de balanço de energia espectral ou a ação das ondas. Os MRF requerem determinada resolução espacial relacionada com uma pequena fração do comprimento da onda. Devido a isto, geralmente esses modelos se aplicam a áreas costeiras relativamente pequenas. Além disso, esse tipo de modelo é capaz de simular processos como difração e a interação onda-onda (IH-CANTABRIA, 2013b).

O modelo Oluca-SP corresponde a um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase. Estes discretizam uma função de densidade de probabilidade ou um espectro de energia fora da costa, em um número de seções de energia, nas quais são associados componentes de onda com amplitude, frequência e direção. A propagação de cada componente de energia permite, mediante superposição linear, obter em cada ponto do domínio as características estatísticas do espectro de onda (IH-CANTABRIA, 2013b). O modelo Oluca-SP ainda é capaz de reproduzir interação onda-corrente, através da formulação proposta por Kirby (1986), e prevê perda de energia devido à quebra de ondas.

4.1.3 Modelo de Correntes Induzidas pela Quebra de Ondas – Copla-SP

Apesar de existirem diversos tipos de correntes capazes de modificar a linha de costa, na maioria dos casos, são as correntes devidas às ondas as mais importantes por tal alteração. Além disso, a modelagem do sistema circulatório na zona de quebra das ondas é fundamental para a resolução do transporte de sedimentos e das variações morfológicas da costa (IH-CANTABRIA, 2013c).

O Copla-SP é um modelo numérico que resolve a equação de fluxo dentro da zona de rebentação e considera a geração de correntes apenas pela ação das ondas. Como dados de entrada são utilizados os resultados provenientes do campo de onda calculados através do modelo Oluca-SP.

Estes modelos são baseados, fundamentalmente, na resolução das equações médias do movimento e da equação da continuidade. No entanto, estas equações podem ser resolvidas com diferentes graus de complexidade. Em qualquer caso, a utilização das equações calculadas precisam de algumas expressões para as tensões tangenciais e turbulentas (IH-CANTABRIA, 2013c).

4.1.4 Análise de Longo Prazo aplicada ao Cálculo do Transporte de Sedimento

Na Análise de Longo Prazo é realizada a reconstrução dos estados de mar, onde, a partir da utilização de técnicas estatísticas, são elaborados uma série de casos de propagação. Empregando-se os modelos Oluca-SP e Copla-SP esses casos são propagados, possibilitado a obtenção de parâmetros de onda e corrente em qualquer ponto da zona costeira trabalhada (IH-CANTABRIA, 2013d). Com essas e outras informações, a exemplo de dados característicos do sedimento de praia, é possível calcular o transporte longitudinal de sedimentos estabelecido dentro da zona de surfe, a partir de uma abordagem de longo prazo, da ordem de meses e anos, utilizando qualquer uma das equações integradas ao SMC-Brasil: CERC (1984), Kamphuis (1991) ou Bayram *et al.*, (2007).

4.1 CLIMA DE ONDAS EM PROFUNDIDADES INTERMEDIÁRIAS

O SMC-Brasil possibilita a análise do clima de ondas em três zonas específicas de um determinado projeto, delimitadas pela relação entre a profundidade e a interação do leito com a propagação de ondas, a saber: zonas de águas profundas (ou profundidades indefinidas), caracterizadas por apresentarem a razão profundidade (h) / comprimento de onda (L) maior que 0,5; águas consideradas

rasas, que apresentam h/L igual a 0,04; e as profundidades que se enquadram entre esses dois valores, consideradas zonas intermediárias.

As informações referentes aos parâmetros de onda característicos de zonas com profundidades intermediárias e profundas são fundamentais para implementação de projetos de modelagem em que se deseja compreender a atuação de campos de ondas, correntes e demais fenômenos atuantes em regiões de menor profundidade, incidindo diretamente sobre a costa. Ao SMC-Brasil se encontra integrado uma base de dados, resultante de um processo de *downscaling*, com informações de ondas em profundidades intermediária e profunda (CAMUS *et al.*, 2013). Estas informações se encontram distribuídas em forma de pontos ao longo de todo o litoral brasileiro e podem ser acessadas por meio da seleção dos mesmos.

4.1.1 Base de Dados

As ondas em profundidades indefinidas (águas profundas) e intermediárias são provenientes de uma série já existente denominada Global Ocean Waves – GOW (REGUERO *et al.*, 2012). As séries GOW, presentes no banco de dados do SMC-Brasil, são resultantes de uma reanálise global equivalente a um período de 60 anos, utilizando como modelo numérico o Wavewatch III, versão 2.2 (TOLMAN, 2002) forçado com a reanálise atmosférica da NCEP/NCAR (para o período de 1948 a 2009) (KALNAY *et al.*, 1996), que inclui variabilidades de ventos globais e coberturas de gelo, além de apresentar resoluções espaciais e temporais de $1,9^\circ$ e seis horas, respectivamente.

Essa reanálise se apresenta estruturada em duas escalas espaciais distintas. Primeiramente, é determinado o clima de ondas utilizando-se uma escala global, com resolução de $1,5^\circ$ em longitude e 1° em latitude, o que, conseqüentemente, fornece o clima de ondas em escala global. Arelada a essa malha existem outras com maior grau de resolução ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), localizadas no litoral brasileiro, utilizadas para conferir um maior detalhamento dessa zona.

Para simulação das séries globais de dados de onda GOW é utilizada como fonte batimétrica a *General Bathymetric Chart of the Ocean* – GEBCO (disponível no [sítio da British Oceanographic Data Centre: http://www.bodc.ac.uk/products/bodc_products/gebco/](http://www.bodc.ac.uk/products/bodc_products/gebco/)), construída a partir da

combinação de dados procedentes de levantamentos hidrográficos e satélite e que apresenta características globais com resolução de 0,5 minutos.

Esta série GOW possibilita conhecer as características das ondas de forma global e o mais próximo possível da região do Brasil, de modo a obter séries de longa duração que descrevam a dinâmica das ondas nesta zona. Esta base de dados não é apropriada para a realização de estudos próximos à costa devido a uma série de limitações que, basicamente, estão relacionadas à escala de estudo. No entanto, eles são adequados para caracterizar o clima marítimo da região possibilitando a realização de um *downscaling*.

Este procedimento tem como principal objetivo transferir as informações de dados de onda provenientes da reanálise GOW, para regiões mais próximas da costa, validando-se de dados batimétricos com resolução regional, o que fornecerá ondas características de escala regionais.

Para a realização do *downscaling*, a região costeira do Brasil foi dividida em 17 zonas, cada qual com batimetrias de resolução regional de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (cartas náuticas do Brasil), e foi utilizado o modelo numérico SWAM (BOOIJ *et al.*, 1999), o qual fundamenta-se na conservação da ação espectral da onda e que resolve a equação de transporte de energia. Além disso, ele é capaz de propagar ondas de qualquer direção, inclui condições de contorno variáveis e incorpora fenômenos exclusivos de profundidades rasas como a quebra das ondas e interações não lineares. Os dados de reanálise atmosférica foram os mesmos utilizados para a reanálise global.

Em virtude da existência de 60 anos de dados nas séries GOW, e da impossibilidade de propagar cada estado do mar, foi aplicado primeiramente uma técnica de classificação para selecionar um conjunto de estados do mar característicos. Cada um desses estados foi propagado e, posteriormente, por meio da aplicação de técnicas de interpolação, foram reconstruídas as séries em cada um dos nós das malhas, as quais são denominadas *Downscaled Ocean Waves* (DOW).

As ondas características de zonas intermediárias e de profundidades indefinidas constituem a base de dados de ondas do SMC, e representam uma informação de entrada fundamental quando da utilização de qualquer modelo numérico inserido no Mopla.

4.1.2 Seleção do Ponto DOW e Caracterização do Clima de Onda

A caracterização do clima de ondas de profundidade intermediária na plataforma continental adjacente aos setores praias de interesse foi perpassada pela análise de uma série de pontos DOW, onde somente um foi selecionado como mais representativo. Os critérios adotados para a seleção desse ponto levaram em consideração: (i) análises comparativas de estatística descritiva dos parâmetros de onda dos pontos escolhidos; (ii) sua distância e localização em relação à zona de estudo; (iii) e sua cota batimétrica (de profundidade superior a 15 metros devido às limitações do modelo SWAN).

Uma vez selecionado o ponto DOW, a caracterização do clima de ondas foi realizada através de uma abordagem estatística de curto (descritiva), médio e longo prazo, dos respectivos parâmetros, a saber: altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p) e direção média de onda (θ_m). Esses parâmetros são disponibilizados na forma de diferentes índices, capazes de refletir condições médias de agitação marítima (representado pelo índice "50%" ou apenas "50"), ou ainda estados de mar associados a condições extremas (representado pelo índice "12", que reflete estados de mar superados apenas 12 horas ao ano). Essas informações representam um subsídio fundamental para a definição de parâmetros de entrada para as posteriores etapas de modelagem costeira.

4.2 DADOS BATIMÉTRICOS UTILIZADOS PARA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA

Ondas são um dos principais agentes moldadores dos terrenos emersos e submersos, e os processos envolvidos na sua propagação ao se deslocarem em direção à costa sofrem modificações devido à alterações topobatimétricas, tornando a interação entre esses elementos um processo de retroalimentação. Dessa forma, a utilização de batimetrias de boa qualidade, com boa representação da característica morfológica da região de estudo, é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis.

Três conjuntos de dados batimétricos foram empregados no presente projeto de modelagem, a saber: batimetria de detalhe da praia de Ponta Negra, realizada por Ferreira *et al.*, (2013), batimetria geral da área disponível na base de dados do SMC-Brasil e a digitalização das linhas batimétricas constantes na Carta Náutica 810 (CN 810), intitulada *Brasil Costa Leste: Proximidades do Porto de Natal*, em

escala 1: 50.000, *Datum* WGS – 1984, projeção *Mercator* (Marinha do Brasil, 2013). Ainda para a Carta Náutica 810, as profundidades são dadas em metros e referidas ao nível de baixamar média de sizígia ou Nível de Redução (NR), de acordo com os valores dados na própria carta. As altitudes emersas são dadas em valores de metros acima do nível médio do mar (MSL). A integralização dessa carta náutica ao projeto teve como principal objetivo aprimorar a batimetria geral já existente, uma vez que para esse trabalho não se dispõe de batimetrias detalhadas para os setores II, III e IV.

Para realização da batimetria de detalhe da praia de Ponta Negra, Ferreira *et. al.*, (2013) desenvolveram metodologia específica para levantamento, geração e avaliação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de superfícies praias, integralizando dados topográficos e batimétricos mensurados *in situ*. No MDE gerado, foi utilizada interpolação por triangulação com uso da técnica *Triangulated Irregular Network* (TIN) e triangulação de Dalaunay para a conexão dos pontos.

Como resultado, foi obtida uma batimetria regenerada (interpolação gerada no SMC-Brasil) com informações integradas das três batimetrias utilizadas (Figura 17), tendo como referência vertical o Nível de Redução, o qual, de acordo com a CN 810 equivale a 1,3 m.

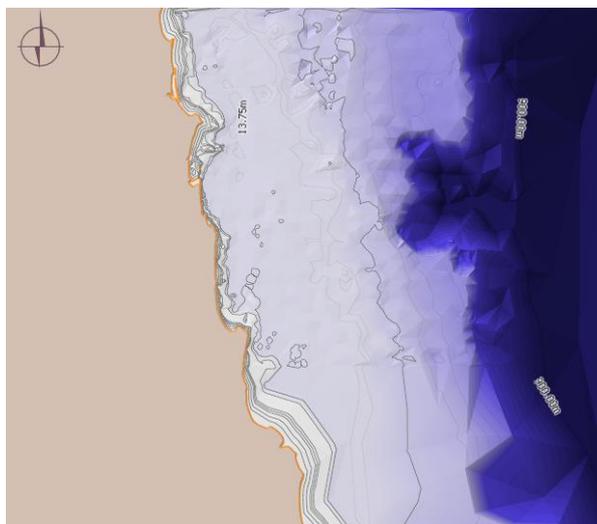


Figura 17. Modelo digital de terreno resultante da interpolação das informações batimétricas disponibilizadas para o trabalho.

4.3 MALHAS UTILIZADAS NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA

Uma vez definidos os dados batimétricos utilizados no projeto, foram elaboradas malhas para a propagação de ondas de modo a contemplar a região de

interesse e estar de acordo com as especificidades morfológicas da área. Além disso, devido às limitações do modelo, foram tomados os devidos cuidados para que o ângulo de entrada das ondas com relação ao eixo X das malhas não ultrapassasse 55°.

As malhas criadas levaram em consideração as principais direções de incidência de onda obtidas através da análise do ponto DOW, a distância desse ponto até a costa, de forma que a borda de entrada da malha ficasse a uma cota batimétrica próxima à do ponto selecionado, além de resoluções (espaçamento entre cada nó) adequadas às especificidades da área e à dimensão da malha.

4.4 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA

As informações hidrodinâmicas obtidas com a análise do ponto DOW em águas intermediárias, serviram de subsídio para a criação de casos a serem propagados com o modelo Oluca-SP. Elas foram utilizadas como parâmetros de entrada de espectros de frequência e direção (discutidos mais adiante), os quais definem as ondas a serem propagadas para cada estado do mar. Além de outros parâmetros essenciais para a definição dos casos de propagação, os quais também serão discutidos posteriormente, foram levados em consideração dois níveis de maré – uma situação de baixamar e outra de preamar –, e parâmetros de onda associados a condições médias e extremas de clima marítimo. Na figura 18 é possível observar o esquema representativo para a definição dos casos a serem propagados.

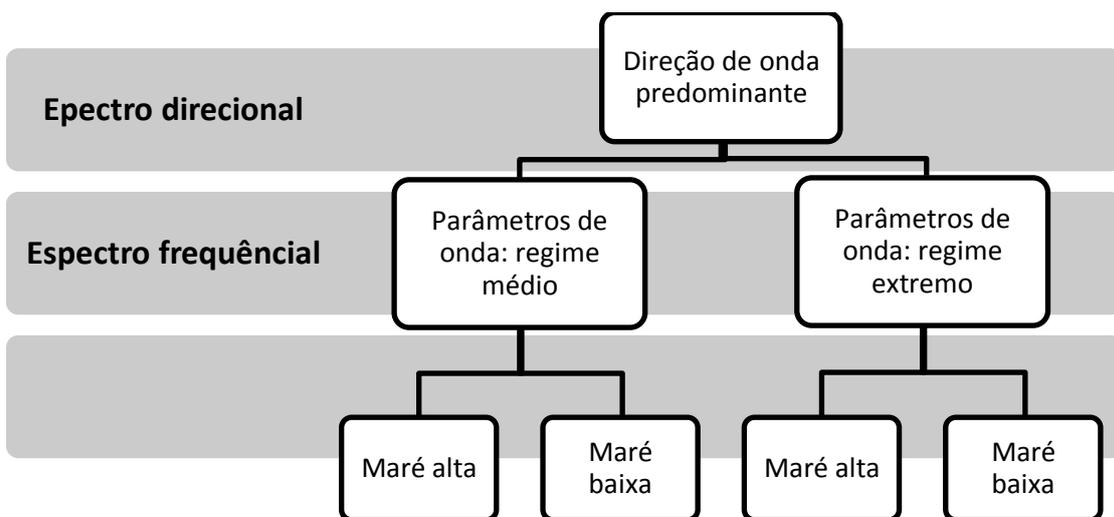


Figura 18. Fluxograma representativo dos casos a serem criados para a propagação de ondas.

Ao longo da sua propagação até a costa as ondas sofrem uma série de transformações, resultantes principalmente da interação que estas passam a ter com o fundo. Esse processo de interação começa a ser sentido em regiões transicionais, denominadas como zonas de águas intermediárias, nas quais a profundidade se torna inferior à metade do comprimento de onda. Dentre os processos de transformação estão o empinamento, refração, difração e reflexão.

O fenômeno de empinamento resulta das mudanças dos parâmetros de onda devido à variações de profundidade. Esse processo pode ser observado por meio da diminuição do comprimento de onda ao se propagar em direção à costa, e do conseqüente aumento ou diminuição de sua altura em função do princípio de conservação de energia, que tende a manter o fluxo de energia associado à propagação da onda constante (DEAN e DALRYMPLE, 1984; REEVE *et al.*, 2004)

Ao se aproximar da costa, e encontrar diferentes feições morfológicas e gradientes de profundidade, as ondas tendem a sofrer alterações em sua direção. Ondas propagando-se com um determinado ângulo de incidência em relação à linha de costa tendem a alinhar suas cristas com os contornos batimétricos encontrados. De forma simplista, esse fenômeno pode ser explicado devido as diferentes celeridades experimentadas por uma mesma fase de onda. Em regiões menos profundas elas tendem a adquirir menor celeridade. Portanto, enquanto uma frente de onda tem sua celeridade reduzida por encontrar primeiro águas mais rasas, outro segmento, ainda em águas mais profundas, apresenta maior celeridade, ocasionando uma curvatura na linha de onda associada aos contornos batimétricos. Como resposta a esse fenômeno, pode ocorrer uma diminuição da altura de significativa, bem como efeitos divergentes na sua propagação, na presença de grandes depressões como cânions, ou uma convergência das cristas de onda na presença de pontais, por exemplo (DEAN e DALRYMPLE, 1984; REEVE *et al.*, 2004).

Quando uma frente de onda encontra um obstáculo ou descontinuidade em seu trajeto, tais como ilhas e obras rígidas de engenharia, ocorre uma transferência lateral de energia da zona não protegida para a protegida, o que acaba por causar alterações na sua altura e direção. A esse efeito, capaz de contornar obstáculos, é dado o nome difração. De forma contrária, ou seja, quando uma onda encontra um obstáculo e parte da sua energia é refletida, ocasionando a propagação em sentido oposto ao original, ocorre o fenômeno da reflexão (REEVE *et al.*, 2004.)

O entendimento dessas características e dos processos envolvidos com a chegada das ondas à costa é de relevante importância, já que são elas um dos principais propulsores das mudanças morfológicas das praias. A metodologia incorporada ao SMC-Brasil, para a propagação de ondas de profundidades intermediárias até a costa, é bem semelhante àquela utilizada para a obtenção da série de pontos DOW. As principais diferenças metodológicas para geração dessas duas bases de dados consistem nas especificidades do modelo numérico (Oluca-SP), nas batimetrias mais detalhadas e nas malhas adotadas, as quais devem ser adequadas à área de estudo, e às direções predominantes do clima de ondas.

Como já citado, o modelo Oluca-SP é capaz de reproduzir interação onda-corrente, através da formulação proposta por Kirby (1986), bem como os demais processos de transformação sofridos pela onda, exceto a reflexão. Por ser baseado em uma Equação Parabólica de Declividade Suave, esse modelo apresenta algumas limitações quanto à direção das ondas que se deseja propagar (restringindo-se a $\pm 55^\circ$ na direção x da malha retangular de propagação). Por isso, para propagar os estados de mar obtidos com a série DOW, foram utilizadas malhas com diferentes orientações, de forma a serem compatíveis com as direções de ondas incidentes na área de estudo.

As ondas associadas a um estado de mar são definidas a partir de um espectro bidimensional, composto por um espectro frequencial e uma função de dispersão de direção. O modelo Oluca-SP permite duas maneiras de definir o espectro frequencial, uma mediante a leitura de um arquivo externo e outra a partir de um espectro Texel Marsen Arsloe - TMA (BOUWS *et al.*, 1985). Nesse estudo foi utilizado o TMA, aplicado em áreas próximas à costa onde as profundidades são relativamente pequenas e as ondas são afetadas pelo fundo, definido a partir de um espectro do tipo JONSWAP, que relaciona a distribuição de energia com a frequência resultante do efeito de ondas no oceano (HASSELMANN *et al.*, 1973). Na propagação, é utilizada a Função de Dispersão Direcional Normalizada (BORGMAN, 1984). Os parâmetros de entrada para cada espectro direcional propagado ficam definidos por quatro parâmetros de entrada para o espectro TMA e dois parâmetros para a Função de Dispersão Normal (IH-CANTÁBRIA, 2000a), a saber:

- Espectro TMA:
 - h profundidade (em metros),

- Hs altura de onda significativa (em metros),
- fp frequência de pico (em Hz),
- γ fator de alargamento do pico;
- Função de Dispersão Direcional:
 - θ_m direção média das ondas (em graus),
 - σ_θ largura do espectro (em graus).

O parâmetro γ indica a dispersão de frequência do espectro tipo JONSWAP. Nos casos em que a energia do espectro está mais concentrada em torno de um período de pico prevalecem ondulações do tipo *swell*, enquanto que em casos de espectros de energia mais dispersos prevalecem ondulações do tipo *sea*. Já o parâmetro σ_θ representa uma dispersão direcional em torno da direção média. Para esse trabalho, serão consideradas ondulações do tipo *sea*, aquelas em que $4 \text{ s} \leq T_p \leq 10 \text{ s}$ (sendo adotados $\gamma=3,3$ e $\sigma_\theta =20^\circ$) e ondulações do tipo *swell*, os casos em que $T_p \geq 10 \text{ s}$ (sendo adotados $\gamma=8$ e $\sigma_\theta =15$).

Dentro dos modelos que incluem os efeitos de refração/difração, um fenômeno de particular importância é a não linearidade das ondas, o qual provoca uma série de modificações na sua propagação, sendo um deles caracterizado pelo aumento da celeridade por efeito da dispersão devido à amplitude de onda. Este termo leva em consideração parâmetros como a altura significativa e número de onda, e representa, até certo modo, a dispersão por amplitude. Para o cálculo do termo não linear existente no Oluca-SP, o SMC-Brasil permite definir três funções diferentes; sendo a primeira baseada na Teoria Linear, a segunda na Teoria de Stokes e a terceira correspondente a um Modelo Composto. Neste trabalho foi utilizado o Modelo Composto, o qual cobre uma maior variedade de profundidades. Este é considerado composto por utilizar em sua formulação uma relação de dispersão capaz de representar a celeridade desde águas profundas (típico da Teoria Linear) até águas de profundidade intermediária (representado pela Teoria de Stokes).

A simulação realista da propagação de ondas requer ainda a inclusão de efeitos de dissipação de energia, que também introduzem uma não linearidade à propagação das ondas. Os efeitos da não linearidade podem ser constatados, por exemplo, na presença localizada de dissipação de energia no fundo ou em algum ponto da coluna de água, que possa provocar a difração das ondas, bem como a atenuação da sua altura significativa. Dentre os efeitos de dissipação de energia

estão aqueles ocorrentes na superfície, no fundo e devido a quebra das ondas. O SMC-Brasil permite definir três diferentes tipos de dissipação devido aos efeitos de atrito com o fundo: fundo poroso, camada limite laminar e camada limite turbulenta. Sendo este último, utilizado como um dos parâmetros para a elaboração dos casos a serem propagados.

O modelo também prevê dissipação de energia devido à quebra das ondas na zona de surfe. Este é um dos fenômenos hidrodinâmicos mais importantes a serem considerados, uma vez que afetam diretamente os processos costeiros, tais como as correntes litorâneas e o transporte de sedimento. Para este tipo de dissipação também podem ser escolhidos três diferentes modelos: Battjes e Janssen (1978), Thornton e Guza (1983) e Winyu e Tomoya (1998). Para o presente estudo foi utilizado o modelo de Thornton e Guza (1983), o qual é baseado na similaridade da dissipação de energia devido à quebra das ondas e considera a distribuição de alturas de onda do tipo Rayleigh.

4.5 CORRENTES INDUZIDAS POR ONDAS

Assim como as ondas, a atuação das correntes sobre a costa influenciam sobremaneira as variações morfológicas das praias, principalmente pela sua capacidade de transporte de sedimento. Dentre os diversos tipos de correntes capazes de contribuir para o desenvolvimento da linha de costa, aquelas geradas devido às forças induzidas pela quebra das ondas podem ser consideradas as mais importantes.

Para resolver o sistema de circulação hidrodinâmica na costa, o SMC-Brasil utiliza o modelo numérico denominado Modelo de Correntes Induzidas pela Quebra de Onda Espectral (Coplá-SP), o qual se baseia na solução de equações médias do movimento e na equação da continuidade, recebendo como informações de entrada aquelas provenientes da propagação de ondas realizada com o modelo Oluca-SP, além de utilizar as mesmas malhas criadas para a propagação de ondas até a costa. Dessa forma, as simulações dos campos de correntes também levaram em consideração cenários de agitação marítima sob condições médias e extremas.

O modelo incorporado ao SMC-Brasil considera a geração de correntes apenas pela ação das ondas. O termo responsável por essa condição é denominado Tensão de Radiação, conceito desenvolvido por Longuet-Higgins e Stewart (1962). Os

autores citam que esse termo pode ser entendido como o excesso de quantidade de movimento dentro da zona de arrebentação, promovido pela quebra das ondas.

Os dois principais parâmetros responsáveis por influenciar o movimento das correntes são a Rugosidade de Fundo (expressa pelo coeficiente de Chezy) e a Viscosidade Turbulenta (ε). Ambos são responsáveis por dissipar energia, consumindo quantidade de movimento. O coeficiente de Chezy é apenas uma das variáveis presentes no termo relacionado à rugosidade, integrante do modelo de correntes, o qual também é formulado em função da profundidade e de velocidades médias. Esse coeficiente é analisado em função de variabilidades espaço-temporais associadas à profundidade total (H) e à rugosidade efetiva (K_{swc}). Para modelagem das correntes o coeficiente K_{swc} foi aproximado para 10 vezes K_s , sendo K_s a rugosidade associada ao tamanho dos sedimentos de fundo (rugosidade de Nykuradse), e posteriormente reescrita como 12 vezes Nu , sendo Nu termo relacionado à altura e forma do leito marinho. Para as características da região foi utilizado Nu igual a 0,08 (valor pré-definido pelo sistema de modelagem), resultando em um K_{swc} de 1,0 m, valor esse, próprio para áreas de praia com interação onda-corrente.

A viscosidade de redemoinho é utilizada para descrever a turbulência na zona de arrebentação. A intensidade da turbulência causada pela quebra das ondas é distribuída por toda a zona de arrebentação, e seus efeitos começam a ser mais relevantes que o atrito de fundo em zonas de maior profundidade. Para a modelagem do sistema de correntes desenvolvido nesse estudo foi utilizado o coeficiente ε igual a 11 (valor pré-definido pelo sistema de modelagem).

4.6 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS

Para realização do cálculo do transporte longitudinal de sedimento, inicialmente foi necessário aplicar a metodologia associada à análise de longo prazo, de forma a efetuar a reconstrução de uma série de estados de mar para toda a área de estudo. Os procedimentos para aplicação dessa metodologia são realizados automaticamente pelo SMC-Brasil e consistem em três passos principais: (i) seleção de casos a serem propagados; (ii) propagação dos casos; e (iii) reconstrução da série de estados do mar.

Na primeira etapa, denominada de Pré-processo, de acordo com as características do ponto DOW previamente selecionado e das malhas elaborados

para o projeto, uma série de estados de mar provenientes dos 60 anos de dados (se 1948 a 2009) são selecionados para propagação. Devido à grande quantidade de estados de mar gerados, é aplicada uma técnica estatística de Máxima Dissimilaridade (CAMUS *et al.*, 2010), a qual permite identificar, para cada malha, os casos mais representativos sem que seja perdida a variabilidade de toda a série.

Na segunda etapa os casos mais representativos são propagados através do modelo numérico Oluca-SP. Nesta etapa, as propagações foram realizadas considerando-se três níveis de maré: maré baixa (ou baixamar) com nível igual a 0 m; nível médio de maré, equivalente a 1,3 m; e maré alta (ou preamar) com nível igual a 2,6 m.

Na terceira etapa, os casos propagados compõem uma biblioteca de casos, a partir da qual, em cada nó da malha pode-se obter parâmetros de onda tais como H_s , T_p e θ_m . As séries de estado do mar para toda a área de estudo é obtida por meio da aplicação de uma série de interpolação denominada Função de Base Radial (FRANKE, 1982), especificamente projetada para dados de alta dimensionalidade sem distribuição uniforme.

A obtenção dessa série de ondas em pontos objetivos da linha de costa, além de serem utilizados como dados de entrada no modelo Copla-SP, para geração de correntes, é fundamental para avaliação da área de arrebenção das ondas, do fluxo médio de energia e do transporte longitudinal de sedimento.

Tanto o cálculo da área de arrebenção das ondas, quanto os cálculos do transporte longitudinal de sedimento e do fluxo médio de energia são assentados sobre perfis praias, suscitando na necessidade de se traçar uma série de perfis distribuídos ao longo da área de trabalho de modo a contemplar todas as praias existentes. Os procedimentos utilizados para o traçado dos perfis levaram em consideração: (i) o seccionamento em trechos retilíneos da área de estudo; (ii) o alinhamento dos perfis com orientações perpendiculares às linhas batimétricas; e (iii) extensão mínima limitada pela profundidade de fechamento (h^*). Para cada perfil ainda foram adotados valores para uma série parâmetros associados às características físicas do sedimento, e determinado o diâmetro médio do grão (D_{50}), parâmetro fundamental para o cálculo do transporte sedimentar. Os procedimentos utilizados para a obtenção da h^* e do D_{50} serão metodicamente especificados nos tópicos subsequentes.

Uma vez estabelecidas todas as etapas anteriores, torna-se possível calcular as taxas de transporte longitudinal de sedimento. O SMC-Brasil possibilita a obtenção de diferentes taxas: (i) TLS médio anual de toda série histórica da sua base de dados (1948 a 2009); (ii) TLS específico para cada ano; (iii) TLS sazonal; (iv) e o transporte mensal. O cálculo pode ser realizado utilizando-se as formulações de CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007), associadas a diferentes coeficientes dimensionais de calibração. Neste trabalho, primeiramente foi calculado o TLS médio anual de toda série histórica com as três equações, utilizando os coeficientes adimensionais propostos por Mil-Homens *et al.* (2013), de forma a avaliar qual das formulações melhor se aplica à área de estudo. Na sequência foram determinadas as taxas de TLS sazonais e decadais. Na análise sazonal foram consideradas as quatro estações do ano típicas: outono (20 de março a 21 de junho), inverno (21 de junho a 23 de setembro), primavera (23 de setembro a 21 de dezembro) e verão (21 de dezembro a 20 de março). Para a obtenção das taxas decadais, foram calculados os TLS característicos de cada ano, do horizonte de 1948 a 2009, e determinada a média interdecadal para cada perfil.

4.6.1 Profundidade de Fechamento

Como citado anteriormente, os perfis praias foram criados com uma extensão que alcançasse pelo menos a profundidade de fechamento. Este termo corresponde à profundidade onde começam a ocorrer variações significativas da topografia de fundo devido à mobilização de sedimentos pela ação das ondas. Para determinação h^* foi utilizada a equação de Harllermeier (equação 1), escrita em função da altura de onda significativa excedida doze horas ao ano (H_{s12}), do período de pico associado a essa altura de onda (T_{p12}) e da aceleração da gravidade (g).

$$h^* = 1.75H_{s12} - 57.9 \left(\frac{H_{s12}^2}{gT_{p12}^2} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Como comentado anteriormente, para realização do cálculo do TLS é necessário efetuar a reconstrução das séries de estado do mar de longa duração. Através dela é possível se obter informações de parâmetros de onda em qualquer ponto próximo à linha de costa. Os dados de H_{s12} utilizados para o cálculo da h^* , de cada perfil, corresponderam à média ponderada das alturas de onda das principais direções incidentes, obtidas através da seleção de pontos localizados próximo à

linha de costa (entre as cotas batimétricas de 5 e 11 m) e em frente aos perfis traçados. Com relação ao Tp_{12} , devido ao fato do período de onda permanecer inalterado com sua aproximação à costa, também foi realizada uma média ponderada para as principais direções incidentes, porém foram utilizadas as informações provenientes do ponto DOW selecionado inicialmente.

4.6.2 Caracterização Sedimentológica

Ao se traçar cada perfil se faz necessário definir algumas propriedades físicas relacionadas às características do sedimento de fundamental importância para estudos que contemplem análises de transporte sedimentar. Dentre essas propriedades estão a densidade do sedimento (ρ_s), a qual apresenta valor típico de 2650 kg/m^3 para sedimentos arenosos, porosidade (P_s), com valor de 0,4 para praias arenosas, e o diâmetro médio dos grãos (D_{50}) dado em milímetros. De acordo com a escala de Wentworth (1922), os sedimentos podem ser classificados como muito fino (0,0625 – 0,037 mm), fino (0,037 – 0,25 mm), médio (0,25 – 0,5 mm), grosso (0,5 – 1,0 mm) e muito grosso (1,0 – 2,0 mm). Materiais com dimensões maiores que as apresentadas são classificados como cascalho, o qual pode ser subdividido em granular (2,0 – 4,0 mm), seixo (4,0 – 64 mm), bloco (64 – 256 mm) e matacão (> 254 mm).

As informações acerca das características sedimentológicas da área de estudo (mais especificamente do D_{50} dos grãos) restringem-se a somente um trecho da praia de Ponta Negra. Para suprir essa deficiência foi utilizado o modelo de perfil de equilíbrio proposto por Brunm (1954) e Dean (1977), representado analiticamente pela equação 2, consistente para dissipações uniformes de energia de onda por unidade de volume, dentro da zona de surfe. Considerando a análise de perfis para longos períodos de tempo, da ordem de anos, por exemplo, esta equação os descrevem como curvaturas côncavas, com diminuição da inclinação ao passo que se aumenta a distância em relação à linha de costa, resultante da mobilização de sedimentos, nessa direção, por meio da ação de forças destrutivas das ondas. O deslocamento de partículas e as consequentes configurações estabelecidas na costa reduzem a dissipação de energia de onda por unidade de volume até que se origine um perfil de equilíbrio.

- Equação do perfil de equilíbrio

$$h = A_D * x^{2/3} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

h – profundidade em metros;

x – distância em relação a linha de costa;

e A_D – refere-se a um parâmetro de forma (equação 3) definido em função de um coeficiente ($k = 0.51$) determinado por Dean (1987), e pela velocidade de queda dos grãos (w), que por sua vez associasse-se com o diâmetro médio dos grãos através das relações apresentadas na tabela 2.

- Equação do parâmetro de forma

$$A_D = k * w^{0.44} \quad \text{Equação 3}$$

Tabela 2. Velocidade de queda dos grãos para areias de densidade $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$: Fonte: Dean (1987).

Limites para D_{50} (mm)	Velocidade de queda dos grãos – w (m/s)
$D_{50} < 0.1$	$w = 1.1 * 106 D_{50}^2$
$0.1 < D_{50} < 1$	$w = 273 * D_{50}^{1.1}$
$D_{50} > 1$	$w = 4.36 * D_{50}^{0.5}$

A partir das equações e relações apresentadas, é possível verificar que quanto maior for o diâmetro dos sedimentos, maior será o parâmetro A_D e a inclinação da praia. Além disso, a formulação de Dean depende exclusivamente do D_{50} e da profundidade de fechamento. Para profundidades superiores a cota de perfil ativo essa formulação perde sua validade.

Uma vez calculada as profundidades de fechamento, foram obtidos coordenadas X, Y e Z ao longo dos perfis, através do SMC-Brasil, os quais foram salvos em arquivo .DAT. Estas informações foram utilizadas como dado de entrada para aplicação da técnica de otimização *método de mínimos quadrados*, obtendo-se como resposta perfis ajustados com base na formulação de Dean, bem como seus respectivos parâmetros de forma (A_D). Com os valores de A_D foi determinada a velocidade de queda dos grãos e conseqüentemente o D_{50} .

Dessa forma, foi possível calcular o transporte longitudinal de sedimentos (TLS) para todos os perfis traçados. O cálculo do TLS foi realizado utilizando-se as três equações disponíveis no SMC-Brasil (as quais se encontram descritas abaixo), e como resposta foram obtidas taxas de transporte médias considerando toda a série temporal acessível no SMC (de 1948 a 2008), além de taxas de transporte sazonais e decadais. É importante citar que o TLS pode ocorrer em dois sentidos tendo como referência a linha de costa. O SMC utiliza como proposta a convenção adotada por Dean e Dalrymple (2004), em que, considerando um observador olhando na direção do mar, o transporte litorâneo é tido como positivo quando o sedimento é transportado para a sua direita, e negativo quando o transporte ocorre para a sua esquerda. Nesse sentido, é considerado transporte litorâneo líquido, a soma do componente positivo e negativo, e transporte litorâneo bruto a soma dos valores absolutos de cada componente. Nesse trabalho, o transporte sedimentar negativo tem sentido S-N e o transporte positivo sentido N-S.

4.6.3 Formulações Matemáticas Utilizadas para Calcular O Transporte Longitudinal de Sedimento

- **Formulação do CERC (USACE, 1984)**

A fórmula do CERC é categorizada como um método energético baseado em uma abordagem do fluxo de energia. Nesse contexto, uma das formas de representar a taxa do transporte longitudinal (Q) é através da taxa do peso imerso do sedimento (I_l), representado pela equação 4 e dado em unidades de força por unidade de tempo.

$$I_l = (\rho_s - \rho)g\alpha'Q \quad \text{Equação 4}$$

Em que ρ_s representa a densidade do material transportado, ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade e α' representa a razão entre o volume de sólidos e o volume total. Além disso, a componente I_l também se relaciona empiricamente com a componente longitudinal do fluxo de energia das ondas que entra na zona de surfe (P_l) através da equação 5:

$$I_l = KP_l \quad \text{Equação 5}$$

Sendo K um coeficiente adimensional. De forma a obtermos uma equação em função de Q substitui-se a equação 4 na equação 5, o que resulta em:

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)ga'} P_l \quad \text{Equação 6}$$

Essa equação ainda pode ser reescrita de outra forma. A taxa em que a energia das ondas é transmitida por unidade de comprimento perpendicular a direção de avanço das mesmas é dado por:

$$\bar{P} = \bar{E}C_g \quad \text{Equação 7}$$

Em que \bar{E} é a densidade de energia e C_g é a celeridade de grupo. Nos casos em que a crista da onda apresenta uma inclinação θ em relação a linha de costa, a energia de fluxo na direção de avanço das ondas por unidade de comprimento da praia é dado por:

$$\bar{P}\cos\theta_b = \bar{E}C_g\cos\theta_b \quad \text{Equação 8}$$

Dessa forma, a componente longitudinal do transporte de sedimento (P_l) é dada por:

$$P_l = \bar{P}\sin\theta_b.\cos\theta_b \quad \text{Equação 9}$$

Substituindo os seguintes termos:

$$E = \frac{1}{8}\rho gH_b^2 \quad \text{Equação 10}$$

$$C_g = \left(\frac{gH_b}{\gamma_b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação 11}$$

$$\gamma_b = \frac{H_b}{h_b} \quad \text{Equação 12}$$

$$a' = 1 - p \quad \text{Equação 13}$$

sendo θ_b o ângulo das frentes de onda no início da sua quebra com relação a orientação da linha de costa, H_b a altura de onda, h_b a profundidade de quebra das ondas, p a porosidade do material sedimentado e o termo b refere-se à linha de quebra da onda. E fazendo-se a seguinte simplificação; $\sin\theta_b.\cos\theta_b = 1/2 \sin(2\theta_b)$. Obtêm-se o formato da equação com os termos incorporados ao modelo do SMC (equação 14).

$$Q = \frac{K\rho g^{\frac{1}{2}}}{16(\rho_s - \rho)(1 - p)\sqrt{\gamma_b}} H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\theta_b) \quad \text{Equação 14}$$

A equação CERC calcula a taxa total de sedimento transportado, não havendo distinção entre a carga de transporte em suspensão e a carga de fundo. Além disso, a única influência referente ao tamanho dos grãos na equação sete é proveniente da constante K, no entanto, seu valor pode variar significativamente; uma revisão realizada por USACE em 1977 mostrou que o mesmo pode variar entre 0,2 e 1,6.

- **Formulação de Kamphuis (1991)**

A formulação de Kamphuis foi obtida por meio de um método de análise dimensional a partir de experimentos em laboratório no qual foram desenvolvidos testes de pequena escala com o objetivo verificar o comportamento de parâmetros específicos, considerados importantes para o transporte de sedimentos. Vale-se destacar a influência de parâmetros como o período de onda, a inclinação da praia, o diâmetro das partículas e a inclinação das ondas em relação a linha de costa nessa formulação, além do tamanho dos grãos, que não foi considerado na equação CERC.

A equação testada nesse estudo foi a seguinte (equação 15):

$$\frac{I_m}{\rho H^3} = k^* \left(\frac{H_b}{L_0}\right)^P m_b^q \left(\frac{H_b}{D_{50}}\right)^r \sin^s(2\theta_b) \quad \text{Equação 15}$$

em que I_m é a massa imersa de sedimento transportada ao longo da costa, dada em Kg/s, ρ é a densidade do fluido, H_b e T_p e θ são a altura, o período de pico e o ângulo de aproximação da onda, L_0 o comprimento de onda, m a inclinação da onda, D_{50} é o diâmetro médio dos grãos, b refere-se a quebra da onda, k^* é um coeficiente de calibração (determinado empiricamente) e P , q , r e s são expoentes. I_m se relaciona com a taxa de transporte Q (m^3/s) através de:

$$Q = \frac{I_m}{(\rho_s - \rho)(1 - p)} \quad \text{Equação 16}$$

Em que ρ_s é a densidade do material transportado, ρ é a densidade da água e p é a porosidade do material transportado.

A partir dos dados experimentais provenientes dos testes realizados com a geração de ondas irregulares a equação 15 pode ser reescrita da seguinte forma

$$\frac{I_m}{\frac{\rho H_b}{T_p}} = 1,3 \times 10^{-3} \left(\frac{H_b}{L_0}\right)^{-1,25} m_b^{0,75} \left(\frac{H_b}{D_{50}}\right)^{0,25} \sin^{0,26}(2\theta_b) \quad \text{Equação 17}$$

Mil-Homens *et al.*, (2013) calibraram os coeficientes e expoentes desta fórmula e chegaram a seguinte equação:

$$I_m = 2,27.H_b^{2,75}T_p^{0,89}m_b^{0,86}D_{50}^{-0,69}\sin^{0,56}(2\theta_b) \quad \text{Equação 18}$$

- **Formulação de Bayram *et al.* (2007)**

A capacidade preditiva da formula de Bayram *et al.*, (2007) foi avaliada através de seis conjuntos de dados de alta qualidade sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimento coletados durante condições de campo e de laboratório. E diferentemente das formulações de CERC e Kamphuis, em que o transporte de sedimento ocorre como resultado de correntes geradas pela quebra das ondas, nesta, também se aplicam os casos em que a corrente é gerada pela ação dos ventos ou da maré. Contudo, esses fenômenos não são levados em consideração pelo SMC-Brasil.

Nesta formulação, o sedimento colocado em suspensão pela ação das ondas é considerado o principal meio de transporte na zona de arrebentação. A quantidade total de trabalho (W) necessário para manter uma determinada concentração, $c(x,z)$, de sedimento suspenso é dado pelo produto dessa própria variável e o peso submerso das partículas com a velocidade de queda (w_s),

$$W = \int_0^{x_b} \int_{-h(x)}^0 c(x,z)(\rho_s - \rho)gw_s dz dx \quad \text{Equação 19}$$

em que x é a coordenada transversal, com sua origem na costa e referenciada positivamente na direção até o mar, z é a coordenada vertical, com origem no nível médio da água em repouso e h a profundidade. Simplificadamente, considerando que; apenas parte, ε , do fluxo de energia de onda (F) é utilizado para a realização de trabalho ; que a taxa de transporte de longitudinal total (Q_{lst}) pode ser representado pelo produto da concentração com a velocidade de corrente longitudinal (V),

$$Q_{lst} = \int_0^{x_b} \int_{-h(x)}^0 c(x,z)V(x,z) dz dx \quad \text{Equação 20}$$

Supondo uma velocidade de corrente longitudinal constante, a partir das equações anteriores, obtêm-se a seguinte formulação para Q_{lst} ,

$$Q_{lst} = \frac{\epsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - p)g w_s} F \bar{V} \quad \text{Equação 21}$$

sendo \bar{V} uma velocidade longitudinal de corrente média, p a porosidade do sedimento e ϵ (coeficiente de transporte) um coeficiente adimensional que representa a eficiência das ondas em manter o sedimento suspenso.

4.6.4 Coeficientes Adimensionais Utilizados nas Formulações

As formulações anteriormente apresentadas foram desenvolvidas com o objetivo de representar o mecanismo físico do transporte de sedimentos. Apesar da complexidade e capacidade preditiva de cada uma delas, muitas vezes a descrição de fenômenos naturais através de formulações matemática necessita de simplificações decorrentes, por exemplo, de componentes que não podem ser compreendidos ou representados. Nas equações, essas simplificações podem ser compensadas por meio da inserção de coeficientes adimensionais, obtidos empiricamente ou através de relações entre parâmetros com influência sobre o evento que se busca descrever. Nas equações de CERC, Kamphuis e Bayram esses coeficientes correspondem respectivamente aos parâmetros K , k^* , ϵ .

A determinação e calibração desses coeficientes (com destaque para o K da equação CERC por ser a mais antiga e amplamente utilizada) representou o foco no desenvolvimento de vários estudos, a exemplo de; Komar e Inman (1970), Kamphuis e Readshaw (1978), Del Valle *et al.* (1993), Smith *et al.* (2009) e Mil-Homens *et al.* (2013), para a equação CERC; Kamphuis (1991), Schoonees e Theron (1996) e Mil-Homens *et al.* (2013), para a equação de Kamphuis; e Bayram *et al.* (2007) e Mil-Homens *et al.* (2013), para a equação de Bayram *et al.* (2007). Dentre os possíveis coeficientes disponíveis no SMC-Brasil, no presente trabalho foram utilizados os obtidos por Mil-Homens *et al.* (2013). Neste trabalho os autores utilizaram o mais extenso banco de dados sobre TLS disponível atualmente (BAYRAM *et al.*, 2007) para a calibração dos coeficientes, além de aplicarem métodos estatísticos de *bootstrapping* e *validação cruzada* para testarem as generalidades provenientes das melhorias das formulas. Os coeficientes de calibração correspondentes as suas respectivas formulações podem ser observadas na tabela 3 abaixo:

Tabela 3. Coeficientes de calibração obtidos por Mil-Homens *et al.* (2013) para cada formulação utilizada no trabalho.

Formulações	Coeficientes de calibração (MIL-HOMENS <i>et al.</i> , 2013)
CERC (USACE, 1984)	$K = \left[2237.7 \left(\frac{H_{sb}}{L_o} \right)^{1.45} + 4.505 \right]^{-1}$
Kamphuis (1991)	$I_m = 2,27 \cdot H_{sb}^{2,75} T_p^{0,89} m_b^{0,86} D_{50}^{-0,69} \sin^{0,56}(2\theta_b)$
Bayram <i>et al.</i> (2007)	$\epsilon = \left[7.682 \times 10^5 \left(\frac{H_{sb}}{L_o} \right)^{1.283} + 1672.2 \right]^{-1}$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes à aplicação do modelo SMC-Brasil à região costeira frontal de Natal. Seguindo a sequência de aplicação dos modelos que integram esse sistema de modelagem, apresentam-se inicialmente os resultados referentes à definição do clima de ondas ao largo da área de estudo, seguido da propagação de ondas até a costa e das correntes induzidas. Por fim são apresentados e discutidos os resultados pertinentes ao transporte longitudinal de sedimentos.

5.1 CLIMA DE ONDAS AO LARGO DA ÁREA DE ESTUDO

Como abordado no capítulo 4, referente à metodologia aplicada ao trabalho, a caracterização do clima de ondas ao largo da área de estudo foi perpassada inicialmente pela seleção de um ponto DOW representativo para a região. Os pontos DOW resultam de um processo denominado downscaling, e os resultados referentes aos parâmetros de onda a eles associados compõem a base de dados do SMC-Brasil, podendo ser acessados por meio das ferramentas matemáticas/estatísticas incorporadas ao sistema de modelagem.

A escolha do ponto DOW resultou de uma abordagem comparativa entre 11 pontos (representados pelas siglas com numeração de P1 a P11 na figura 19) baseada em análises estatísticas por meio de histogramas e regressão linear. Dentre os parâmetros de onda obtidos, este procedimento foi aplicado às alturas significativas e às direções de incidência. Os pontos selecionados se encontram localizados no intervalo das cotas batimétricos de 15 e 20 metros e coordenadas especificadas na tabela 4.

Selecionado o ponto DOW, os resultados para a caracterização do clima de ondas são apresentados levando-se em consideração abordagens de estatística descritiva, análise de regime médio e análise de regime extremo dos parâmetros de onda, a saber: altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção de incidência (Dir).

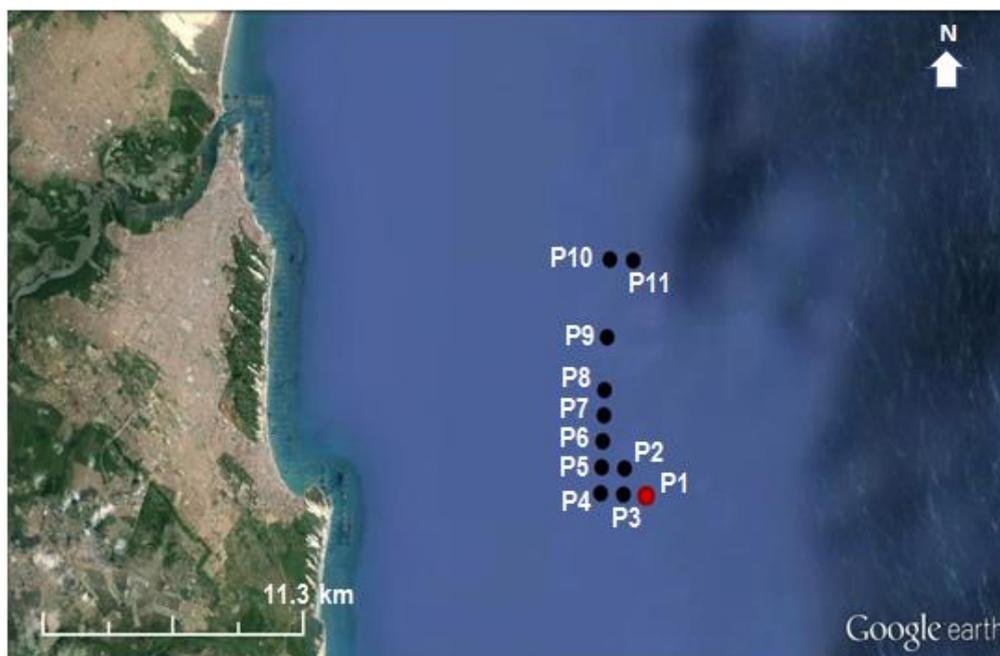


Figura 19. Pontos DOW selecionados para caracterização do clima de ondas da área de estudo, com destaque em vermelho para o ponto escolhido.

Tabela 4. Coordenadas dos pontos DOW selecionados para caracterização do clima de ondas adjacente a região de estudo.

Pontos DOW	Latitude (°)	Longitude (°)	Profundidade (m)
P1	-5.877	35.030	19.39
P2	-5.877	-35.039	18.43
P3	-5.868	-35.039	18.82
P4	-5.877	-35.048	16.10
P5	-5.868	-35.048	16.79
P6	-5.859	-35.048	16.99
P7	-5.850	-35.048	17.14
P8	-5.8413	-35.048	17.97
P9	-5.823	-35.048	18.75
P10	-5.796	-35.048	19.92
P11	-5.796	-35.039	19.98

Através da análise da probabilidade de incidência (Figura 20) foi possível observar que para a região de estudo as ondas incidem, predominantemente, das direções, Leste-Nordeste (ENE), Leste (E), Leste-Sudeste (ESE) e Sudeste (SE). A análise dos histogramas de altura significativa de onda por direção de incidência (Figura 21a e 21b) demonstra que o ponto P1 apresenta alguns dos valores mais

elevados desse parâmetro, além de exibir valores semelhantes à média aritmética geral, como constatado pelos altos coeficientes de correlação por regressão linear apresentados nas figuras 22a e 22b. Apesar de alguns outros pontos se mostrarem representativos para caracterizar o clima de ondas da região, aspectos limitantes do modelo SWAN (sistema de modelagem utilizado nessa escala de trabalho), como a localização geográfica em relação à área de estudo (levando-se em consideração as direções de incidência de onda), bem como a profundidade que se encontravam os pontos verificados, foram condicionantes fundamentais para a escolha do DOW P1, que se encontra a aproximadamente 16 km da praia de Ponta Negra. Além disso, Almeida *et al.* (2014) observaram que, nas proximidades do Cânion do Potengi, as ondas sofrem influencia devido a fenômenos de refração, fato este que restringiu a escolha de pontos mais próximos a essa feição.

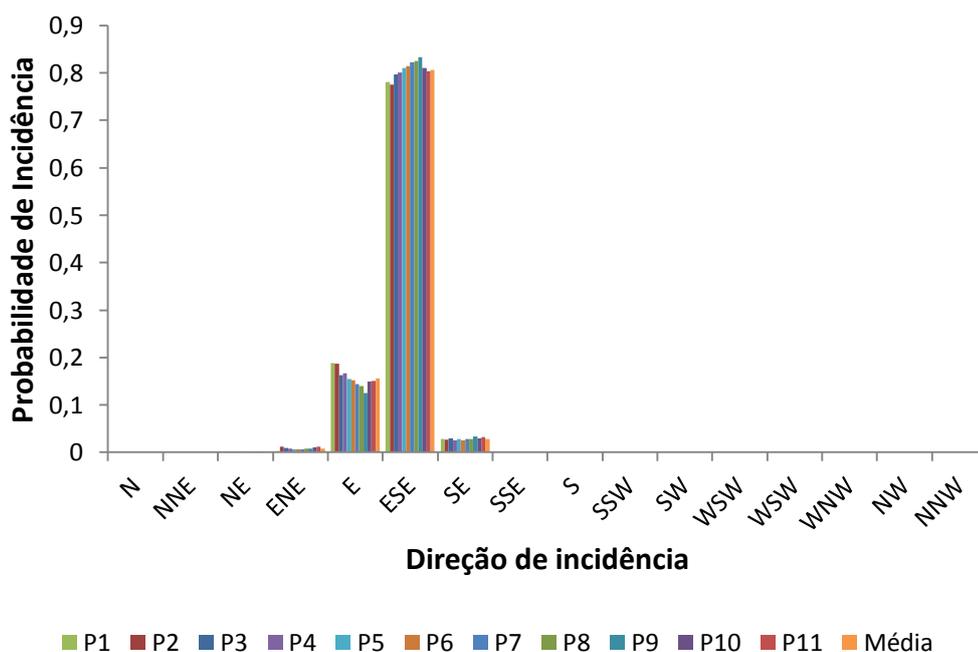


Figura 20. Histograma da probabilidade de incidência das ondas para todos os pontos DOW selecionados.

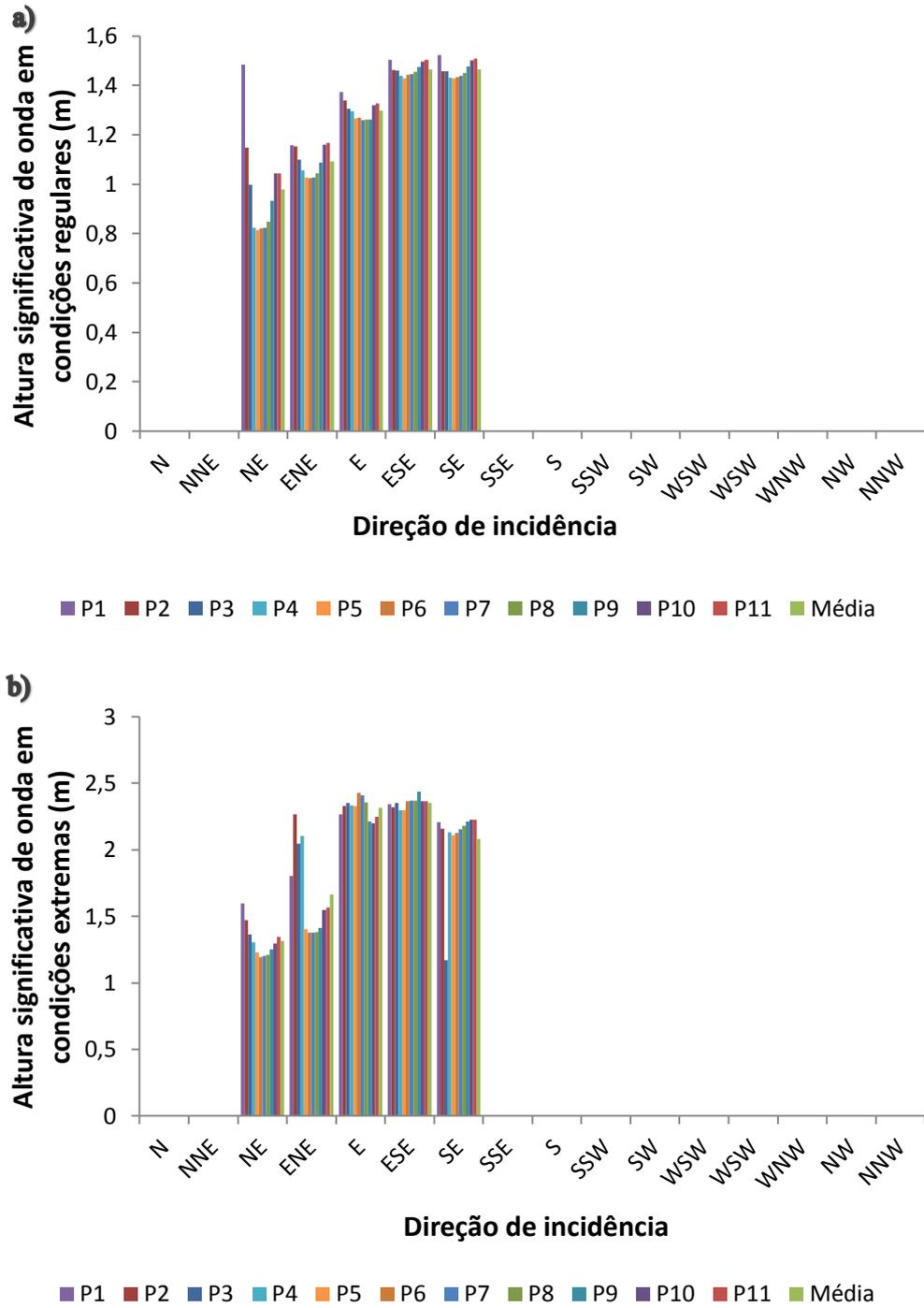


Figura 21. Histograma da altura significativa por direção de incidência em (a) condições regulares e (b) condições extremas.

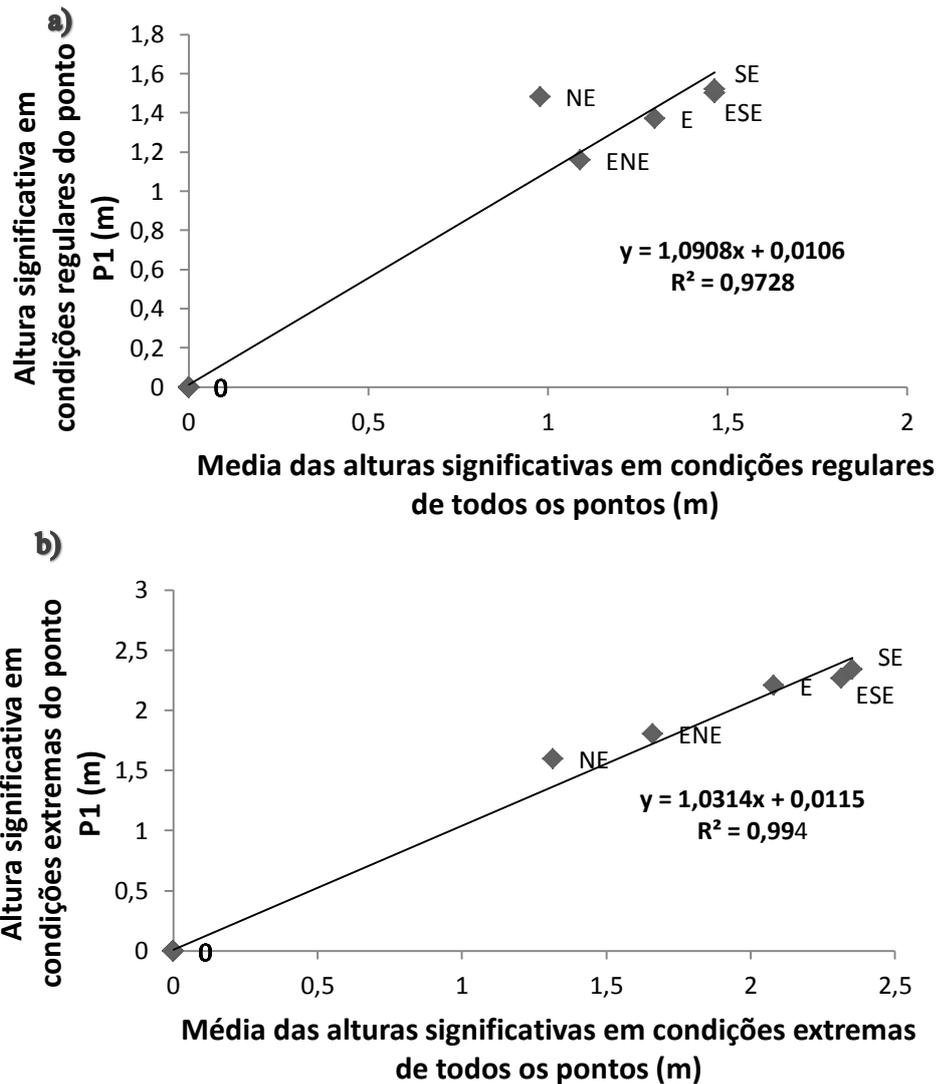


Figura 22. Regressão linear entre as alturas significativas do ponto P1 e a média aritmética geral dos pontos analisados em (a) condições regulares e (b) condições extremas.

De acordo com o ponto DOW P1, na área de estudo incidem ondas de direções Nordeste (NE), Leste-Nordeste (ENE), Leste (E), Leste-Sudeste (ESE) e Sudeste (SE). Dentre essas, as ondas mais frequentes são as de direção E, ESE e SE, representando 99,75 % dos estados do mar, o que pode ser observado na tabela 5. Desse total, observa-se que 78,04 % são provenientes da direção ESE, 18,83 % da direção E, e 2,88 % da direção SE. Além disso, verifica-se que em condições médias (ou valor de determinado parâmetro não superado em 50% do tempo) a altura significativa de onda ($H_{s50\%}$) foi de 1,37 m para a direção E, 1,50 m para ESE e 1,52 para SE. Para a mesma condição, os valores de $T_{p50\%}$ nas direções E, ESE e SE foram, respectivamente, 7,99 s, 7,19 s e 6,52 s.

Na ocorrência de eventos extremos, tais como tempestades ou ressacas marinhas, capazes de fornecer mais energia ao clima de ondas, o parâmetro H_s é avaliado como a altura significativa de onda superada 12 horas ao ano (H_{s12}). Os valores de H_{s12} para as direções E, ESE e SE foram 2,27 m, 2,34 m e 2,20 m, com respectivos períodos de pico (T_{p12}) de 17,78 s, 11,88 s e 9,11 s.

Tabela 5. Probabilidade de ocorrência de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p). Os termos 50% e 12 correspondem, respectivamente, ao valor de altura de onda não superado em 50% do tempo e a altura significativa de onda superada 12 horas ao ano.

Direções	Probabilidade de direções	$H_{s50\%}$ (m)	$T_{p50\%}$ (s)	H_{s12} (m)	T_{p12} (s)
N	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NE	0,0001	1,483	10,198	1,597	10,773
ENE	0,0024	1,159	8,648	1,803	19,519
E	0,1883	1,372	7,992	2,266	17,777
ESE	0,7804	1,503	7,192	2,342	11,883
SE	0,0288	1,522	6,521	2,206	9,113
SSE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
W	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
WNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
NNW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5.1.1 Estatística Descritiva da Altura Significativa de Onda

Na Figura 23a é apresentada a série temporal (de 1948 a 2008) de altura significativa de onda (H_s) do ponto DOW analisado (séries de estado do mar de 60 anos a cada hora). Observa-se que os valores de H_s se encontram, principalmente, na faixa entre 0,75 m e 2,25 m, com os maiores picos ocorrendo entre os anos de 1980 e 2010. A rosa de direções (figura 23b) indica a predominância de ondas incidentes das direções E e ESE. A partir do histograma de H_s (Figura 24a) verifica-se uma característica simétrica, com a frequência apresentando maior valor no

centro, indicando uma maior ocorrência de H_s de aproximadamente 1,5 m, e decrescendo gradualmente em ambos os lados. Observar-se ainda, uma amplitude de H_s que vai de 0,5 m a 2,7 m. Além disso, a partir da função de distribuição (figura 24b), observa-se que 75% dos estados do mar apresentam ondas com alturas inferiores a 1,654 m.

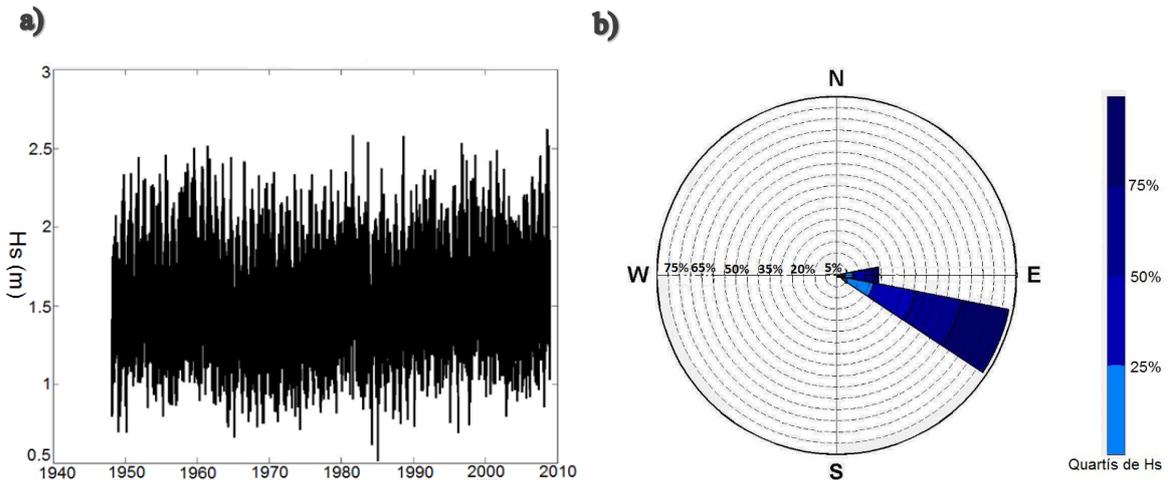


Figura 23. Estatística descritiva de altura significativa de onda: (a) série temporal de ondas, (b) rosa de direções de onda.

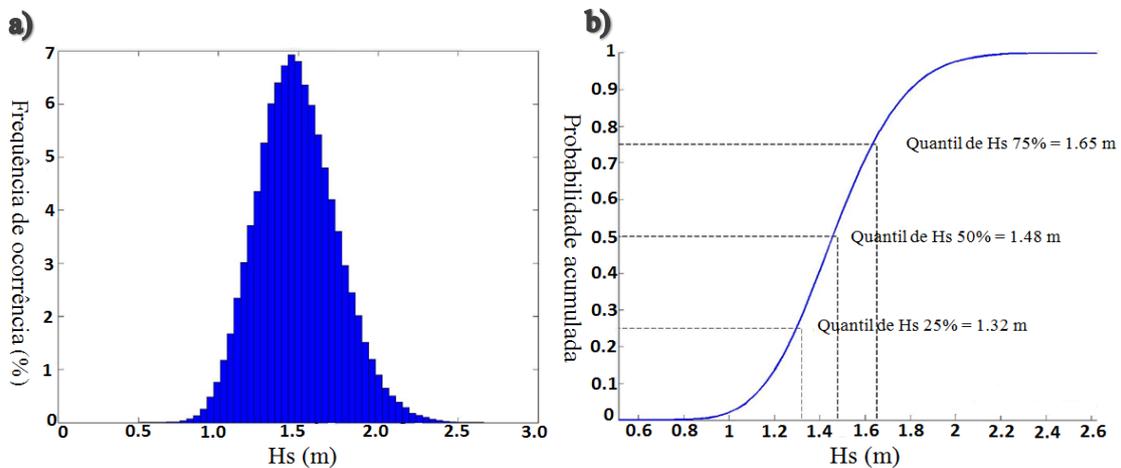


Figura 24. Estatística descritiva de altura significativa de onda: (a) histograma de H_s , (b) função de distribuição de H_s .

5.1.2 Estatística Descritiva do Período de Pico de Onda

Na Figura 25 é apresentada a série temporal de 1948 a 2008 referente ao período de pico de ondas (T_p). Observa-se que os valores de T_p se encontram, principalmente, na faixa entre 5 s e 14 s, com a ocorrência de valores máximos e mínimos em torno de 1 s e 20 s. O histograma de T_p (Figura 26 a) tem característica

razoavelmente simétrica, com a frequência apresentando maior valor no centro, indicando uma predominância de T_p igual a 7 s, com amplitude que vai de 2 a 16 segundos. Além disso, a partir da função de distribuição (Figura 26 b), observa-se que 75% dos estados do mar apresentam ondas com períodos inferiores a 8,006 s.

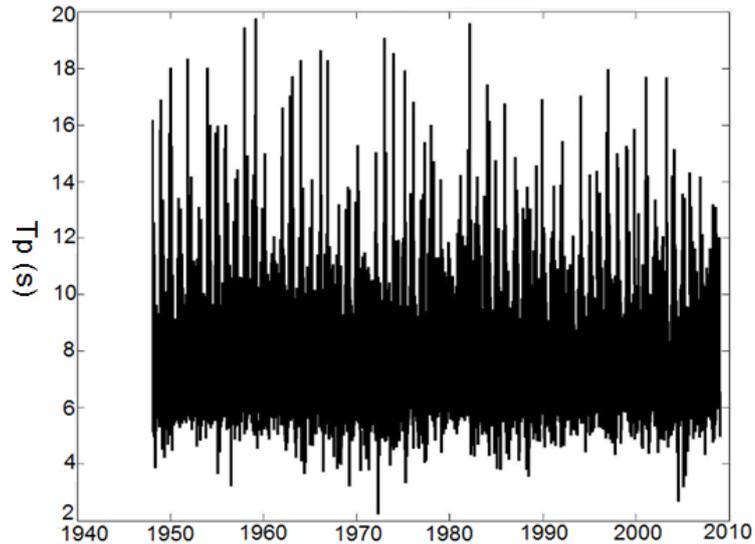


Figura 25. Série temporal compreendida entre 1948 e 2009 referente às informações de período de pico.

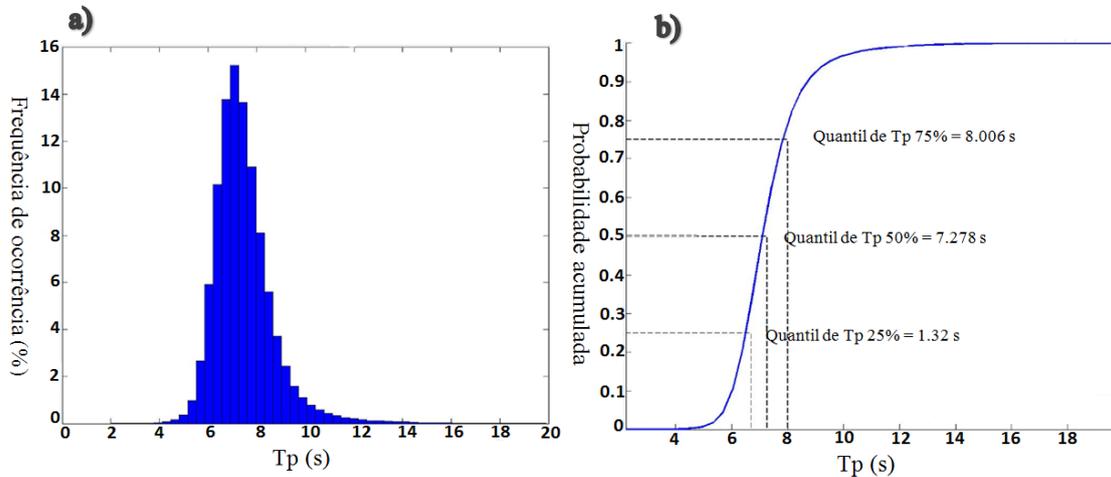


Figura 26. Estatística descritiva do período de pico: (a) histograma de T_p , (b) função de distribuição de T_p .

5.1.3 Distribuição Conjunta Entre Direção de Incidência (Dir), H_s e T_p

A relação entre a altura significativa de onda e o período de pico pode ser realizada por meio do diagrama de distribuição conjunta H_s - T_p (Figura 27), proveniente de uma função de distribuição de probabilidade (PDF - do inglês *Probability Distribution Function*). A partir da indicação da escala de cores, é possível observar que as ondas mais frequentes apresentam H_s entre os valores 1,2

m e 1,8 m, com respectivos períodos de pico entre os valores de 6 e 9 s, sendo maior a probabilidade de ocorrência de ondas com Hs de 1,5 m e Tp de 7,5 s.

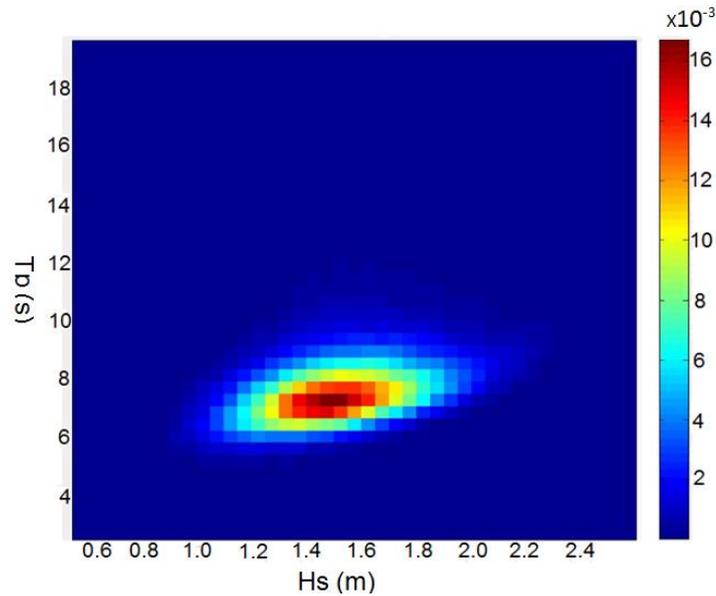


Figura 27. Distribuição conjunta entre altura significativa de onda e período de pico.

Na Figura 28 são apresentados diagramas de distribuição conjunta entre a direção de incidência das ondas e os parâmetros de altura significativa (Hs) e período de pico (Tp). A partir das escalas de cores, é possível observar uma maior frequência de ocorrência das ondas vindas da faixa de direções entre 100° e 120°, compreendidas no quadrante sudeste, com período de pico variando aproximadamente entre 6 e 9 s, e altura de onda significativa variando entre 1,2 e 2,0 m.

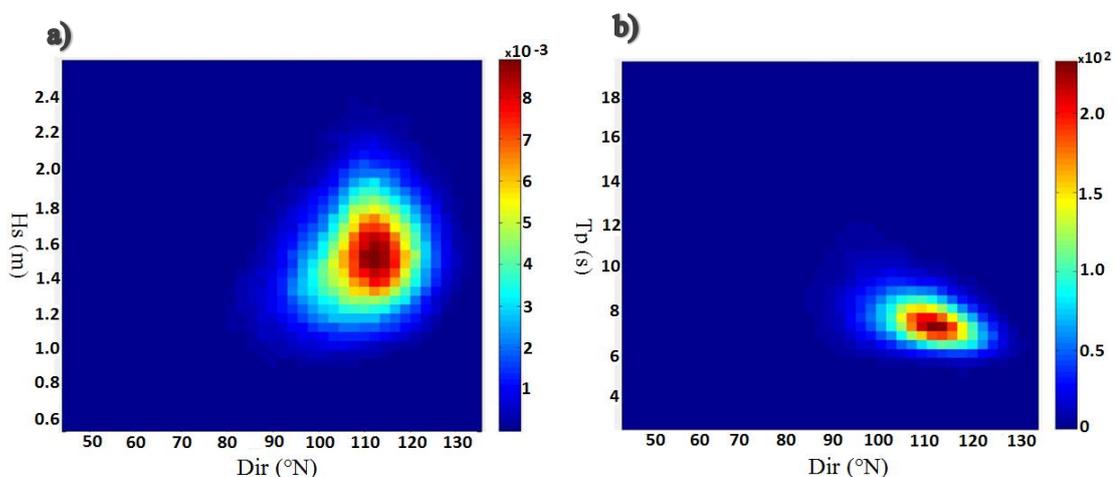


Figura 28. Diagrama de distribuição conjunta entre: (a) direção de incidência das ondas e altura significativa e (b) direção de incidência das ondas e período de pico. Escalas de cores indicam frequências de ocorrências dos parâmetros em análise.

5.1.4 Análise do Regime Médio de Ondas

O regime médio consiste na informação estatística de um determinado parâmetro de estado do mar em um período de tempo determinado, podendo ser expresso em meses, estações ou anos. Esse tipo de informação é extremamente importante, uma vez que, a partir dela é possível determinar, por exemplo, a probabilidade que um valor qualquer de H_s não seja superado em um ano médio. O SMC-Brasil realiza o ajustamento do regime médio anual escalar de H_s e T_p por meio das distribuições Gumbel de Máximos, Log normal, Normal e Weibull de Mínimos.

Através do cálculo do coeficiente de correlação R^2 verificou-se que, para o coeficiente H_s , a distribuição Lognormal foi a que melhor se ajustou, enquanto que a distribuição Gumbel de Máximos melhor se ajustou ao coeficiente de T_p (Figura 29a e 29b). Essas respectivas funções de distribuição são expressa pelas seguintes equações:

- Função de distribuição Lognormal

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] dx; \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Equação 22}$$

Com os coeficientes μ representando a média da distribuição e σ é o desvio padrão.

- Função de distribuição Gumbel de Máximos

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{-(x - \lambda)}{\delta} \right) \right]; \quad -\infty < x < \infty \quad \text{Equação 23}$$

Onde λ é o parâmetro de localização (a moda da distribuição); δ é o parâmetro de escala proporcional ao desvio típico da distribuição:

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \delta^2}{6} \quad \text{Equação 24}$$

Nos gráficos de regime escalar médio para H_s e T_p (Figura 29a e 29b) os pontos pretos representam os dados (já calibrados) desses dois parâmetros e o regime escalar é representado pela reta vermelha (dados delimitados pelo intervalo de confiança entre 10% e 99,5%). Não foram considerados os dados localizados na região inferior do gráfico por se tratarem de ondas e períodos de magnitude muito pequena, nem os dados localizados na região superior do mesmo, por serem característicos de eventos extremos.

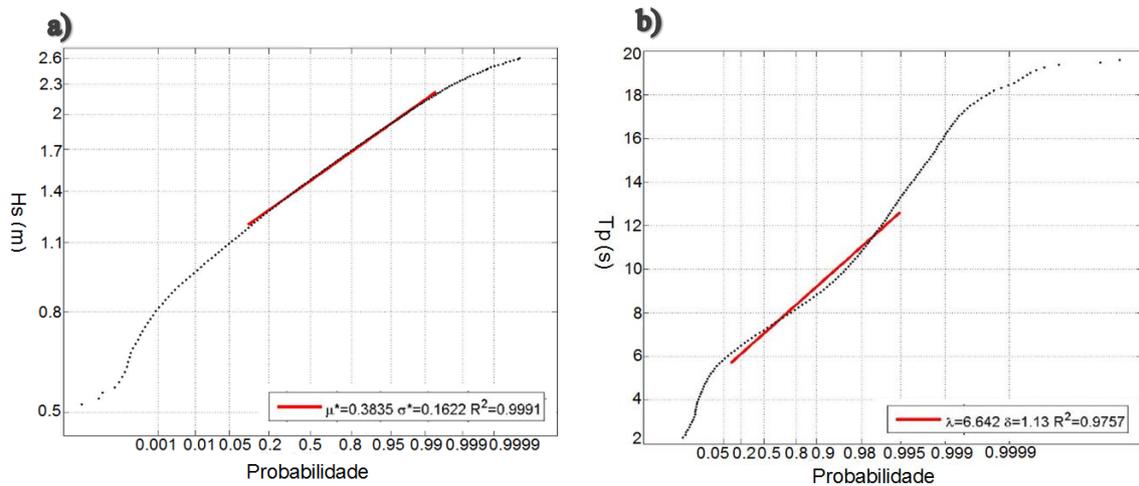


Figura 29. Gráficos de ajustamento do regime médio anual escalar de (a) Hs, por meio de uma função de distribuição lognormal e (b) Tp, por meio da função de distribuição Gumbel de Máximos.

Na Tabela 6 estão representados os valores de R^2 , μ e σ para o regime escalar médio de Tp (segundo a distribuição Normal) e λ , δ e R^2 para o regime escalar médio de Hs (segundo a distribuição Gumbel de Máximos).

Tabela 6. Parâmetros característicos de regime médio escalar de ondas para altura significativa (Hs) e período de pico (Tp). Para Hs estão associados os parâmetros referentes a média da distribuição (μ), desvio padrão (σ) e o coeficiente de correlação (R^2). Enquanto que para Tp estão associados a moda da distribuição (λ), o parâmetro de escala (δ) e o coeficiente de correlação (R^2).

REGIME MÉDIO ESCALAR			
Altura significativa de onda - Distribuição Lognormal		Período de pico - Distribuição Gumbel de Máximos	
μ	0.3835	λ	6.642
σ	0,1622	δ	1.13
R^2	0.9991	R^2	0.9757

5.1.5 Análise do Regime Extremo de Ondas

O regime extremo de um determinado parâmetro representa a probabilidade de que o valor máximo desse parâmetro, em um período de tempo determinado, não seja superado. Os valores extremos dos parâmetros de onda podem ser ajustados por três distribuições, Gumbel, Fréchet e Weibull, segundo o teorema das três filas (FISHER e TIPPETT, 1928). Estes três tipos podem ser combinados em uma única expressão denominada *distribuição de valores extremos generalizados* (GEV), dada pela seguinte equação:

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\Psi} \right)^{1/\xi} \right] \quad \text{Equação 25}$$

Em que μ é parâmetro de localização; Ψ significa o parâmetro de escala; ξ é parâmetro de forma.

- Para $-0,05 < -\xi < 0,05$ a distribuição resultante é a de Gumbel;
- Para $\xi > 0,05$ a distribuição resultante é a de Fréchet;
- Para $\xi < -0,05$ a distribuição resultante é a de Weibull.

A partir do valor de ξ expresso nos gráficos do regime extremo escalar da altura de onda significativa ($\xi = -0.315$) e do período de pico ($\xi = -0.329$), conclui-se que os dados gerados se ajustam melhor à distribuição de Weibull (Figura 30).

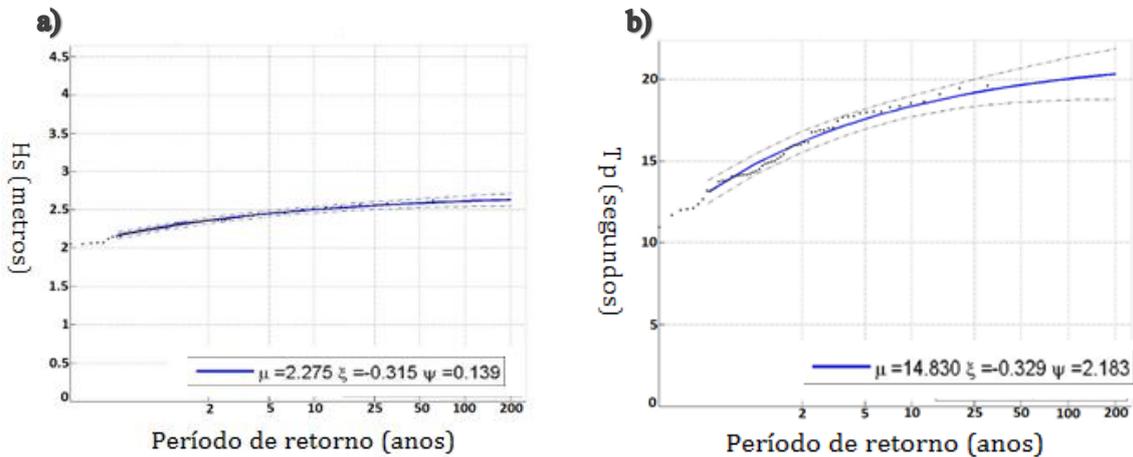


Figura 30. Ajustes de valores extremos por máximos anuais e distribuição de valores extremos generalizados para (a) H_s e (b) T_p .

5.1.6 Considerações Sobre o Clima de Ondas ao Largo Área de Estudo

A partir dos resultados obtidos para caracterização do clima de ondas, é verificado que na região de estudo predominam ondas incidentes das direções E, ESE e SE, sendo mais prenunciadas aquelas de direção ESE, e estados de agitação marítima com H_s e T_p inferiores a 1,654 m e 8,006 s, respectivamente. Somente na ocorrência de eventos extremos, com período de retorno superior a 10 anos, pode ser verificada a ocorrência de H_s e T_p superiores a 2,5 m e 18 s. Em termos gerais, são observadas alturas médias de onda em torno de 1,37 m, 1,5 m e 1,52 m para as direções E, ESE e SE, respectivamente, com períodos de pico de 7,99 s, 7,19 s e 6,52 s. Na ocorrência de eventos mais energéticos foram verificadas, para essas

mesmas direções, alturas de onda de 2,26 m, 2,34 m e 2,20 m com períodos associados de pico de 17,77 s, 11,88 s e 9,11 s. Esses resultados corroboram com estudos anteriores, a exemplo de Amaral, 2000; Cunha, 2004; Amaro *et al.*, 2012b.

O estado do mar em zonas profundas e intermediárias compreende uma combinação de ondas geradas localmente pelos ventos (ondas do tipo *sea*) e ondas originadas fora das imediações da área em que elas se propagam (ondas do tipo *swell*). O conhecimento desses dois tipos de onda se torna importante uma vez que eles podem fornecer diferentes condições extremas de ondas (REEVE *et al.*, 2004). Neste trabalho foram consideradas ondas do tipo *swell* aquelas com períodos de pico maior ou igual a 10 s, porém, na literatura podem ser encontrados ainda casos de T_p maior ou igual a 8 s (REEVE *et al.*, 2004; CUNHA, 2004).

De acordo com os dados provenientes da estatística descritiva e da análise de longo prazo, verifica-se que a grande maioria das ondas que ocorrem na área de trabalho é do tipo *sea*, o que coincide com o padrão de ventos da região, que provêm, predominantemente, do quadrante SE, e com estudos realizados por Cunha (2004), o qual, considerando a distribuição anual dos tipos de onda, observou um claro predomínio das ondas formadas por influência dos campos de vento local, apresentando uma frequência relativa de 70%, enquanto que as do tipo *swell* apresentaram frequência de 12%.

Apesar das ondas do tipo *sea* predominarem na região costeira de estudo, as do tipo *swell* estão associadas às maiores alturas de onda, e ao deslocarem-se por uma faixa de amplo *fetch* (distância horizontal sobre a qual os ventos percorrem), atingem a costa com amplo comprimento e período, provocando uma sobre-elevação do volume de água (*set-up*). Este processo, atrelado ao rompimento das ondas, desencadeia a movimentação do sedimento de fundo, além de promover a transposição dos sedimentos da face de praia em direção ao mar.

5.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATÉ A COSTA

Como já discutido no capítulo 4 (Metodologia), a propagação de ondas até à costa realiza-se por meio do modelo Oluca-SP, e os casos a serem propagados, tanto em condições de agitação marítima média, quanto extremas, bem como as malhas para a realização da modelagem, dependem dos resultados provenientes do clima de ondas ao largo da região de estudo. Na sequência são apresentados as

malhas e os casos de propagação elaborados, além dos principais resultados e considerações a respeito da propagação de ondas até a costa.

Sendo conhecidas, a partir da análise do clima de ondas da região, as principais direções incidentes de ondas, foi possível definir as malhas utilizadas na propagação até a costa. Nesta etapa do trabalho foram levadas em consideração apenas as ondas incidentes de E, ESE e SE, uma vez que representam 99.75 % dos estados do mar. Características como a orientação no sentido Norte-Sul da linha de costa, a pouca extensão da plataforma costeira e a direção de incidência das ondas, permitiu a elaboração de três malhas simples, com bordas de entrada próximas a cota batimétrica de 19 m, angulações azimutais coincidentes com as principais direções das ondas, equivalentes a $N90^{\circ}E$, $S67,5^{\circ}E$ e $S45^{\circ}E$, e resolução de aproximadamente 23 m (Figura 31a, 31b e 31c).

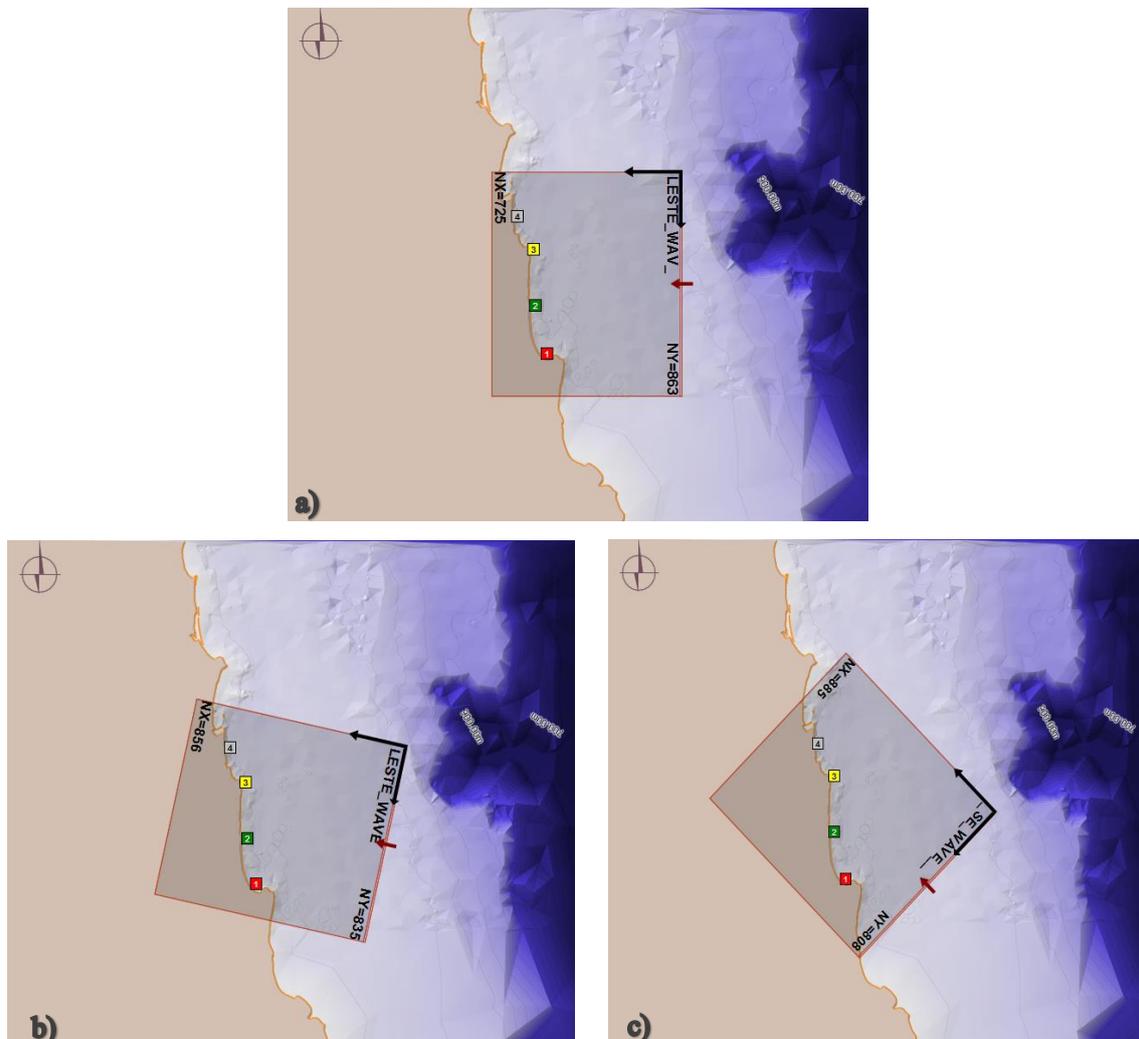


Figura 31. Malhas utilizadas na propagação de ondas associadas aos (a) casos com ondas de Leste, (b) casos com ondas vindas de Leste-Sudeste e (c) casos com ondas vindas de Sudeste.

Além das direções de incidência das ondas, os casos de propagação levaram em consideração os níveis de maré de preamar e baixamar, H_s e T_p para regimes marítimos sob condições médias normais e sob condições extremas, além do parâmetro de dispersão angular e o fator de alargamento, já comentados anteriormente. Seus respectivos valores estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de onda utilizados para os casos de propagação. Índices subscritos 50% e 12 correspondem a condições médias e extremas (ou valores superados doze horas ao ano) de estado do mar, respectivamente. O parâmetro γ corresponde ao fator de alargamento do pico e σ_θ ao parâmetro de dispersão angular.

Casos	$H_{s_{50\%}}$ (m)	$T_{p_{50\%}}$ (m)	$H_{s_{12}}$ (m)	$T_{p_{12}}$ (m)	γ	σ_θ (graus)	Maré (m)
E	1.37	7.99	----	----	3.3	20	0
E	1.37	7.99	----	----	3.3	20	2.6
E	----	----	2.27	17.78	8	15	0
E	----	----	2.27	17.78	8	15	2.6
ESE	1.5	7.19	----	----	3.3	20	0
ESE	1.5	7.19	----	----	3.3	20	2.6
ESE	----	----	2.34	11.88	8	15	0
ESE	----	----	2.34	11.88	8	15	2.6
SE	1.52	6.52	----	----	3.3	20	0
SE	1.52	6.52	----	----	3.3	20	2.6
SE	----	----	2.20	9.11	3.3	20	0
SE	----	----	2.20	9.11	3.3	20	2.6

5.2.1 Ondas Associadas a Condições Médias e Extremas de Agitação Marítima

Para cada caso propagado é obtida uma série de gráficos gerados em mapa. Devido à grande quantidade de produtos disponíveis, serão apresentados somente resultados de isolinhas de H_s e vetores de H_s acompanhado de mapa topográfico, para $H_{s_{50\%}}$ e $H_{s_{12}}$, nas situações de preamar e baixamar, das principais direções incidentes de onda (E, ESE e SE). Além disso, os resultados serão interpretados separadamente para cada setor de estudo, exceto quando estes apresentarem respostas semelhantes.

Em condições de agitação marítima média ($H_{s_{50\%}}$) nas situações de preamar, observa-se que as ondas incidentes da direção E alcançam a costa com alturas variando de 0,9 a 1,5 m (Figura 32a). É importante destacar que as maiores alturas significativas ocorrem no setor II, representado pelo trecho de praia defronte à via costeira, sendo essa a região mais exposta à ação das ondas.

Nos trechos de praia abrigados pelas Pontas de Mãe Luiza e Ponta Negra, são verificadas as menores alturas de onda, o que evidencia a função de proteção natural que esses elementos desempenham. Com a interpretação dos gráficos de isolinhas da região que se estende da Praia dos Artistas a Praia do Forte, é observada uma alternância da ação de ondas com alturas entre 0,9 e 2,0 m. É interessante ressaltar que as informações batimétricas utilizadas não são capazes de representar a linha de arrecifes de arenito existente nessa porção da costa, o qual poderia atuar como elemento natural de proteção contra a ação das ondas. Com relação aos vetores de ondas apresentados na figura 32b, exceto pelos efeitos de refração e difração verificados nas Pontas de Mãe Luiza e de Ponta Negra, as ondas alcançam a área de estudo com sentido praticamente perpendicular à linha de costa.

Sob condições extremas, são observadas ondas com alturas significativas de até 2,4 m (Figura 33a). Contudo, em situações de baixamar, é verificado um menor alcance das ondas com relação à linha de costa, o que minimiza os efeitos desse agente sobre as praias. Apenas parte do setor II e III, e quase toda extensão do setor IV, sofrem influência das maiores alturas significativas de onda, como pode ser observado nas figuras 33a e 33b. Além disso, nessas condições, as ondas chegam à costa com direção semelhante ao caso apresentado anteriormente, com os mesmos fenômenos de transformação de onda ocorrendo próximo as Pontas de Mãe Luiza e Ponta Negra.

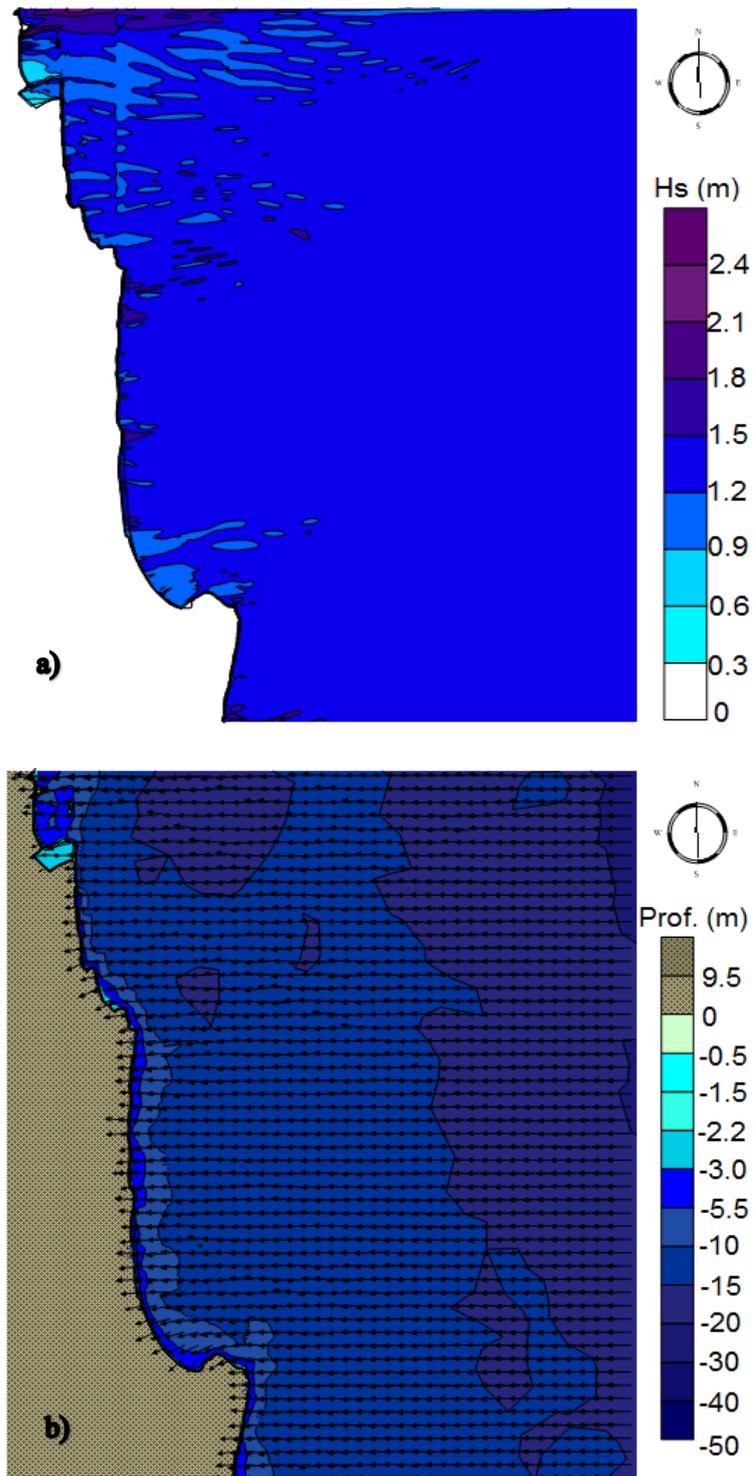


Figura 32. Gráficos de isolinhas de altura significativa (H_s) e vetores de H_s mais topografia, respectivamente, sob (a) e (b) condições de agitação marítima médias em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Leste ($H_s = 1,37$ m; $T_p = 7,99$ s; $\theta = N90^\circ E$).

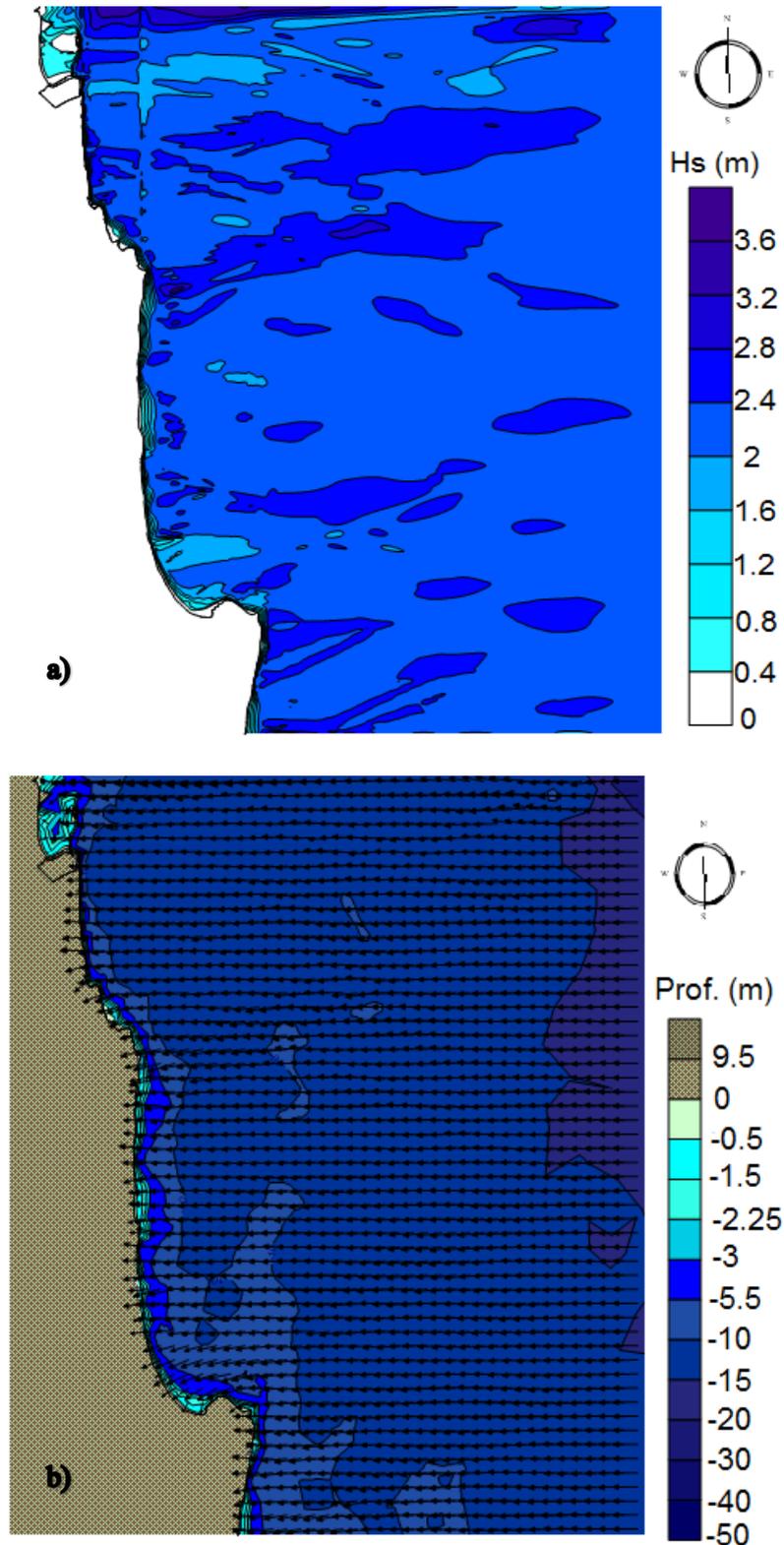


Figura 33. Gráficos de isolinhas de altura significativa - H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b), sob condições extremas de agitação marítima em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Leste ($H_s = 2,27$ m x; $T_p = 17,78$ s; e $\theta = N90^\circ E$).

Analisando as mesmas condições de agitação marítima, em situações de preamar e baixamar, agora para ondas incidentes das direções ESE e SE, é visto que, tanto nos regimes médios quanto nos extremos, as ondas alcançam a costa com alturas significativas semelhantes ao caso de direção de incidência E, com uma discreta diminuição de H_s nos casos de SE, o qual varia de 0,6 a 1,2 m nas condições médias (Figura 36a) e 1,6 a 1,2 nas condições extremas (Figura 37a). Principalmente junto aos pontais também são verificados os mesmos fenômenos de refração/difração, e em função principalmente das diferenças entre a orientação da linha de costa e o ângulo de incidência das ondas, estas alcançam a costa com uma maior angulação. Além disso, são observadas maiores extensões de áreas abrigadas (protegidas de ondulações), principalmente nos trechos de praia próximos aos pontais existentes na área de estudo, como pode ser observado nas figuras 35a e 37a.

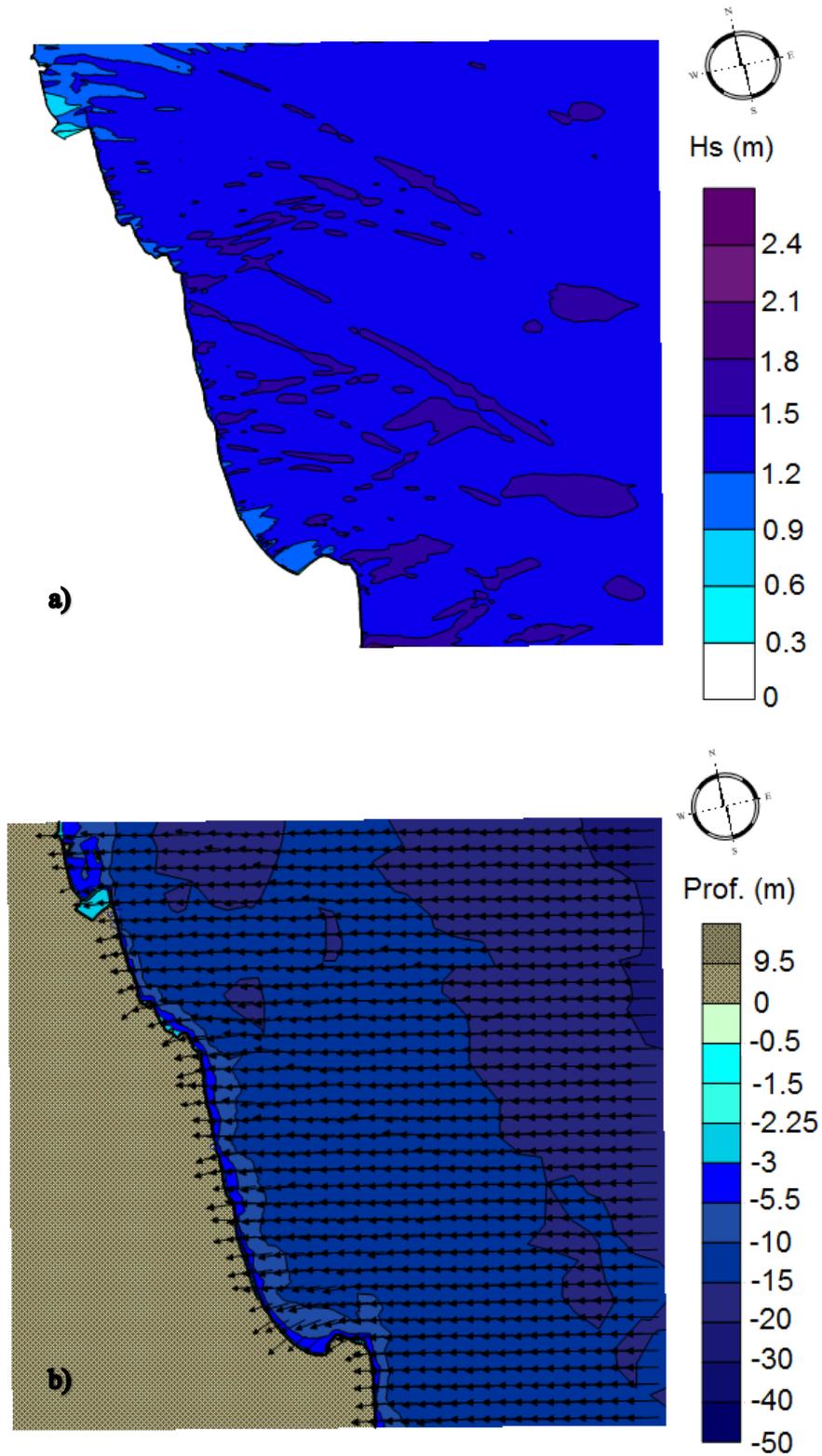


Figura 34. Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima média em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Leste-Sudeste ($H_s = 1,5$ m x; $T_p = 7,19$ s; e $\theta = S67,5^\circ E$).

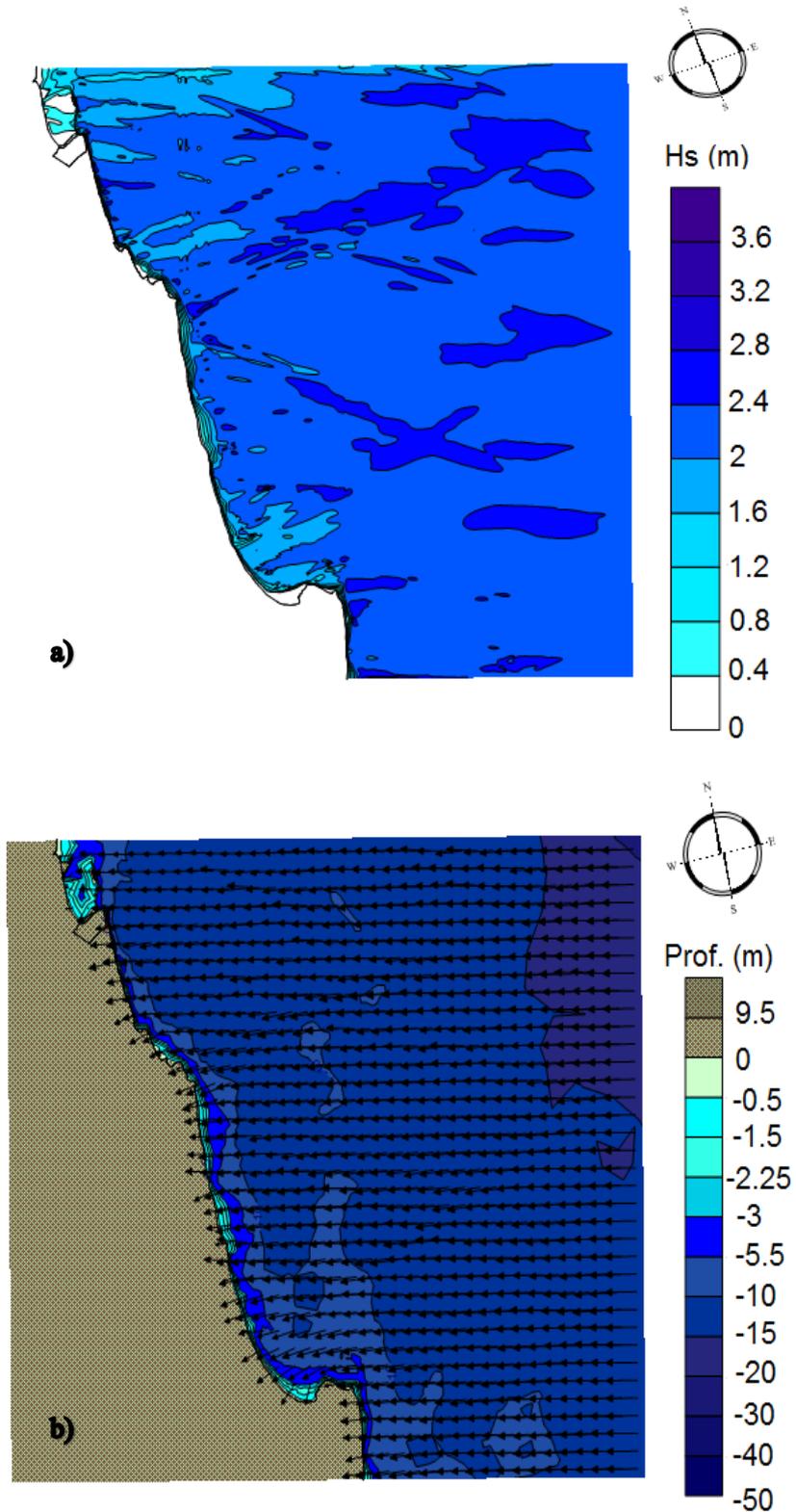


Figura 35. Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima extrema em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Leste-Sudeste ($H_s = 2,34$ m x; $T_p = 11,88$ s; e $\theta = S67,5^\circ E$).

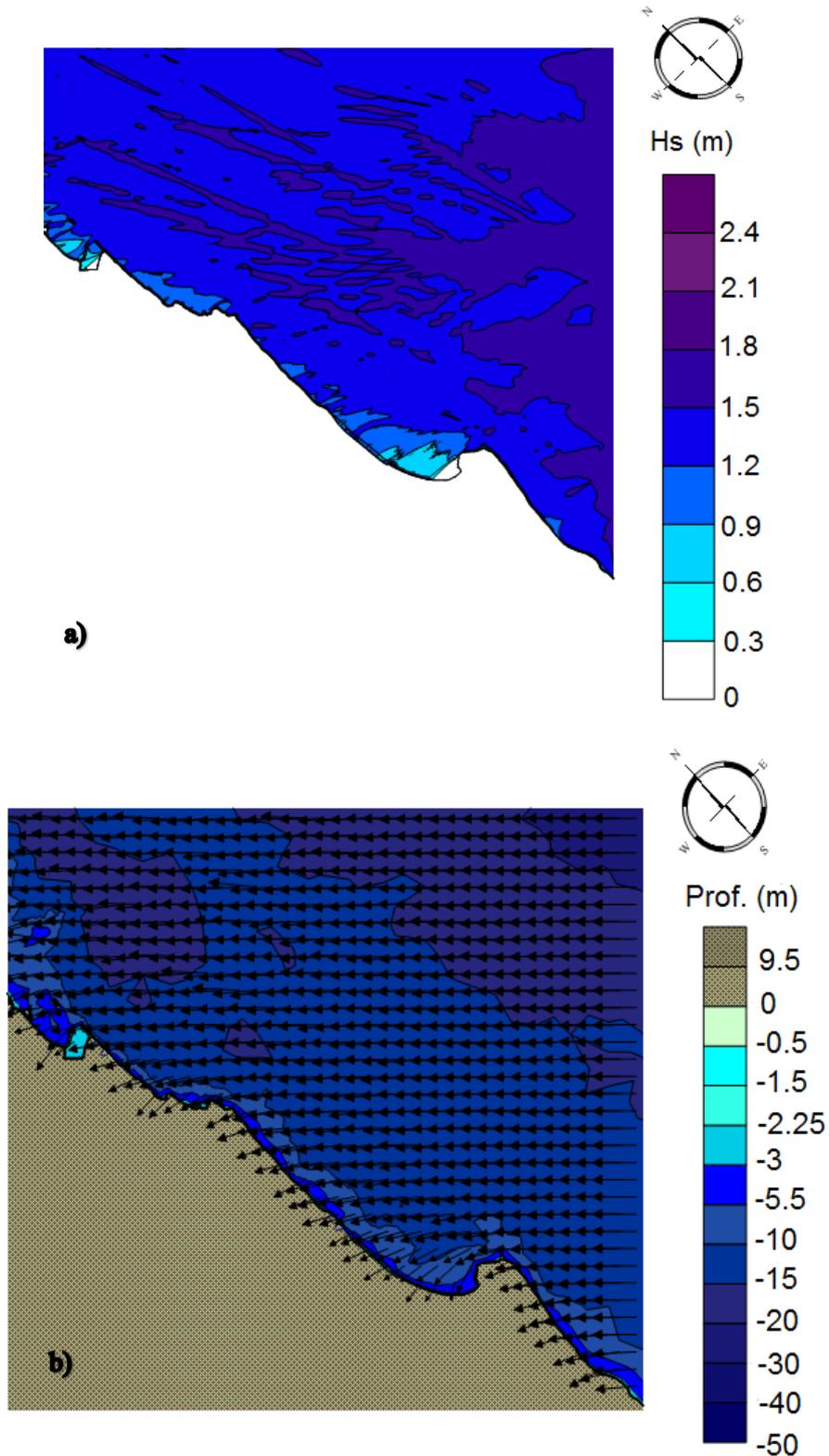


Figura 36. Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima médias em situações de preamar, para ondas incidentes da direção Sudeste ($H_s = 1,52$ m x; $T_p = 6,52$ s; e $\theta = S45^\circ E$).

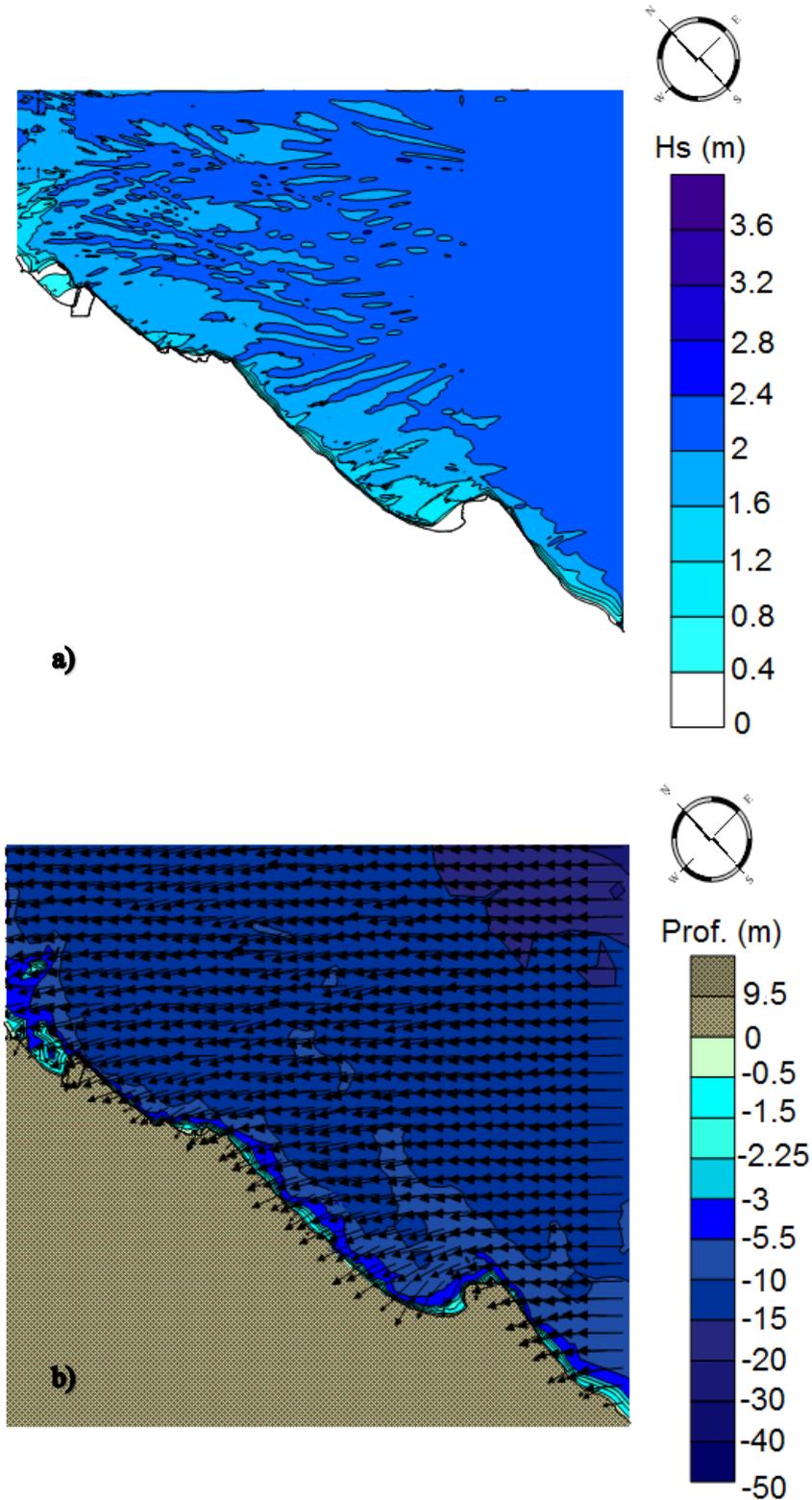


Figura 37. Gráficos de isolinhas de altura significativa – H_s (a) e vetores de H_s mais topografia (b) sob condições de agitação marítima extremas em situações de baixamar, para ondas incidentes da direção Sudeste ($H_s = 2,20$ m x; $T_p = 9,11$ s; e $\theta = S45^\circ E$).

5.2.2 Considerações Sobre a Propagação de Ondas até a Costa

Com a propagação das ondas até costa, são verificados, para as três direções de incidência de onda, alturas significativas semelhantes, tanto nos regimes médio, quanto nos extremos, com uma discreta diminuição para os casos de direção de incidência SE. Para os casos de regime médio, Hs variou de 0,9 a 1,5 m, e para o regime extremo foram observadas altura de onda de até 2,4 m.

Nos trechos de praia com a presença de promotórios (setor I e II), são observadas regiões mais protegidas junto às zonas de sombra associadas a essas feições, e um aumento das alturas de onda nos trechos de praia mais expostos, a exemplo dos setores II e IV. Esse mesmo padrão de exposição às ondas foi verificado por Almeida *et al.* (2014). Esse é um aspecto típico de praias de enseada, como é o caso das praias pertencentes à região de estudo, que devido às suas características planimétricas processos difrativos são induzidos em torno dos promontórios, o que acaba por resultar em variações longitudinais de energia e direção de onda ao longo da praia.

De acordo Silvester (1974), quando a configuração em planta desse tipo de praia se encontra sob a condição de equilíbrio estático, ocorre um ajuste das ondulações incidentes ao longo do arco praial com alinhamento paralelo a linha de costa. Nesses casos a praia seria dominada por processos ortogonais, onde não atuaria o transporte longitudinal de sedimentos. Por outro lado, se sua configuração se encontrar sob equilíbrio dinâmico, a incidência oblíqua das ondas resulta na formação de deriva litorânea, sendo estabelecidas, portanto, condições para o desenvolvimento do transporte longitudinal de sedimentos e possíveis agravos decorrentes de eventos erosivos. Apesar de se ter conhecimento da existência de TLS na região de estudo, a ocorrência oblíqua de ondas constatadas principalmente nos casos propagados com ondas incidentes de ESE e SE (Figuras 33, 35, 36 e 37) forneceria subsídios para concluir que as praias estudadas se encontram sob equilíbrio dinâmico, nas quais predominam TLS.

Em estudo mais recente desenvolvido por Amaro *et al.*(2014), a configuração planimétrica da praia de Ponta Negra foi definida baseando-se em imagens de satélite de alta resolução e levantamentos de campo com GPS geodésico. De acordo com a categorização definida por Hsu *et al.* (2008), os autores concluíram na praia de Ponta Negra prevalecem estados de instabilidade, com evidencia de

equilíbrio dinâmico apenas em seu setor Norte, e que em longo prazo a praia dependerá da manutenção do presente sedimento fornecido pela baía.

5.3 CORRENTES ASSOCIADAS A CONDIÇÕES MARÍTIMAS MÉDIAS E EXTREMAS

No setor I, as ondas de direção E, em condições de agitação marítima média, geram correntes orientadas principalmente na direção S-N. No pontal de Ponta Negra, onde se localiza o Morro do Careca, são verificadas as maiores magnitudes de velocidade, com valores em torno de 0,14 m/s, e o desenvolvimento de um fluxo rotacional fechado do sistema de correntes devido ao encontro de correntes com direções opostas na borda desse elemento morfológico. Para as todas as direções de onda, sempre existe uma corrente formada ao longo do pontal indo em direção à praia, que ao chegar nesta, segue na direção S-N, porém com menor magnitude de velocidade (figura 38a).

No setor II, em regiões mais distantes da linha de costa, é verificado o predomínio de correntes na direção S-N. No entanto, junto à praia não é observada uma direção predominante de corrente, as quais apresentam sentido N-S e S-N em diferentes trechos, com magnitudes de velocidade de aproximadamente 0,06 m/s (figura 38a).

No setor III as correntes voltam a ganhar magnitude na Ponta de Mãe Luiza. Junto a este pontal também são observadas duas direções predominantes de corrente: uma de direção N-S, indo em direção ao setor II; e outra indo em direção à praia de Areia Preta, sendo esta última a mais significativa. Na praia dos Artistas há o predomínio de correntes no sentido N-S, com magnitude semelhante a do setor II. Já no setor IV, são verificadas correntes de baixa magnitude de velocidade com predomínio direcional de S-N (figura 38a).

Em condições de agitação marítima extremas (Figura 38b) são observadas características direcionais de corrente semelhantes àquelas de condições médias. A principal diferença verificada corresponde à magnitude de velocidade estabelecida em todos os setores, com destaque para os pontais de Ponta Negra, Mãe Luiza e da Ponta do Morcego, nos quais são observados valores de até 0,5 m/s, e para a direção de corrente no sentido S-N do setor IV, mais pronunciada que no caso anterior sob condições médias.

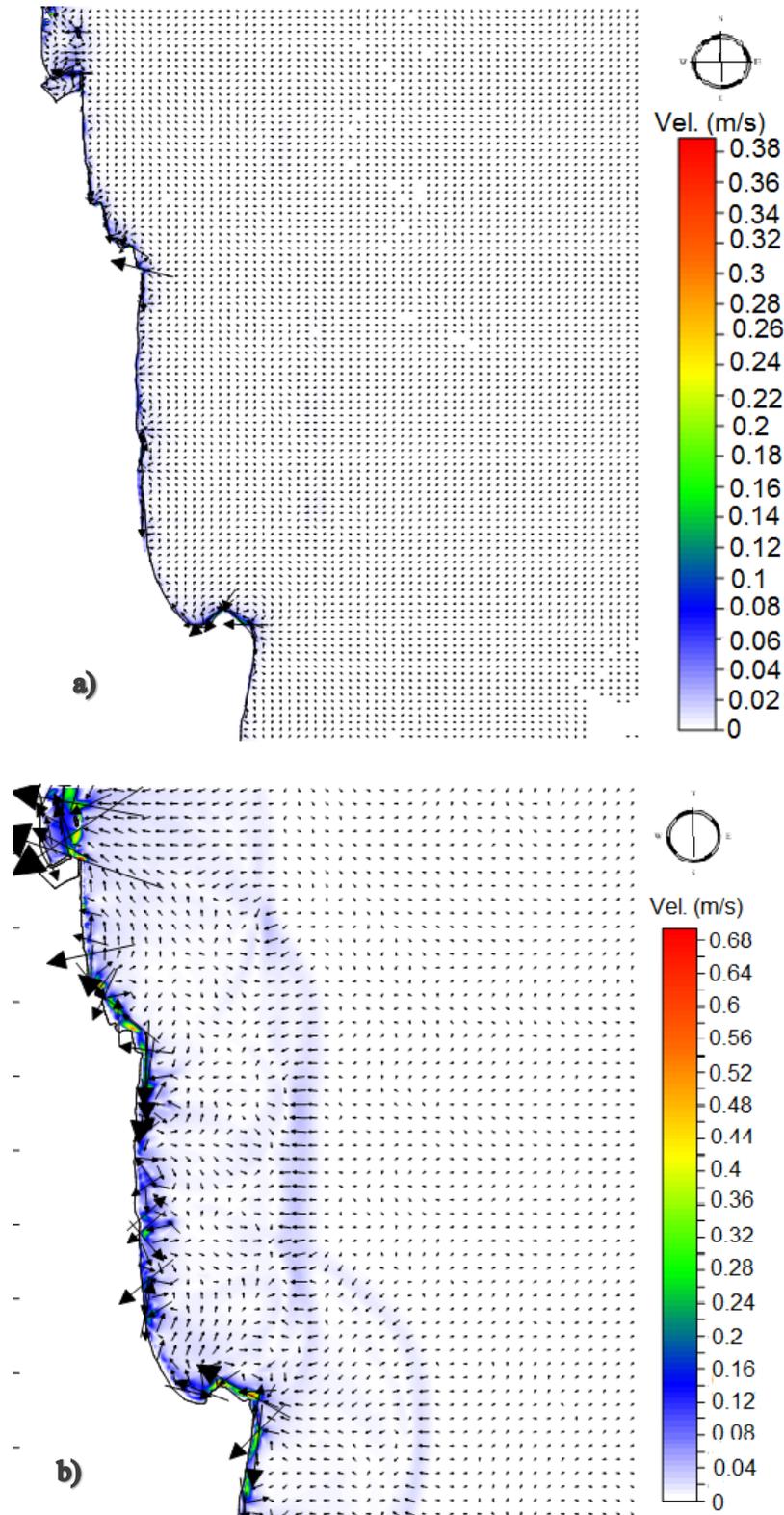


Figura 38. Correntes longitudinais geradas por ondas incidentes de Leste : (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.

Para condições de agitação marítima média, é observado que as ondulações de ESE geram correntes com características bem semelhantes aos casos propagados com ondas incidentes de E. É verificado, porém, uma maior magnitude de velocidade junto à praia e ao Pontal de Ponta Negra, e a maior ocorrência de correntes com direção N-S junto à linha de costa do setor II (figura 39a).

No setor III verifica-se o predomínio de correntes no sentido S-N, exceto na praia dos Artistas, onde, próximo à linha de costa, estas apresentam sentido contrário. Constata-se também que ao longo dos pontais existentes nesse setor, há um aumento da magnitude de velocidade (figura 39a).

Com relação ao setor IV, junto à costa observam-se correntes com sentido N-S de maior magnitude, porém, nas áreas mais afastadas da costa ocorrem correntes de sentido S-N, que acabam convergindo em direção à praia do Forte ao encontrarem correntes de sentido oposto provenientes de fenômenos de rotação nas imediações da foz do Rio Potengi (figura 39a).

Em condições marítimas extremas, devido ao aumento de energia das ondas, as correntes no sentido S-N adquirem maior magnitude de velocidade e predominam praticamente em todos os setores analisados. Apesar do aumento de magnitude, quando comparado com o caso propagado com ondas de sentido E, são verificadas velocidades de corrente semelhantes (figura 39b).

Para os casos de corrente gerados por ondas provenientes de SE, sob condições médias é verificado uma diminuição da magnitude de velocidade quando comparado aos casos gerados por ondas de E e ESE. No entanto, em todos os setores prevalecem correntes com sentido unidirecional S-N (figura 40a).

Sob condições extremas é observado o mesmo padrão de direção no sentido das correntes dos casos médios, mas um aumento da magnitude de velocidade, também menos significativos quando comparado aos casos de E e ESE (figura 40b).

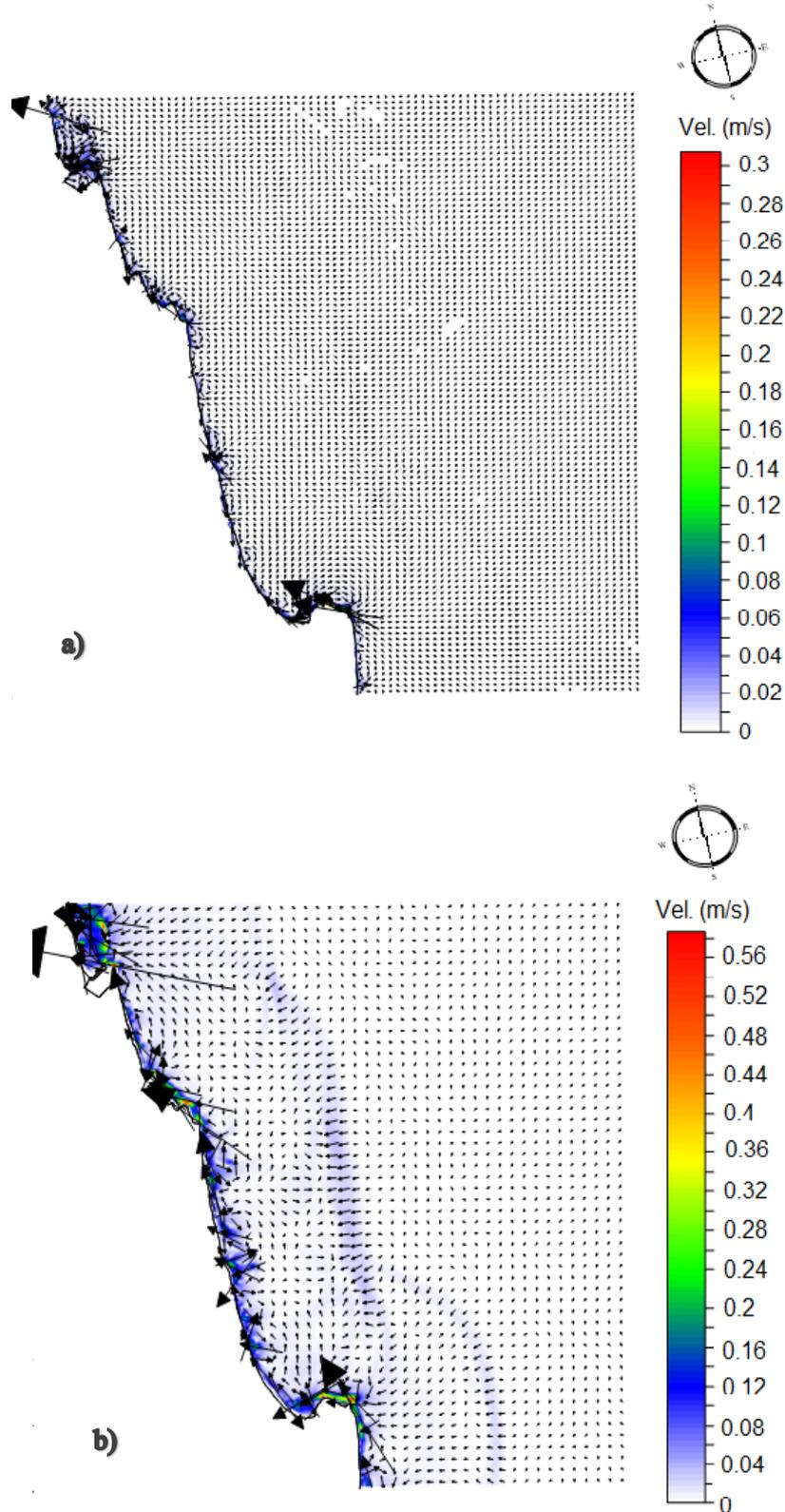


Figura 39. Correntes longitudinais geradas por ondas de incidente de ESE: (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.

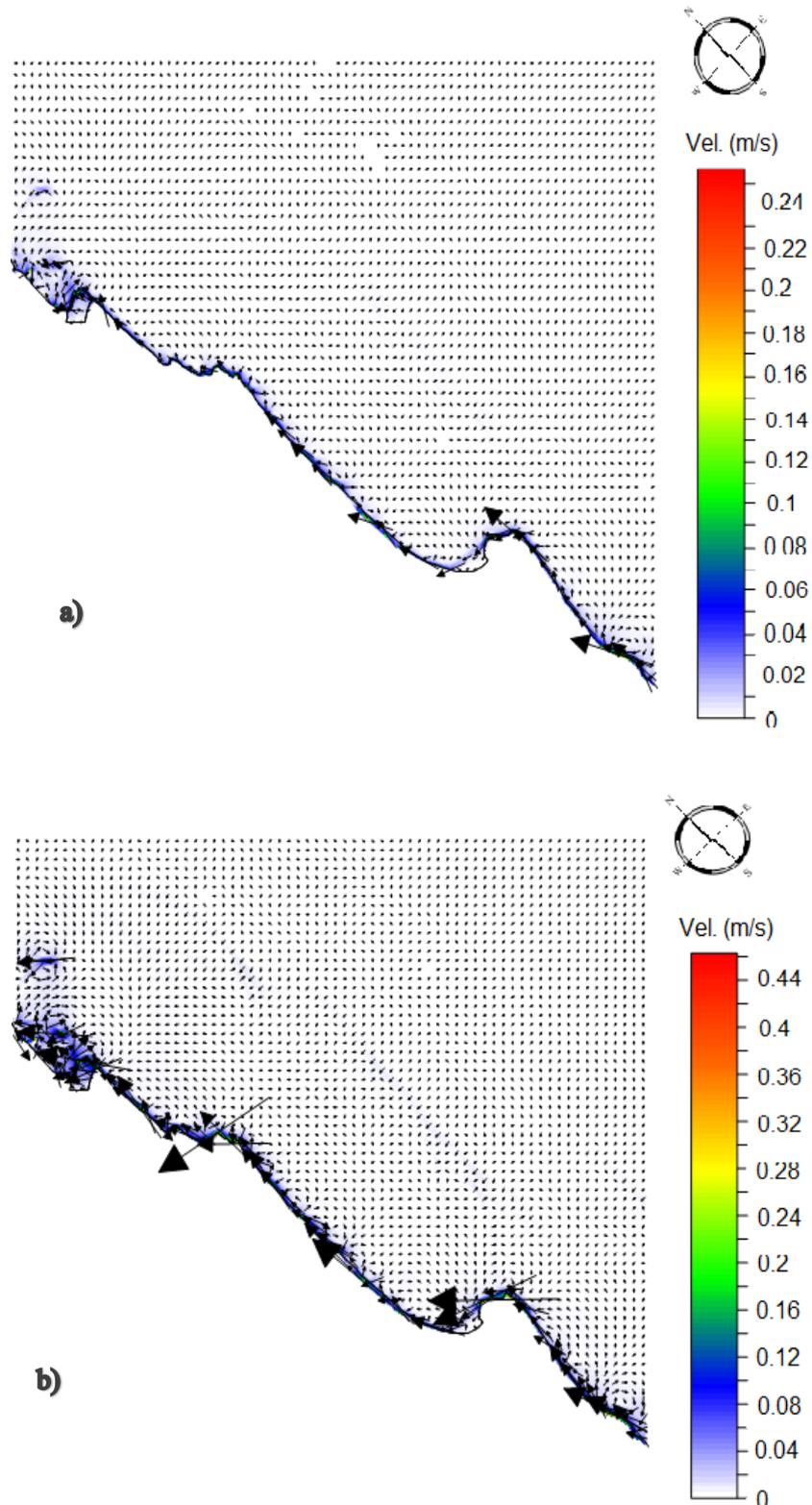


Figura 40. Correntes longitudinais geradas por ondas de incidente de SE: (a) em condições de agitação marítima média e situações de preamar; e (b) em condições de agitação marítima extrema e situações de baixamar.

5.3.1 Considerações Sobre as Correntes Induzidas

Devido ao fato do modelo de geração de correntes receber como informação de entrada os resultados provenientes das propagações de ondas, é possível verificar que esses agentes hidrodinâmicos apresentaram algumas importantes associações. Na maioria dos casos propagados prevaleceram correntes de direção S-N, o que está de acordo com a predominância das ondas incidentes de ESE em 78,04 % de estados do mar. Algumas exceções são observadas nos setores II e III. Neste último setor é importante ressaltar a ocorrência de correntes longitudinais bidirecionais junto à costa, as quais resultam em células de circulação, que por sua vez são capazes de promover a formação de correntes de retorno na zona de arrebenção (CARTER, 1988)

Além disso, as maiores magnitudes de correntes foram verificadas nas propagações realizadas com ondas incidentes de E e ESE (direções essas relacionadas as maiores alturas significativas de onda) em condições de agitação marítima extrema. De fato, essa resposta era esperada, uma vez que a maior altura de ondas provenientes de condições marítimas extremas conduz a uma maior energia desprendida no processo de quebra, resultando em tensões de radiação mais significativas. Para o modelo Copla-SP, esse é o principal componente responsável por gerar correntes. É importante ressaltar que essas maiores magnitudes foram observadas principalmente junto aos promontórios existentes na área de estudo, nos quais prevalece a convergência de ondas devido ao fenômeno de refração e os consequentes efeitos da quebra de ondas em suas estruturas. A ação conjunta e mais intensa das ondas e correntes nessas regiões pode contribuir consideravelmente para o transporte de sedimento em direção às praias nas suas imediações, tais como Ponta Negra e Areia Preta, ou além destas.

5.4 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTO

Como especificado no capítulo 4 (Metodologia), o procedimento inicial para o cálculo do TLS consiste no traçado de perfis praias ao longo da área de trabalho. Devido à grande extensão da área de estudo não foram considerados espaçamentos concretos e constantes entre cada perfil, como geralmente é considerado em trabalhos desse tipo. A metodologia consistiu basicamente em seccionar trechos retilíneos da costa de modo a contemplar todas as praias

existentes ao longo dos setores. No total foram traçados 15 perfis, desde a praia de Ponta Negra até a praia do Forte, os quais são apresentados na figura 41.

Traçados os perfis praias, a etapa seguinte consistiu na definição do D_{50} e demais propriedades físicas do sedimento. Os procedimentos utilizados para a definição desses parâmetros podem ser revistos no capítulo 4. De posse dessas informações, foi possível determinar qual das equações utilizadas para calcular o TLS melhor se aplica à área de trabalho. Para essa aplicação, foi trabalhado apenas com o TLS resultante da média anual de toda série histórica de dados (de 1948 a 2009). Na sequência são realizadas análises pertinentes à evolução decadal e variabilidade sazonal do TLS.

5.4.1 Profundidade de Fechamento e Perfis Praias

Um dos principais parâmetros utilizados como subsídio para o cálculo do transporte de sedimento é a profundidade de fechamento (h^*). Na tabela 8 podem ser observados os valores de h^* dos 15 perfis traçados, obtidos através da equação de Harllermeier. Na tabela 8 ainda estão apresentadas as alturas significativas de onda calculadas como a média ponderada de H_{12} entre as principais direções de onda incidentes, parâmetros estes obtidos com a análise de pontos de propagação de onda, localizados próximo a cada perfil traçado, entre as cotas de 5 e 11 metros, e o período de pico utilizado.

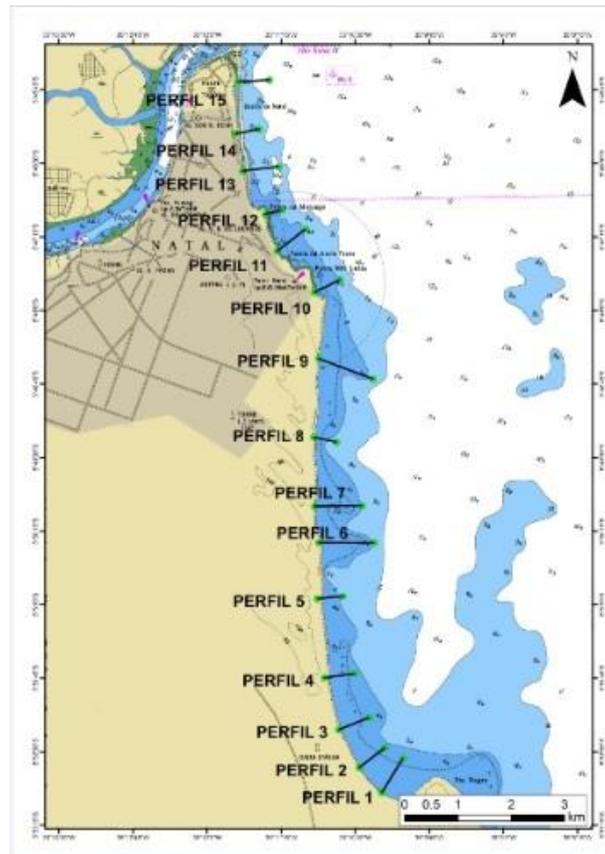


Figura 41. Perfis praias utilizados para o cálculo do transporte longitudinal de sedimento.

Tabela 8. Profundidade de fechamento característica de cada perfil traçado, bem como os valores de H_s e T_p utilizados como variáveis da equação de Harllermeier.

Pontos	Média ponderada de H_{s12} (m)	Média ponderada de T_{p12} (s)	h^* Harllermeier (m)
P1	1,69	12,91	3,73
P2	1,79	12,91	3,95
P3	1,91	12,91	4,2
P4	2,04	12,91	4,48
P5	2,19	12,91	4,79
P6	2,29	12,91	5
P7	2,33	12,91	5,08
P8	2,25	12,91	4,92
P9	2,34	12,91	5,11
P10	2,26	12,91	4,94
P11	2,06	12,91	4,52
P12	2,09	12,91	4,58
P13	2,31	12,91	5,04
P14	2,15	12,91	4,71
P15	2,21	12,91	4,83

5.4.2 Diâmetro Médio do Sedimento (D_{50})

Outro conjunto de informações de suma importância para o cálculo do TLS corresponde aos parâmetros característicos do sedimento das áreas nas quais estão localizados os perfis. Algumas dessas características, tais como a densidade dos grãos e a porosidade, especificamente para praias arenosas, são facilmente encontrados na literatura (REEVE *et al.*, 2004). No entanto, informações como o diâmetro médio dos grãos (D_{50}), fundamentais para esse tipo de estudo, necessitam ser obtidas por meio de campanhas de campo caso não se tenha dados secundários. A impossibilidade de se realizar esse tipo de análise nesse trabalho e a falta desse tipo de informação para toda a área de estudo, conduziram à aplicação de uma técnica de otimização de mínimos quadrados de forma a ajustar perfis fictícios tendo como base a formulação de Dean (1977). Dessa forma, obtiveram-se, para cada perfil traçado, perfis de ajuste (apresentados no Anexo 1) e consequentemente valores para o parâmetro de forma A_D e para o D_{50} (tabela 9).

Tabela 9. Diâmetro médio (D_{50}), parâmetro de forma (A_D) e classificação granulométrica de Wentworth dos sedimentos para cada perfil traçado.

Pontos	D_{50} (mm)	A_D	Classificação granulométrica de Wentworth	D_{50} utilizado (mm)
P1	0.13779	0.081445	Fino	0.13779
P2	0.20355	0.098373	Fino	0.20355
P3	0.3264	0.12363	Médio	0.3264
P4	0.17039	0.09026	Fino	0.17039
P5	0.24885	0.10842	Fino	0.24885
P6	0.18032	0.09277	Fino	0.18032
P7	0.1151	0.074653	Fino	0.1151
P8	0.36907	0.13121	Médio	0.36907
P9	0.18658	0.094314	Fino	0.18658
P10	0.20886	0.099608	Fino	0.20886
P11	0.077915	0.061805	Fino	0.077915
P12	0.49846	0.15175	Médio	0.49846
*P13	1,0722	0.21986	Muito grossa	0.50
*P14	1,0428	0.21692	Muito grossa	0.50
*P15	0.91165	0.20325	Grossa	0.50

Verifica-se que, para os quatro primeiros perfis, situados no setor I, foram obtidos diâmetros médios semelhantes àqueles apresentados na tabela 1,

provenientes de análises de campo na mesma área de estudo, o que pode ser avaliado como um objeto de validação para utilização desse tipo de técnica na determinação do D_{50} . Além disso, o aumento do diâmetro médio do grão observado, principalmente do perfil 1 ao 3, condiz com o estudo clássico de Bascom (1951) aplicado em uma típica praia de enseada, na qual foi verificada um aumento do tamanho médio do grão associado ao aumento de energia ao longo da praia.

Dentre todos os resultados obtidos, constata-se que os perfis 13, 14 e 15 apresentaram classificação granulométrica muito grossa, muito grossa e grossa, respectivamente, diferente do padrão de variação entre sedimentos finos e médios observado nos demais perfis. Através de visitas à região na qual estão contemplados esses três perfis, foi averiguado que a classificação granulométrica estimada não condiz com a realidade local, o que também pode ser observado na figura 15. Além disso, analisando os perfis de ajuste apresentados no Anexo 1 é possível perceber que para esses três perfis as curvas ajustadas não condizem com os perfis medidos (obtidos com o auxílio de ferramentas do SMC-Brasil). Portanto, exclusivamente para esses três perfis, optou-se por considerar um diâmetro de classificação média, equivalente a 0,50 mm, ao invés de utilizar os diâmetros obtidos com o modelo de perfil de equilíbrio proposto por Dean (1977).

5.4.3 Transporte Médio Anual de Sedimento Proveniente de Toda Série Histórica de Onda

Nas figuras 42a, 42b e 42c são apresentados os transportes médios anuais, positivo e negativo, considerando toda série histórica disponível no SMC-Brasil, desde 1948 até 2008, calculados respectivamente pelas equações de CERC (USACE), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007), sendo utilizado, para cada equação, seus respectivos coeficientes adimensionais proposto por Mil-Homens *et al.* (2013).

Observa-se que para as três equações o transporte de sedimento negativo é predominante na maioria dos perfis. As únicas exceções ocorrem no perfil 9, quando utilizada as equações de CERC e Bayram *et al.*, e nos perfis 9 e 8, quando utilizada a equação de Kamphuis. Além disso, para as três equações utilizadas, os maiores valores de transporte de sedimento positivos foram verificados nos perfis 6, 8 e 9, localizados no setor II, onde se encontra o trecho de praia delimitado pela Via Costeira. Os maiores valores de transporte negativos ocorreram nos perfis 4, 11 e

15, quando utilizadas as equações de CERC e Bayram *et al.*, e nos perfis 1 e 6 quando utilizada a equação de Kamphuis. Vale lembrar que os termos *negativo* e *positivo* correspondem aos transportes no sentido S-N e N-S, respectivamente. Comparando os volumes de sedimento calculados por cada equação, são verificados, na maioria dos perfis, valores bem discrepantes, porém com a mesma ordem de magnitude.

De forma geral, as menores taxas de transporte líquido (tabela 10) obteve-se a partir do cálculo com a equação CERC. O cálculo com a equação de Bayram *et al.* resultou nos maiores volumes de sedimentos transportados, geralmente com valores uma ordem de magnitude maiores que aqueles obtidos com a equação CERC, e na mesma ordem de magnitude dos obtidos com a equação de Kamphuis, exceto para o transporte de sedimentos característico dos perfis 1, 6 e 8 obtidos com esta última equação, os quais se apresentam com aproximadamente uma ordem de magnitude maior que os obtidos com a equação de Bayram *et al.* (2007).

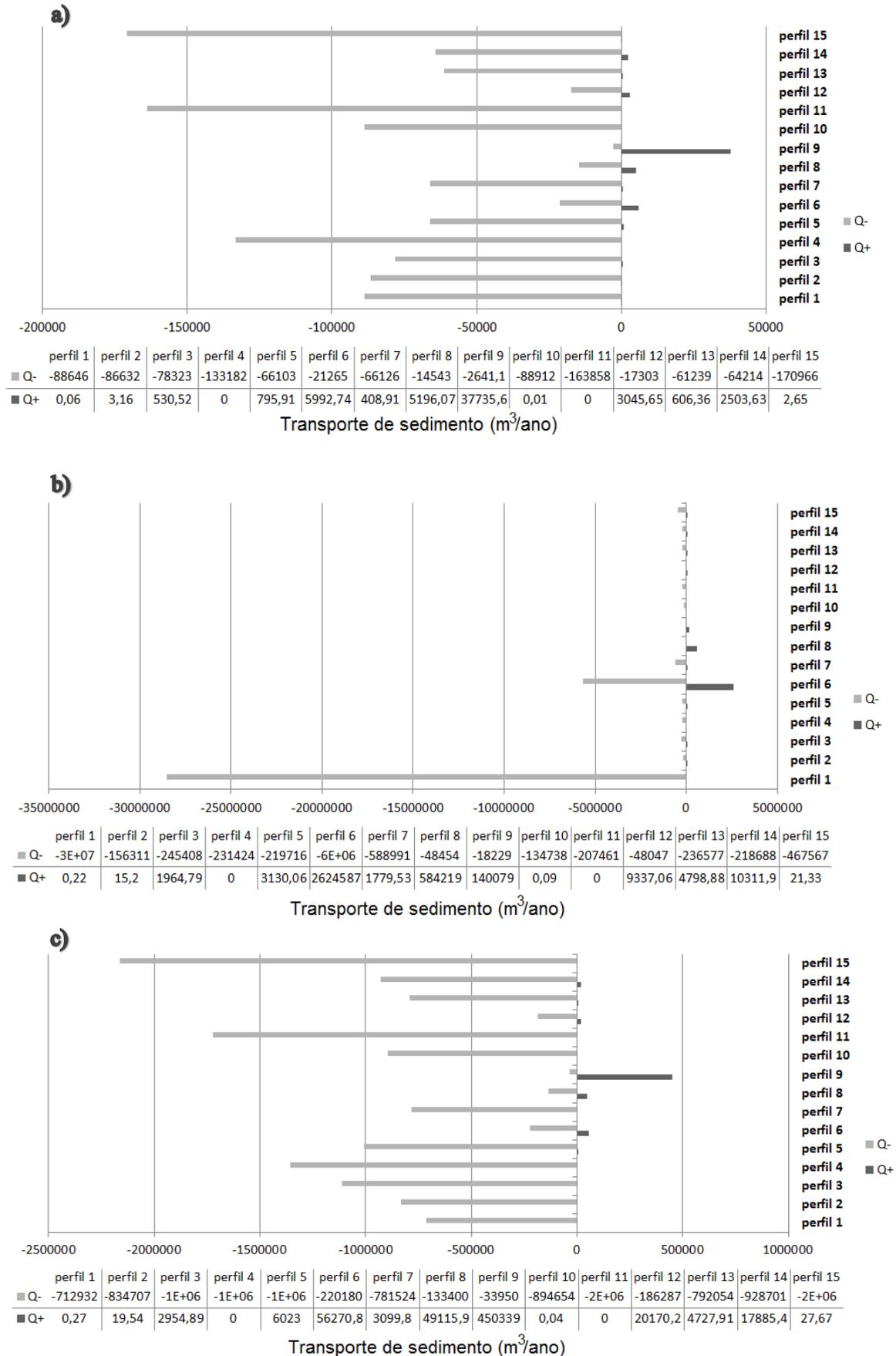


Figura 42. Transporte sedimentar médio anual, obtido com série histórica de 1948 a 2009, e calculado com as equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

Tabela 10. Fluxo médio de energia e transporte longitudinal de sedimento líquido obtido em m³/ano, utilizando-se as equações de CERC, Kamphuis e Bayram *et al.*

Setores	Perfis	Transporte de sedimento líquido – Q (m ³ /ano)			
		Fluxo Médio de Energia (J/m.s)	CERC	Kamphuis	Bayram <i>et al.</i>
Setor I	Perfil 1	1868,54	-88646	-2,9E+07	-712932
	Perfil 2	3894,7	-86628,9	-156296	-834688
	Perfil 3	8563,64	-77792,9	-243444	-1106614
	Perfil 4	3772,06	-133182	-231424	-1355835
Setor II	Perfil 5	8485,78	-65307,3	-216586	-1001776
	Perfil 6	3693,78	-15272,5	-3053201	-163909
	Perfil 7	4742,76	-65717,3	-587211	-778424
	Perfil 8	2108,91	-9346,44	535764,3	-84283,8
	Perfil 9	7566,7	35094,51	121850,9	416388,6
Setor III	Perfil 10	2633,51	-88912,1	-134738	-894654
	Perfil 11	3639,42	-163858	-207461	-1721457
	Perfil 12	2408,21	-14257,3	-38709,7	-166117
Setor IV	Perfil 13	6205,14	-60632,9	-231779	-787326
	Perfil 14	6401,13	-61710,1	-208376	-910815
	Perfil 15	4618,41	-170963	-467546	-2161479

Considerando que de acordo com a literatura o transporte de sedimento é proporcional ao fluxo médio de energia hidrodinâmica (FME), foram feitas comparações entre as taxas de transporte longitudinal de sedimento bruto (resultante da soma dos valores absolutos dos transportes positivo e negativo) obtidas por meio das três equações estudadas, e o fluxo médio de energia (figura 43). Devido aos altos valores associados principalmente aos perfis 1 e 6, provenientes do cálculo com a equação de Kamphuis, os resultados, tanto para o transporte de sedimento médio bruto, quanto para o fluxo médio de energia, foram dispostos em escala logarítmica, de forma que todas as equações pudessem ser analisados em um único gráfico.

Na figura 43 é possível observar que as curvas de taxas de transporte longitudinal de sedimento bruto obtidas com as equações de CERC e Bayram *et al.* apresentaram padrões semelhantes, diferindo apenas na ordem de magnitude. Exceto pelos resultados exibidos pelos perfis 4, 10 e 15, essas duas curvas apresentaram bons ajustes com relação a curva do fluxo médio de energia. Já a

curva obtida pela equação de Kamphuis apresentou, na maioria dos perfis, valores intermediários àqueles obtidos com as equações de CERC e Bayram *et al.* e uma superestimação do TLS nos perfis 1 e 6, resposta contrária a esperada, já que se observa uma diminuição do FME. Com relação ao ajuste entre essas duas curvas (Kamphuis e FME), só foram verificadas conformidades a partir do perfil 10.

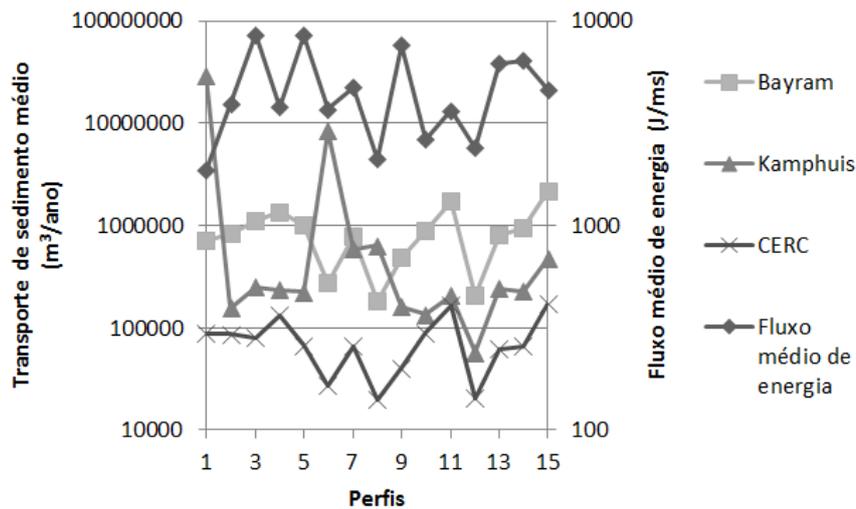


Figura 43. Análise de ajuste entre as curvas do transporte de sedimento bruto, obtidas para as três equações utilizadas, e o Fluxo médio de energia.

5.4.4 Considerações Sobre o Transporte Longitudinal Médio Anual de Sedimento Proveniente de Toda Série Histórica de Onda

A partir dos resultados obtidos para o transporte médio anual de sedimentos, observa-se o predomínio do transporte negativo (sentido S-N) na maioria dos perfis, o que corrobora com o clima de ondas incidentes na região e na costa, bem como com o sistema de correntes de sentido S-N dominante. Além disso, das três equações utilizadas, exceto para os perfis 1 e 6 (com valores de TLS superestimados pela equação de Kamphuis, tendo como base resultados provenientes de estudos aplicados à praias com características semelhantes, a exemplo de Araújo e Alfredini (2001), Valentini de Souza (1981), Abreu (2011)), a equação de Bayram *et al.* apresentou os maiores valores de TLS. A equação de CERC apresentou os menores valores, enquanto que a equação de Kamphuis proporcionou valores intermediários aos das duas outras equações citadas.

No setor I, a equação de CERC estimou valores da ordem de 90.000 m³/ano para os perfis 1 e 2, 80.000 m³/ano para o perfil 3 e 150.000 m³/ano para o perfil 4. A equação de Kamphuis apresentou valores da ordem de 29.000.000 m³/ano para o

perfil 1 (superestimando o TLS), 200.000 m³/ano para os perfis 2 e 250.000 m³/ano para os perfis 3 e 4. Já a equação de Bayram *et al.* estimou valores da ordem de 700.000 m³/ano para o perfil 1, 850.000 m³/ano para o perfil 2, 1.000.000 m³/ano para o perfil 3 e 1.400.000 m³/ano para o perfil 4. Nesse setor, é importante ressaltar o acentuado quadro de erosão, que se intensificou principalmente a partir de 2011, afetando significativamente os trechos urbanizados da costa, sendo necessária intervenção por meio da construção de estrutura de enrocamento.

Ainda no setor I, devido ao padrão de incidência de ondas com aumento da altura significativa nos trechos de praia mais expostos, esperava-se um aumento gradual das taxas de TLS ao longo do arco praiial (do perfil 1 ao 4) característico desse setor. No entanto, verifica-se que apenas as estimativas obtidas com a equação de Bayram *et al.* apresentou esse comportamento (figura 42c).

Valentini de Souza (1981) avaliou o transporte potencial de sedimento em perfil praiial (inclusive no setor II) próximo ao Pontal de Mãe Luiza, por meio das equações de Cadwell, Komar, CERC, Castanho, Bijker e Swamby. Como dados para o cálculo do transporte de sedimento, foram utilizadas informações batimétricas da carta DHN-810 de setembro de 1972, nas proximidades do Porto de Natal, e de agitação marítima e granulometria cedidos pelo INPH. As informações de agitação foram obtidas por ondógrafo de pressão em campanha de quatro registros diários de 15 minutos no período de abril de 1977 a março de 1978.

Por estar inserido no setor II, neste trabalho os resultados obtidos por Valentini de Souza (1981) serão comparados às taxas de TLS intrínsecas dos perfis desse setor (perfis 5, 6, 7, 8 e 9). Analisando as características de cada fórmula e suas aplicações à área de estudo, o autor concluiu que o transporte de sedimento para a região seria da ordem de 500.000 a 700.000 m³/ano de sentido S-N, sendo melhor estimado pelas formulas de Cadwell, CERC, Castanho, Komar II e Swamby. Contudo, também foram calculados valores da ordem de 900.000 e 1.100.000 m³/ano.

De todos os perfis pertencentes ao setor II, é importante ressaltar que o perfil 9, de coordenadas mais próximas ao perfil utilizado por Valentini de Souza (1981), apresentou os resultados mais discrepantes em termos de sentido de transporte, uma vez que, com as três equações utilizadas, foram obtidos transportes longitudinais positivos, ou seja, de sentido contrário ao obtido pelo referente autor.

No entanto, apesar de sentido N-S, por meio da equação de Bayram *et al.* foi obtido valor absoluto da ordem de $500.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, dentro da estimativa apresentada.

Alguns fatores podem ter influenciado essa diferença do sentido do transporte. Cabe citar que os dados de agitação marítima utilizados por Valentini de Souza (1981) apresentavam período amostral menor que 1 ano, e que especificamente para o setor II e parte dos setores III e IV, foi verificada a ocorrência de correntes bidirecionais sem uma direção predominante marcante (figura 38 e 39), além da influência do Pontal de Mãe Luiza sobre a geração de correntes de sentido N-S em direção ao setor II, principalmente nos casos modelados com ondas incidentes da direção E, como pode ser observado na figura 38).

Analisando agora o restante dos perfis pertencentes ao setor II, verifica-se que o cálculo com a equação CERC resultou em valores inferiores aos obtidos por Valentini de Souza (1981). Para a equação de Kamphuis, também foi verificado a predominância de transporte positivo no perfil 8, da ordem de $600.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, uma superestimação do TLS no perfil 6 da ordem de $6.000.000 \text{ m}^3/\text{ano}$, com sentido S-N, para o perfil 7 um transporte negativo da ordem de $600.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ e $219.716 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 5. A equação de Bayram *et al.* apresentou transporte negativo nos demais perfis, com valor da ordem de $1.000.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 5, $800.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 7, $300.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 6 e $133.400 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 8. Observa-se que para alguns perfis as formulações utilizadas geraram valores bem semelhantes, com a mesma ordem de magnitude.

Da Silva *et al.* (2013 a) ao analisar potenciais impactos ocasionados pela elevação do nível do mar ao longo da Via Costeira, identificaram vulnerabilidades associadas às estruturas de empreendimentos hoteleiros e aos sistemas de drenagem presentes nesse setor. Na situação do nível do mar à época, já foram constatadas evidências de processos erosivos estabelecidos em estruturas naturais e artificiais existentes na praia. Uma possível elevação do nível do mar poderia intensificar ainda mais a ação de agentes hidrodinâmicos sobre o ambiente praial, o que acabaria por resultar em taxas de TLS ainda maiores.

Para o setor III, vale destacar os altos valores apresentados nos perfis 10 e 11. A existência de estruturas de engenharia para contenção de sedimentos existente na praia de Areia Preta é um reflexo das altas taxas de TLS estimadas e do quadro erosivo intrínseco desse setor. Além disso, verifica-se que a equação de Bayram *et al.* resultou em valores de aproximadamente $894.654 \text{ m}^3/\text{ano}$ no perfil 10 e

2.000.000 m³/ano no perfil 11, bem superiores aos obtidos com as equações de Knaphuis e CERC.

No setor IV também são verificados altos valores de TLS, como pode ser observado na tabela 10 e nas figuras 42a, 42b e 42c, com a equação de Bayram *et al.* também resultando nas maiores taxas de transporte. Apesar dos altos valores de sedimento estimados, nas praias pertencentes a este setor são evidenciados menos problemas oriundos de processos erosivos. Uma possível explicação para esse fato consiste na influência da linha de arenito recifal paralelo à linha de costa, atuando como elemento de proteção natural contra a ação das ondas, além de desempenhar a função de armadilha natural de sedimentos. Vale ressaltar que esse setor se encontra próximo a foz do Rio Potengi, o qual poderia atuar como uma fonte significativa de sedimentos, mas que não foi considerado nesse estudo devido às limitações do modelo utilizado.

Analisando os valores obtidos nos perfis 13, 14 e 15, assim como no setor I, também é observado um aumento das taxas de transporte das zonas mais protegidas para as mais expostas. Utilizando como exemplo as taxas estimadas por Bayram *et al.*, no perfil 13 obteve-se 792.054 m³/ano, e no perfil 15 aproximadamente 2.000.000 m³/ano.

De forma geral, extrapolando a estimativa de transporte de sedimento obtida por Valentini de Souza (1981) para toda a região de estudo, a análise conjunta dessa informação com o gráfico da figura 40, que relaciona o transporte anual médio de sedimento com o fluxo médio de energia, revela que a equação de Bayram *et al.* melhor se aplica na avaliação do TLS para a área de estudo em questão, uma vez que ela resultou em valores de TLS mais próximos aos obtidos por Valentini de Souza (1981), além de apresentar comportamento semelhante às variações do fluxo médio de energia (figura 43). Essa última relação confirma o papel das transformações provocadas pelos processos de refração e difração na determinação dos parâmetros de onda na arrebentação e conseqüentemente o transporte sedimentar.

Apesar da conclusão obtida, informações morfológicas e hidrodinâmicas de qualidade são essenciais para se calcular taxas de TLS. Além disso, a determinação de cálculos teóricos, a partir do emprego de formulações, mais adequados para uma determinada área de estudo se torna bem mais efetiva quando se dispõe de

resultados provenientes de campanhas de campo, o que não foi possível ser realizado.

A não existência de batimetria de detalhe e informações granulométricas confiáveis, para todos os setores abordados, pode ter influenciado significativamente os resultados. Por exemplo, Kamphuis (1991) verificou que oscilações no gradiente praias resultam em diferenças consideráveis nas taxas de transporte sedimentar. Dessa forma, presume-se que a equação de Kamphuis foi a principal afetada por essa falta de informação, já que ela depende diretamente de dados tais como declividade de praia e diâmetro médio do grão. A equação de CERC, diferentemente, não leva em consideração estes parâmetros, e conseqüentemente apresenta menor sensibilidade à falta deles. Já a equação de Bayram *et al.*, apesar de ter formulação bem parecida com a equação CERC, o que resultou em curvas de TLS com padrões semelhantes, como observado na figura 43, apresenta uma relação indireta com estes tipos de parâmetros por meio dos coeficientes w_s (velocidade de queda do grão) e ϵ (coeficiente de transporte), mas ainda assim se apresenta menos sensível que a equação de Kamphuis.

Na tentativa de desenvolver uma metodologia mais robusta para quantificar o transporte longitudinal de sedimento quando disponíveis apenas limitados dados de campo, Esteves *et al.* (2009) utilizou informações sedimentológicas e hidrodinâmicas provenientes de experimentos de campo realizados em diferentes costas (sul do Brasil, Portugal e Dinamarca), obtidas a partir de reconhecidas técnicas de medição. Foram feitas comparações entre estimativas de TLS obtidas com o modelo desenvolvido, denominado LT-MOD, e três outras formulas amplamente reconhecidas – CERC, Kamphuis e Bayram. Os resultados obtidos mostraram uma maior correlação entre o LT-MOD e a equação de Bayram *et al.*, principalmente em análises de longo prazo.

Baseando-se no trabalho desenvolvido por Esteves *et al.* (2009), conclui-se que na ausência de informações de qualidade necessárias para estimar o TLS, como é o caso da área de estudo contemplada no presente trabalho, a equação de Bayram *et al.* apresenta os resultados mais adequados para este tipo de predição, o que reforça as respostas obtidas nas análises dos gráficos referenciados pelas figuras 42 e 43.

5.4.5 Variabilidade Sazonal do Transporte Longitudinal de Sedimento

Neste tópico são apresentadas as taxas de transporte longitudinal sazonal, considerando como periodicidade as estações do ano. Apesar de se ter conhecimento de que no Estado do Rio Grande do Norte prevalecem apenas duas estações anuais, uma considerada chuvosa (se estendendo de março a agosto) e outra seca (com ocorrência entre os meses de outubro a dezembro), neste trabalho será abordado o transporte de sedimento característico das quatro estações do ano típicas: outono (20 de março a 21 de junho), inverno (21 de junho a 23 de setembro), primavera (23 de setembro a 21 de dezembro) e verão (21 de dezembro a 20 de março).

Para essa etapa dos resultados foi trabalhado com o cálculo do TLS positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), obtidos através de cada uma das equações já citadas, característicos apenas dos perfis 1, 4, 5, 9, 11, 13 e 15 (figuras 44 a 50). A escolha desses perfis levou em consideração suas localizações, de forma a se obter uma distribuição por todas as praias contempladas na área de estudo, além dos altos valores de TLS exibidos, como pode ser observado nas figuras 39a, 39b e 39c.

Exceto para o perfil 9 (figura 47), é verificado que o cálculo proveniente das três equações resultaram em maiores taxas de transporte de sedimento ocorrendo nas estações do outono e inverno, que também coincide com o período chuvoso do Estado no qual está inserida a área de estudo. Essa mesma exceção também é verificada quanto ao sentido do transporte. Para o perfil 9 prevalece o transporte de sedimento positivo, enquanto que para o restante dos perfis prevalece o transporte longitudinal negativo.

Exceto para o perfil 1, no qual as maiores taxas de TLS sazonais foram obtidas utilizando-se a equação de Kamphuis, com valor máximo da ordem de 14.000.000 m³ transportados na estação de inverno (figura 41b), em todos os outros casos calculados verifica-se que a equação de Bayram resultou nas maiores taxas de TLS, valendo-se destacar o volume de sedimento transportado no perfil 15 (figura 50c), o qual encontra-se localizado na praia do Forte, com valores da ordem de 1.000.000 m³ nas estações de outono e inverno.

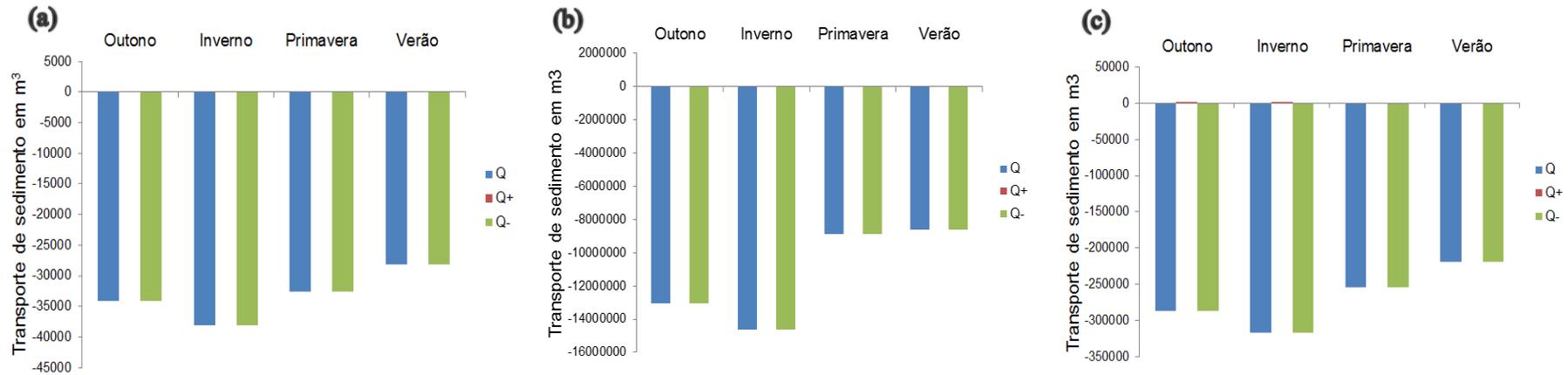


Figura 44. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 1, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

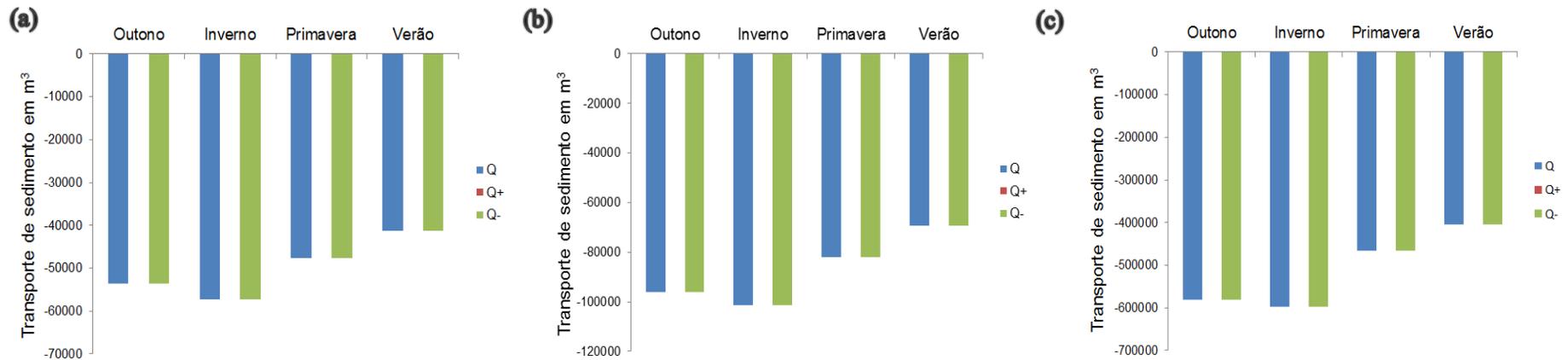


Figura 45. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 4, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007)..

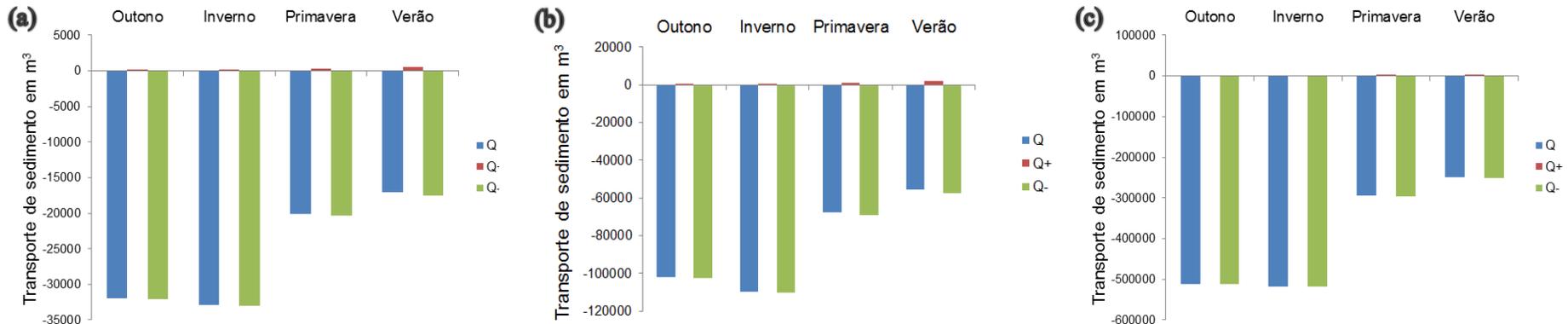


Figura 46. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 5, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

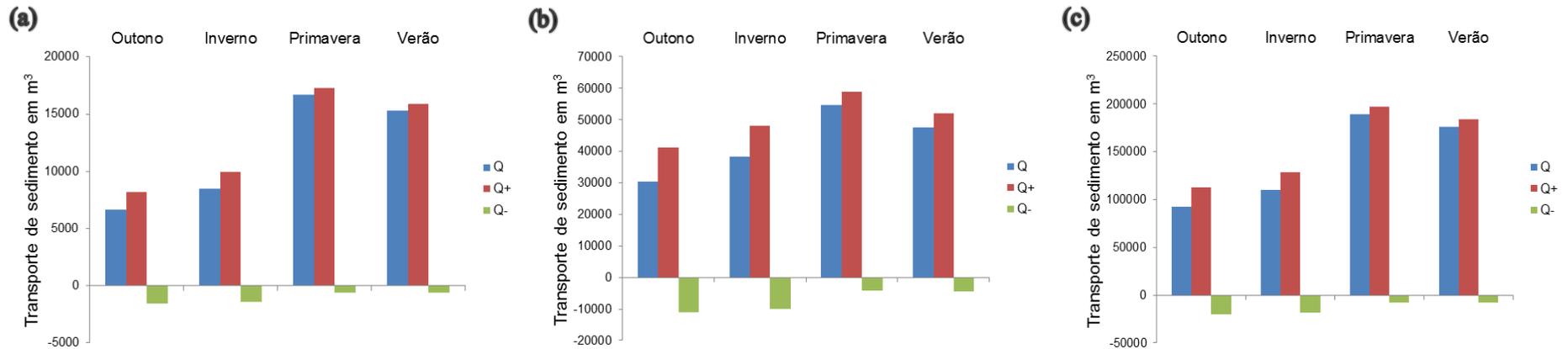


Figura 47. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 9, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

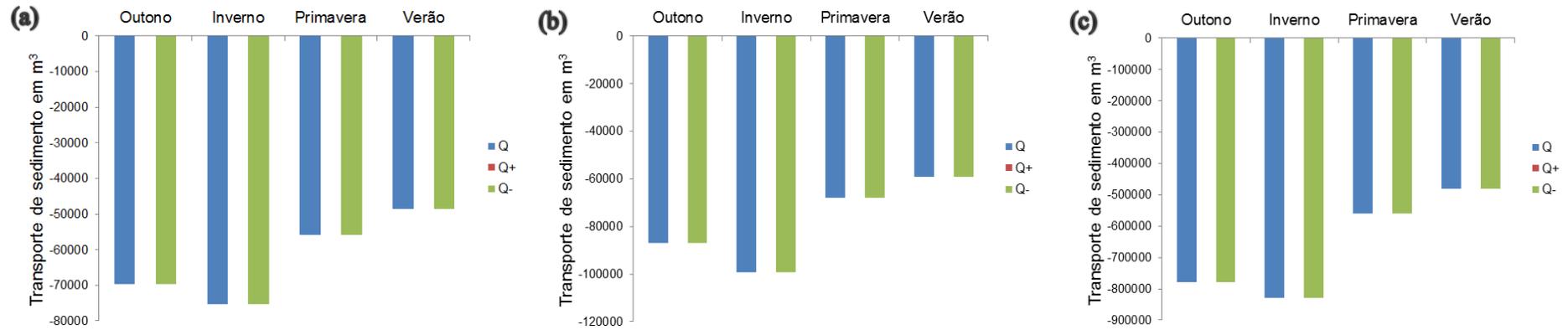


Figura 48. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 11, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

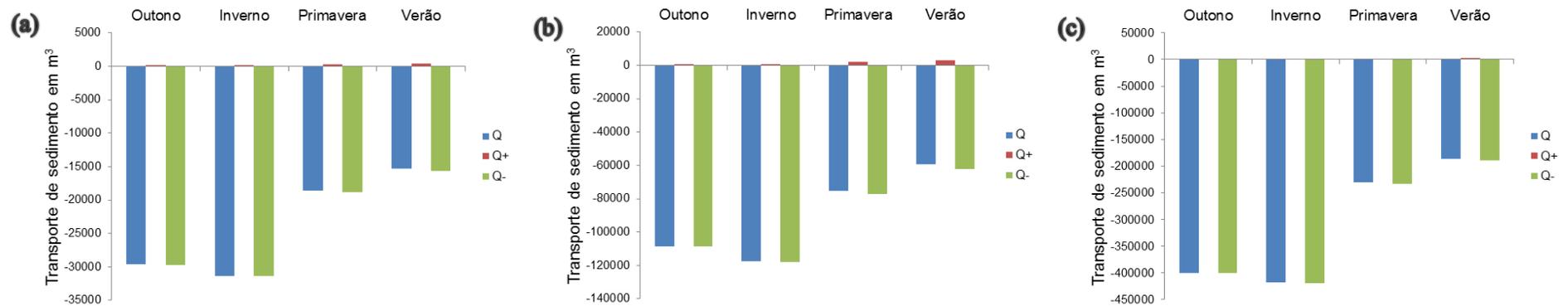


Figura 49. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 13, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

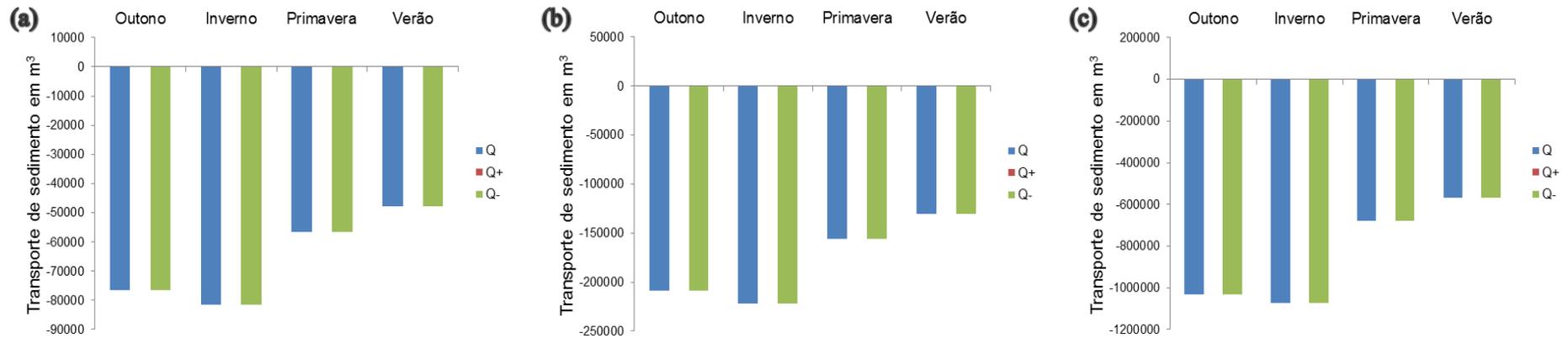


Figura 50. Análise sazonal do transporte longitudinal de sedimento positivo (Q+), negativo (Q-) e líquido (Q), característicos do perfil 15, calculados através das equações de (a) CERC (USACE, 1984), (b) Kamphuis (1991) e (c) Bayram *et al.* (2007).

5.4.6 Considerações Sobre a Variabilidade Sazonal do Transporte Longitudinal de Sedimento

A análise sazonal do transporte sedimentar mostrou que, para as três equações utilizadas, em todos os setores estudados as maiores taxas estão associadas às estações de outono e inverno, nas quais se integram os meses associados a estação chuvosa da região, caracterizada pelos maiores índices pluviométricos e intensidades de vento. Além disso, Com exceção do perfil 9, a direção do transporte na direção S-N prevalece em todas as estações e setores estudados, e as maiores taxas de transporte foram obtidas utilizando-se a equação de Bayram *et al.*.

Em monitoramento realizado na praia de Ponta Negra de junho a outubro de 2012, com resultados apresentados em relatório pericial por Amaro *et al.*(2012b), foram evidenciados estágios erosivos principalmente entre os meses de julho e agosto, e recomposição praial a partir do mês de outubro, com ocorrência de deposição de sedimento nas zonas de estirâncio e antepraia.

Apesar desse monitoramento ter levado em consideração o balanço sedimentar de três compartimentos praias (pós-praia, estirâncio e antepraia) fortemente influenciados por transportes sedimentares transversais e decorrentes na zona de espraiamento, e as equações utilizadas neste estudo serem aplicadas para o cálculo do transporte longitudinal decorrente na zona de surfe, a verificação de estágios erosivos durante os meses de junho a agosto concordam com as altas taxas de transporte longitudinal estimadas para a estação chuvosa. Autores como Karikawa (1988) e De Vriend (1997) citam que, embora, na maioria das vezes, os transportes sedimentares transversal e longitudinal sejam tratados de forma separada, principalmente por este último ser associado a processos de longo prazo, ambos podem interagir e participar igualmente da dinâmica de curto e médio prazo.

Portanto, os resultados apresentados mostram claramente que nas estações propícias a ocorrência de estados de mar mais energéticos, caracterizados por maiores alturas de onda e magnitude de corrente, a praia é erodida, havendo a possibilidade do sedimento ser transportado em sentido longitudinal à linha de costa, enquanto que nas estações menos energéticas, dominadas por ondas menores e mais calmas, o sedimento tem capacidade de retornar à praia.

5.4.7 Evolução Decadal do Transporte Longitudinal de Sedimento

De forma a analisar as variações de longo prazo das taxas do transporte de sedimento, e assim avaliar possíveis tendências de acreção ou diminuição no balanço sedimentar, foram feitas análises decadais para o transporte longitudinal líquido, desde 1950 a 2008. Como resposta, foram obtidas taxas de transporte longitudinal médio em m^3/ano para cada década analisada. Seguindo os mesmos critérios já comentados no tópico anterior, são apresentados apenas os resultados característicos dos perfis 1, 4, 5, 9, 11, 13 e 15, obtidos com as três equações trabalhadas.

Para os resultados obtidos por meio da equação CERC, exceto no perfil 9 (figura 51d) é verificado o predomínio de TLS negativo e uma diminuição da taxa de transporte líquida da década de 50 a década de 70, onde são verificados os menores valores. Da década de 70 a década de 2000 observa-se um aumento do TLS até valores próximos aqueles característicos das décadas de 50 e 60. As únicas exceções ocorrem para o perfil 9, no qual é constatado um aumento do transporte de sedimentos até a década de 80, seguido de uma diminuição até a década de 2000, e para o perfil 1 (figura 51a), no qual é verificado uma alternância entre aumento e diminuição da taxa de transporte entre as décadas de 50 e 2000.

Os resultados obtidos com a equação de Kamphuis apresentaram padrões semelhantes aos obtidos com a equação de CERC, sendo a principal diferença referente às maiores taxas de sedimento transportados. Apesar das variações interdecadais serem visualmente menos perceptíveis, as taxas de aumento e diminuição de volume de sedimentos transportados são bem mais significativas utilizando-se a equação de Kamphuis. E ainda que tenham sido constatadas semelhanças entre estas equações, o TLS decadal obtido para o perfil 1 diferiu do obtido com a equação de CERC, e apresentou padrão de comportamento contrário ao observado nos demais perfis (figura 52 a). Para ele é verificado um aumento da taxa de TLS da década de 50 a 70, seguida de uma diminuição da década de 70 a 90, onde volta a ocorrer um leve aumento até a década de 00. Ainda para o perfil 1, os valores máximos de TLS médio dado em m^3/ano são observados na década de 70, sendo este da ordem de $35.000.000 m^3/\text{ano}$, e os valores mínimos na década de 90, da ordem de $22.500.000 m^3/\text{ano}$. Vale lembrar que através dos resultados

obtidos para o TLS médio proveniente de toda série histórica de dados, foi verificado que a equação de Kamphuis superestimou a taxas de transporte nesse perfil.

Analisando os gráficos de TLS decadais obtidos com a equação de Bayram *et al.*, observam-se os mesmos padrões expressos nos resultados já comentados provenientes das equações de CERC e Kamphuis, ou seja, transporte predominantemente negativo, exceto pelo perfil 9, e uma diminuição das taxas de TLS da década de 50 a 70, seguido de um aumento até a década de 2000. Para o perfil 1, é observado comportamento semelhante aquele obtido com a equação de CERC. Especificamente para os perfis 1, 4 e 11 (figura 53a, 53b e 53e), a escala atribuída para a construção dos gráficos exibe um aumento mais significativo das taxas de transporte de sedimento a partir da década de 80. No entanto, proporcionalmente não há diferença entre esses resultados e os obtidos com as outras duas equações utilizadas. Mas é importante ressaltar que, devido as maiores taxas geradas pelo cálculo com a equação de Bayram *et al.*, é verificado, por exemplo, tendo como referência os perfis 4 e 11, um aumento da ordem de 250.000 m³/ano do transporte de sedimento entre as décadas de 70 e 2000.

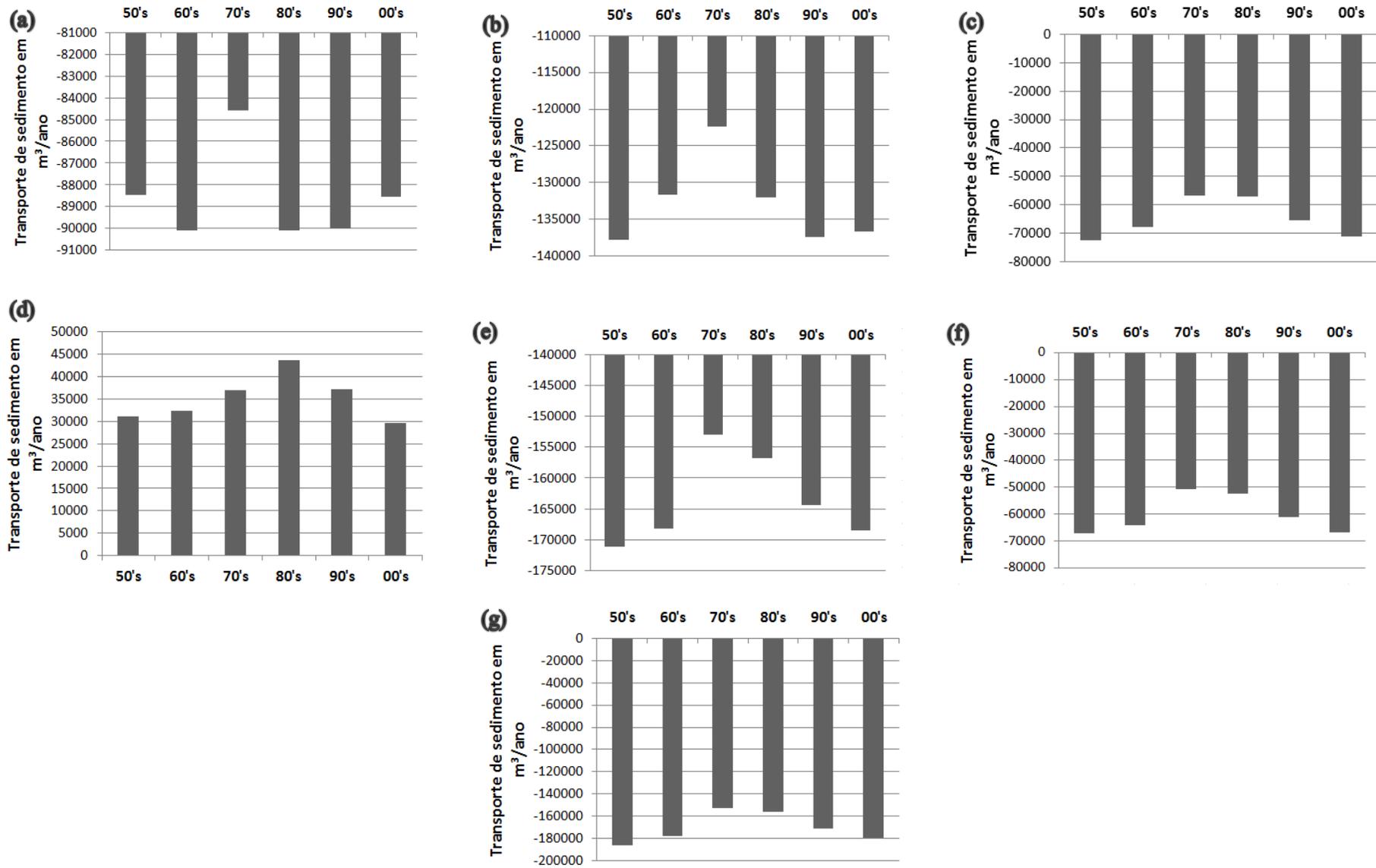


Figura 51. Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação CERC (USACE, 1984), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.

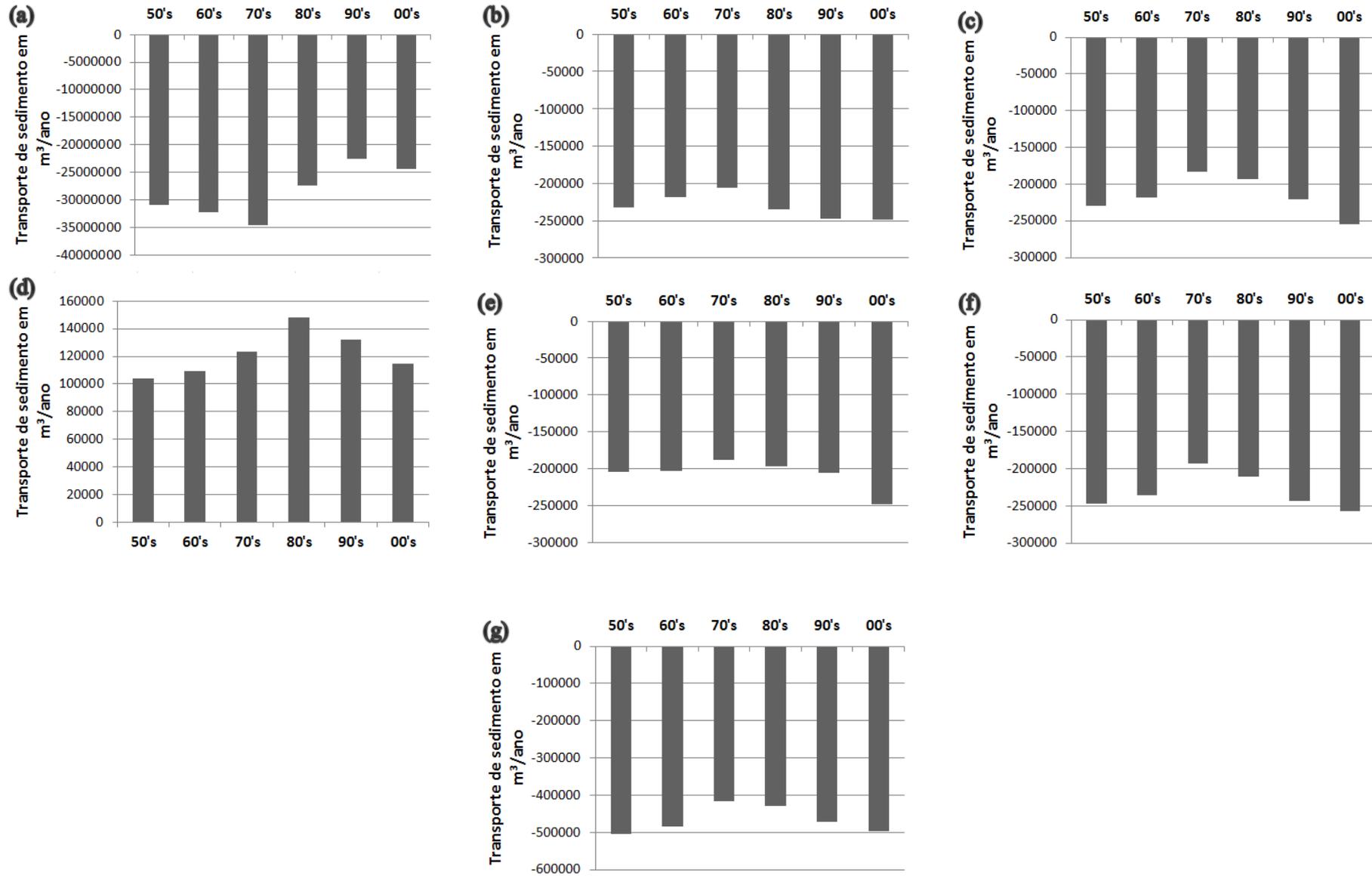


Figura 52. Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação de Kamphuis (1991), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.

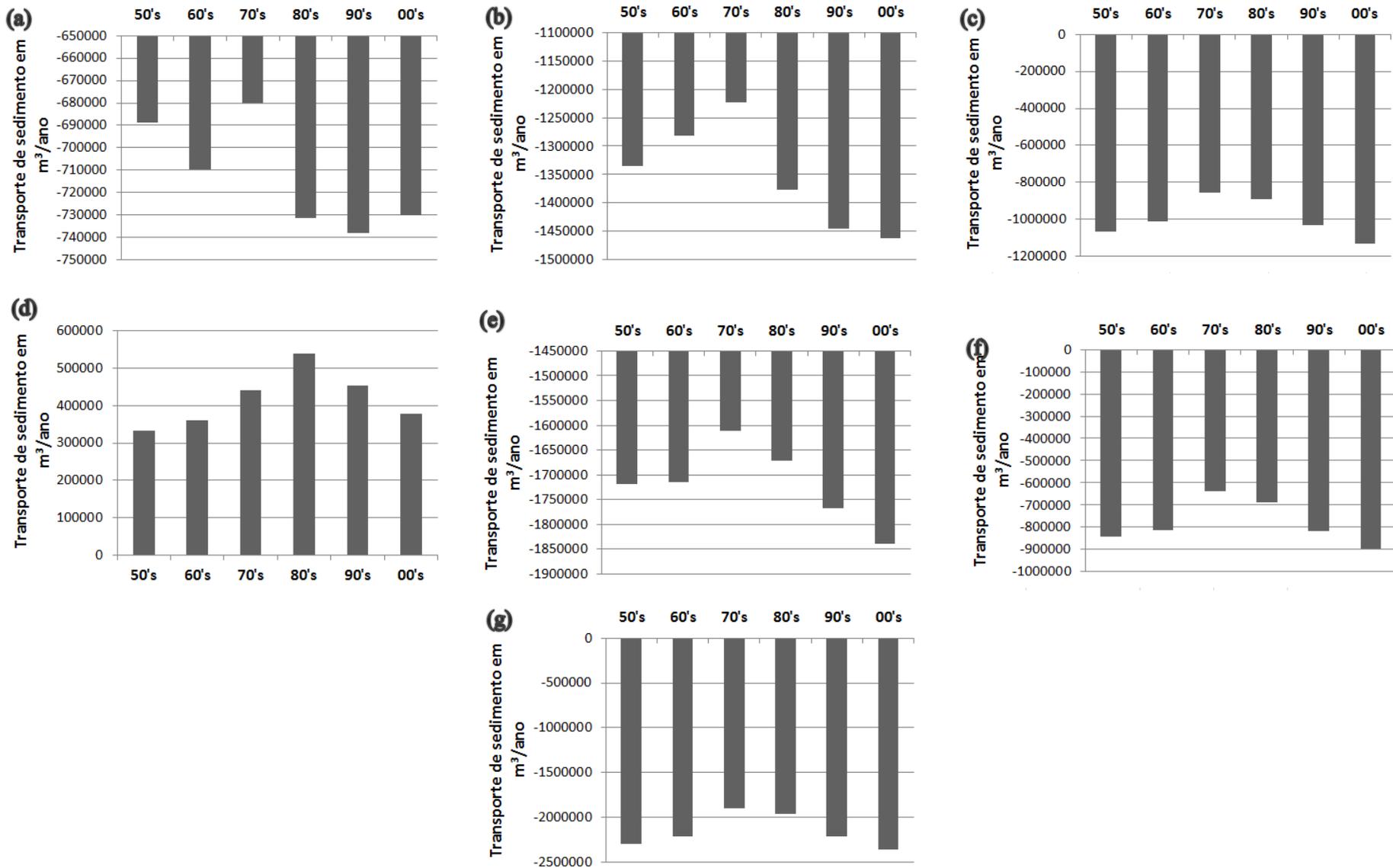


Figura 53. Análise decadal do transporte longitudinal de sedimento obtido por meio da equação de Bayram *et al.* (2007), para os perfis (a) 1, (b) 4, (c) 5, (d) 9, (e) 11, (f) 13 e (g) 15.

5.4.8 Considerações Sobre a Evolução Decadal do Transporte Longitudinal de Sedimento

De acordo com Larson e Kraus (1995), a análise interdecadal da dinâmica sedimentar e de variações morfológicas leva em consideração a atuação de processos em mega-escalas, implicando, conseqüentemente, em variações morfológicas de larga escala. As alterações espaciais nessa perspectiva podem ocorrer como resultado de efeitos provenientes de mudanças climáticas, transformações naturais da dinâmica costeira, influências provocadas pelo homem, dentre outros.

De forma geral, os resultados obtidos para o TLS interdecadal na área de estudo mostram uma diminuição da taxa de transporte da década de 50 a década de 70, seguido de um aumento até a década de 00. Dentre as equações utilizadas, Bayram *et al.* Apresentou os maiores valores de transporte sedimentar anual médio

Especificamente para o setor I, coincidentemente a partir da década de 80 a praia de Ponta Negra começou seu processo de urbanização, com a instalação do calçadão, asfaltamento, crescimento expressivo da rede hoteleira e adensamento para mais de 4 mil pessoas / km² nos anos 90 (FURTADO, 2008; BUSMAN *et al.*, 2013).

Apesar das modificações estabelecidas nessa região serem capazes de interagir e influenciar de forma significativa os processos costeiros, a exemplo da grande quantidade de sedimentos mobilizados pelos escoamentos de águas pluviais nos sistemas de drenagem existentes na praia, constatado por Amaro *et al.* (2014), a metodologia e equações utilizadas para o TLS utilizadas nesse trabalho não levam em consideração esse tipo de influência. No entanto, a ocupação desordenada de compartimentos costeiros ao longo dos anos, promovendo alterações da dinâmica natural do ambiente, aliada a um aumento gradativo das taxas de transporte sedimentar, com capacidade de mobilizar grandes volumes de material, podem configurar eventos potencialmente destrutivos para feições naturais e antrópicas existentes na praia. Como exemplo pode ser citado o caso da praia de Ponta Negra, na qual um acentuado processo erosivo destruiu parte do calçadão, obrigando as autoridades competentes a interditar determinados trechos desse elemento urbano.

Ainda com relação ao setor I, Busman *et al.* (2013) avaliaram mudanças de longo prazo (interdecadal) da praia de Ponta Negra entre os anos de 1986 e 2010, utilizando um Sistema de Análise Digital de Linha de Costa (do inglês Digital

Shoreline Analysis System). Os autores verificaram que até 1999 ocorreu processo deposicional na praia, seguido por um intenso processo erosivo, com retração média de aproximadamente 11,1 m por década, até o ano de 2010 e mais efetivamente até o ano de 2013.

Busman *et al.* (2014) ao compararem predições da linha de costa provenientes de três diferentes métodos de regressão linear, baseando-se em imagens de satélite de 1986, 1994, 2004 e 2012, constataram que mais de 97% da praia está sujeita a erosão. E que mesmo em condições dinâmicas menos intensas, um dos métodos utilizados ainda indicou uma retração da linha de costa entre -0,9 m/ano e -2,0 m/ano.

Assim como o setor I, estudos desenvolvidos nos demais setores, a exemplo de Nunes (2011) e da Silva *et al.*(2013 b), também constatarão indicativos de problemas relacionados a erosão. E apesar de não se ter conhecimento a respeito da variação da linha de costa ao longo das décadas para essas áreas (exceto para o setor I), de acordo com a síntese do 5º relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), o nível dos oceanos já subiu em média 19 cm entre 1901 e 2010, e é muito provável que a taxa de elevação dos oceanos durante o século 21 exceda a observada entre 1971 e 2010, o que intensificaria os processos erosivos nas zonas costeiras e contribuiria ainda mais para o aumento das taxas de transporte de sedimento.

Em vista dos fatos e resultados apresentados, é possível perceber que as altas taxas de TLS decorrentes na área de estudo também são verificadas em décadas passadas, o que confirma a ocorrência natural desse fenômeno. No entanto, os efeitos acumulados e associados entre a elevação do nível médio do mar e a consequente retração da linha de costa, o aumento da taxa de TLS a partir da década de 70 e da ocupação desordenada do ambiente costeiro, podem ser considerados alguns dos principais atores responsáveis pelo estabelecimento do acentuado quadro erosivo sucedido nos setores estudados.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como principais objetivos analisar o comportamento de agentes hidrodinâmicos (ondas e correntes) e o transporte longitudinal de sedimentos ao longo de quatro setores do litoral sul de Natal, caracterizados por apresentarem praias urbanas de relevante interesse turístico e que atualmente vêm sofrendo impactos oriundos de processos erosivos. Como ferramenta foi utilizado o software SMC-Brasil, sistema que integra uma série de modelos numéricos próprios para serem aplicados ao longo do litoral brasileiro.

A análise do clima de onda ao largo da região de estudo indicou o predomínio de ondas incidentes principalmente de leste, leste-sudeste e sudeste, sendo dominantes as ondulações de leste-sudeste, representando 78,04 % dos estados de mar, com alturas de onda e períodos de pico correspondentes a 1,5 m e 7,19 s em situações médias de agitação marítima, e 2,34 m e 11,88 s em situações extremas.

A propagação das ondas até a costa foi realizada considerando cenários médios e extremos para as três direções de onda predominantes. Com relação aos cenários modelados, as principais diferenças observadas corresponderam às magnitudes de H_s , sendo os maiores valores associados aos cenários extremos. Em todos os casos modelados foram perceptíveis os processos de transformação das ondas ao se aproximarem da linha de costa, principalmente nos pontais característicos das enseadas ou baías em forma de zeta. Associada a esse tipo de morfologia, são observadas regiões mais protegidas junto às zonas de sombra associadas aos pontais, e um aumento das alturas das ondas nos trechos de praia mais expostos.

Principalmente nos casos modelados com ondas incidentes de E e ESE, observa-se que estas alcançam a costa com uma certa inclinação, resultando na formação de correntes litorâneas e gerando condições propícias para o desenvolvimento do transporte longitudinal de sedimentos.

Na área de estudo é verificado a predominância de correntes no sentido S-N e a ocorrência de maiores magnitudes associadas aos casos propagados com cenários extremos, decorrentes principalmente nos pontais existentes na região. Somente para o trecho de praia localizado ao final da Via Costeira são verificadas correntes com sentido contrario. Esse comportamento tem como explicação a pouca obliquidade de chegada das ondas nesse trecho da costa e efeito causado pelo

pontal de Mãe Luiza na incidência de ondas incidentes principalmente de E, gerando dois gradientes de quebra específicos, um em direção as praias do setor II e outro em direção a praia de Areia Preta.

Devido às próprias características de direção e incidência dos agentes hidrodinâmicos analisados, o transporte longitudinal médio anual de sedimentos apresentou uma resultante negativa, ou seja, de sentido S-N. Dentre as equações utilizadas para realizar o cálculo do TLS, verificou-se, através de relações com o fluxo médio de energia e com estudos desenvolvidos por outros autores, que para a realidade da região de estudo a equação de Bayram *et al.* (2007) é a mais adequada para esse tipo de aplicação. Vale ressaltar que esta equação originou as maiores taxas de TLS.

Para a praia de Ponta Negra, a equação de Bayram *et al.* (2007) estimou um aumento da taxa de TLS em sentido S-N das regiões mais abrigadas para as regiões mais expostas, com resultantes variando de aproximadamente 700.000 m³/ano a 1.400.000 m³/ano. O trecho de praia defronte a Via Costeira foi o único onde se observou perfis com taxas de TLS líquidas com sentido N-S. Esse sentido de transporte tem como possíveis explicações a pouca obliquidade das ondas neste setor, principalmente nos casos propagados com ondas de E e ESE, e a ocorrência de um gradiente de quebra de onda no Pontal de Mãe Luiza em direção ao trecho de praia. Contudo, nesse trecho da zona costeira predomina TLS líquido com sentido S-N, sendo estimadas taxas mínimas de 133.400 m³/ano e máximas de 1.000.000 m³/ano. Nos setores costeiros compreendidos entre o Pontal de Mãe Luiza e a praia do Forte também são observadas altas taxas de TLS líquidas com sentido S-N, e um aumento das taxas de transporte das regiões mais abrigadas para as mais expostas, sendo transcorridas variações de 792.054 m³/ano a 2.000.000 m³/ano.

Com a análise sazonal também foi observado o predomínio de TLS líquido negativo para todas as estações do ano, com as maiores estimativas atreladas a equação de Bayram *et al.*. Para todas as equações aplicadas, as maiores taxas de transporte estão associadas às estações de outono e inverno, que corresponde ao período chuvoso do Estado do Rio Grande do Norte, no qual, prevalecem os maiores índices pluviométricos e as maiores intensidades dos ventos. A constatação de estados praias sob efeitos erosivos nesse período evidencia a existência de uma relação direta entre a dinâmica sedimentar e a ocorrência de estados de mar mais energéticos.

A partir da evolução das taxas de transporte médio anual interdecadal foi verificado que da década de 50 a 70 houve uma diminuição dessas taxas, seguido de um aumento até os anos 2000. Assim como nas outras análises, o transporte no sentido S-N é dominante, e a equação de Bayram *et al.* estimou os maiores valores de transporte. Fazendo uma relação entre o aumento das taxas de TLS com o aumento do nível médio do mar e as consequentes variações da linha de costa, bem como com o processo de ocupação desordenada do ambiente costeiro, observa-se que esses processos estão intimamente associados, principalmente quando analisadas as evoluções desses três componentes desde a década de 70. Conclui-se, portanto, que seus efeitos acumulados tiveram influência significativa para o estabelecimento do quadro erosivo sucedido nos setores estudados.

Como recomendações, sugere-se a realização de novas modelagens subsidiadas por informações de qualidade (para todos os setores) de batimetrias de detalhe e parâmetros relacionados às características do sedimento praiial, as quais podem influenciar consideravelmente na resposta dos processos modelados. Com relação a validação das equações utilizadas para o cálculo do TLS, é importante que sejam realizadas campanhas com aplicações de técnicas de campo para quantificação do transporte sedimentar, e assim, comparar e melhor avaliar a consistência das formulas aplicadas.

Sugere-se ainda a realização de estudos detalhados para as praias dos Artistas, do Meio e do Forte, de forma a entender a influência no aporte e trânsito sedimentar proporcionada pela existência do arrecife de arenito alinhado paralelamente à linha de costa destes setores. Além disso, essas praias se encontram próximas à foz do Rio Potengi, o qual pode contribuir como uma fonte de sedimentos. Dessa forma, sua influência no transporte e balanço sedimentar das praias em seu entorno poderia ser pensado como objeto específico de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J. J. **Transporte Sedimentar Longitudinal e Morfodinâmica Praial: Exemplo do Litoral Norte de Santa Catarina** (2011). Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, 484 p.
- ACKERS, P.; WHITE, W.R. **Sediment transport: new approach and analysis**. Journals of Hydraulics Division, v. 99, p. 2041– 2060, 1973.
- ALMEIDA, L. R.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; ARAÚJO, D. J. C. **Clima Marítimo na Praia de Ponta Negra, baseado em dados de Reanálise do SMC-Brasil**, Congresso Latino Americano de Hidráulica (HIDROLATAM), XXVI, 2014, Santiago. Artigo completo... Santiago: Hotel Sheraton & Convention, 2014, p.10.
- AMARAL, R.F. (2000). **Contribuição ao Estudo da Evolução Morfodinâmica do Litoral Oriental Sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa** (2000).Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 252.
- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S.. **Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil**. Marine Geodesy (2014), DOI:10.1080/01490419.2014.904257
- 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.. **Compêndio fotográfico das modificações de paisagem na orla da Praia de Ponta Negra para o período entre 2009 e 2012**, 2012a.
- 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.. **Laudo Pericial para ações emergenciais no calçadão de Ponta Negra/ RN – Considerações Técnicas**. MP-RN. Natal/RN/Brasil, p. 130, 2012b.
- ANDRADE, G.O. **Alguns aspectos do quadro natural do Nordeste**. Recife, SUDENE, Coordenadoria do planejamento Regional – Divisão Política Espacial. P. 75, 1977.
- ARAÚJO, R. N. e ALFREDINI, P.. **O Cálculo do Transporte de Sedimentos Litorâneo: Estudo de Caso das Praias de Suarão e Cibratel (Município de Itanhaém, São Paulo)**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 2, p. 15-28, 2001.
- BIJKER, E. W. - **Some Considerations about Scales for Coastal Models with Movable Bed**, Delft Hydraulics Laboratory, Publication N° 50, Delft, The Netherlands, 1967.
- BAGNOLD, R.A. **An approach to the sediment transport problem from general physics**. US Geological Survey, v. 422-I, p.11–137, 1966.

BAGNOLD, R.A. **Beach and nearshore processes part 1: mechanics of marine sedimentation. The Sea: Ideas and Observations**, v. 3. Interscience, NY/Hill M.N, p. 507–528, 1963.

BAILARD, J.A. **An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach**. Journal of Geophysical Research, v. 86, p.10938–10954, 1981.

BAILARD, J.A.; INMAN, D.L. **An energetics bedload model for plane sloping beach: local transport**. Journal of Geophysical Research, v. 86 , p. 2035– 2043, 1981.

BAKHTYAR, R.; GHAHERI, A.; YEGANEH-BAKHTIARY, A.; BALDOCK, T.E. **Longshore sediment transport estimation using a fuzzy inference system**. Applied Ocean Research, v. 30 p. 273-286, 2008.

BASCOM, W. N. **The relationship between sand-size and beach-face slope**. Transaction of American Geophysical Union, v. 32, n. 6, p. 866-874, 1951.

BATTJES, J.A.; JANSSEN, J.P.F.M. **“Energy loss e set-up due to breaking of random waves”**, Proc. 16th Coastal Engineering Conf., ASCE, p. 569-587, 1978.

BAYRAM, A.; LARSON, M.; HANSON, H. **A new formula for the total longshore sediment transport rate**. Coastal Engineering. 54, p.700–710, 2007.

BAYRAM, A.; LARSON, M.; MILLER, H.C.; KRAUS, N.C. **Cross-shore distribution of longshore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements**. Coastal Engineering. n.44, p. 79-99, 2001.

BIJKER, E. **Littoral drift as function of waves and current**. 11th Coastal Eng. Conf. Proc. ASCE, London, UK, p. 415–435, 1968.

BIJKER, E.W. **Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current. Design and reliability of coastal structures**. Tecnoprint, Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures attached to the 23rd International Conference on Coastal Engineering, Venice, p. 147–171, 1992.

BIJKER, E.W. **Some considerations about scales for coastal models with movable beds**. Delft Hydraulics Laboratory, Netherlands, n. 50, 1967.

BIRD, E.C.F. **Coastal Geomorphology: an introduction**. Wiley, England, p. 411, 2008.

BOOIJ, N., RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H.. **A third-generation wave model for coastal regions. Part I: model description and validation**. Journal of Geophysical Research, n. 104 (C4), p. 7649–7666, 1999.

BORGMAN, L. E. **Directional spectrum estimation for the Sxy gauges**. USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg, p. 104. 1984.

BOUWS, E.; GÜNTHER, H.; ROSENTHAL, W.; VINCENT, C. L. **Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water**. Journal of Geophysical Research, v. 90, p. 975-986, 1985.

BRUUN, P. **Coast Erosion and the Development of Beach Profiles**. Technical Memorandum n. 44, Beach Erosion Board, 1954.

BUSMAN, D.V; AMARO , V. E.; PRUDÊNCIO, M. DA C.; LIMA, F. G. F.; MATOS , M. DE F. A.; MOURA, J.E. **Shoreline Changes From 1986 to 2010 on Ponta Negra Beach, Natal / RN, Northeast Brazil**. In: 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, Libon, 2013. International Short Course/ Conference on Applied Coastal Research. Lisbon, 2013.

BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; PRUDÊNCIO, M. C. **Comparison of Prognostic Models in Different Scenarios of Shoreline Position on Ponta Negra Beach in Northeastern Brazil**. International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering, v.8, n.3, 2014.

CADWELL, J. M. Wave action and sand movement near Anaheim bay, California. Technical Memorandum, n°68, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, p. 21, 1956.

CAMENEN, B.; LARROUDÉ, P. **Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment**. Coastal Engineering. v. 48, p. 111-132, 2003.

CAMUS, P., MÉNDEZ, F.J., IZAGUIRRE, C., REGUERO, B.G., MEDINA, R.. **Statistical and dynamical downscaling to transfer wave climate to coastal areas**. European Geosciences Union, May 02-07, Vienna, Austria, 2010.

CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. **High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas**. Coastal Engineering, v. 72, p. 56-68, 2013.

CARTER, R. W. G. **Coastal environments**. London: Academic Press, p. 617, 1988.

CASTANHO, J. - Rebentação das Ondas e Transporte Litoral. Memória n° 275, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, p. 278, 1966.

CHARLIER, R.H. and DE MEYER, C.P. **Coastal erosion: Response and management**. Heidelberg & New York, Springer Verlag, p. 343, 1998.

COWELL, P.J.; THOM, B.G. **Morphodynamic of coastal evolution**. In: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.C. (ED.). Coastal Evolution. Cambridge: Cambridge University Press, p. 33-86, 1994.

CUNHA, E. M. S. **Evolución actual del litoral de Natal – RN (Brasil) y sus aplicaciones a la gestión integrada** (2004). Tese (Doutorado em Ciências do Mar). Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Universidade de Barcelona. Barcelona, 128p.

CUNHA, E. M. S.; MAIA, E. L. P. **Projeto de Proteção e Recuperação da Praia de Areia Preta, Natal-RN**, In: 62º Reunião da SPBC, Natal/RN, julho, 2010.

DA SILVA, F. J. O.; NEVES, C. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; JUNIOR, O. F. S. **Impactos Potenciais Ocasionados pela elevação do Nível do mar ao longo da 'via costeira' de natal/RN**, Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX, 2013, Bento Gonçalves. Trabalho Completo, Bento Gonçalves, 2013 a, p. 8.

DA SILVA, F. J. O.; NEVES, C. F.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; JUNIOR, O. F. S., **Considerações sobre os potenciais Impactos ocasionados pela elevação do nível médio do mar nas praias 'do meio'e 'dos artistas', Natal/RN**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XX, 2013, Bento Gonçalves. Trabalho Completo... Bento Gonçalves, 2013 b, p. 8.

DAMGAARD, J.S.; SOULSBY, R.L. **Longshore bed-load transport**. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, Orlando, p. 3614–3627, 1996.

DE VRIEND, H. J. **Evolution of marine morphodynamic modeling: time for 3-D?** German Journal of Hydrography, v. 49, n. 2/3, p. 331-341, 1997.

DEAN, R.G. **Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts**. Oceanic Engineering Report 12, University of Delaware, 45 p. 1977.

DEAN, R.G. Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. Proceedings of the Specialty Conference on Coastal Sediments '87, American Society of Civil Engineers, p. 1-24, 1987.

DEAN, R.G; DALRYMPLE, R. A. **Water Waves Mechanics for Engineers and Scientists**. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, p. 353, 1984.

DEAN, R.G; DALRYMPLE, R.A. **Coastal Process with Engineering Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 475,2002.

DEL VALLE, R., MEDINA, R., LOSADA. M. **“Dependence of coefficient k on grain size”**, Technical Note No. 3062. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, v. 119, n. 5, 1993.

DIBAJNIA, M.; Watanabe, A. **Sheet flow under nonlinear waves and currents**. Coastal Engineering, p. 2015– 2029, 1992.

DINIZ, R.F.. **Erosão costeira e o desenvolvimento de costa com baías em forma de zeta no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte**. Resumos. 50a. Reunião Anual da SBPC. Natal-RN, p.1041, 1998.

DINIZ, R.F.; COSTA NETO, L.X.; MAIA, L.P. **Transporte e deposição de sedimentos ao longo do trecho costeiro Praia de Ponta Negra-Via Costeira, Natal-RN**. In: 41 Congresso Brasileiro de Geologia. SBG, João Pessoa, 2002. *Anais 41 Congresso Brasileiro de Geologia*, João Pessoa, 2002, p. 87.

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C. S.P., **Regional assesment of long-term trends of coastal erosion in Northeastern Brazil**. In: Academia Brasileira de Ciências, 68, 1996. Anais Academia Brasileira de Ciências, 1996, p. 355-372.

ELFRINK, B.; BALDOCK, T. **Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives**. Coastal Engineering, v. 45, p. 149-167, 2002.

ENGELUND, F.; HANSEN, E. **A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams**. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, 1967.

ESTEVEZ, L. S.; WILLIAMS, J. J.; LISNIEWSKI, M. A. **Measuring and modelling longshore sediment transport**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 83, p. 47-59, 2009.

FCPC - FUNDAÇÃO CEARENSE DE PESQUISA E CULTURA. **Relatório de Impacto Ambiental: Emissário submarino de Ponta Negra – Natal/RN, Vol. II**. Natal, 2008. Disponível em: < <http://200.149.240.140/rimas/rimas.asp>> Acesso em: 19 nov. 2013.

FERREIRA, A.T.S.; AMARO, V. E. ; SANTOS, M. S. T. **“Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia”**. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2013.

FISHER, R.A., TIPPETT, L.H.C. **Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample**. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, v. 24, 180- 190. 1928.

FONTOURA, J. A. S. **Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil**. 2004. 281 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

FRANKE, R. **Scattered data interpolation: test of some methods**. Math. Comp., n. 38, p. 181-200, 1982.

FRIJLINK, H.C. **Discussion of the sediment transport formulas of Kalinske, Einstein and Meyer–Peter and Muller in relation to recent sediment transport measurements in Dutch rivers**. 2me Journal Hydraulic, Soc. Hydraulic de France, Grenoble, p. 98–103, 1952.

FURTADO, E.M. **A onda do turismo na cidade do sol**. Natal: EDUFRN, 188p. 2008.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T.P.; BOUWS, E.; H. CARLSON, D. E.; CARTWRIGHT, K.; ENKE, J. A.; EWING, H.; GIENAPP, D. E.; HASSELMANN, P.; KRUSEMAN, A.; MEERBURG, P.; MULLER, D. J.; OLBERS, K.; RICHTER, W.; SELL E WALDEN, H. **Measurements of wind-wave growth and swell decay**

during the **Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, n. 8, p. 93, 1973.

HORIKAWA, K. **Nearshore dynamics and coastal processes**. Tokyo: University of Tokyo Press. p. 522, 1988.

HSU, J. R-C.; BENEDET, L.; KLEIN, A. H. F.; RAABE, A. L. A.; TSAI C-P.; HSU, T-W.. **Appreciation of static bay beach concept for coastal management and protection**. Journal of Coastal Research, n. 24, v.1, p. 812–835, 2008.

IH - CANTABRIA. **Documento de referência vol. I: Dinâmica**. Cantabria: State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, p. 580, 2000.

IH-CANTÁBRIA. **Documento Temático - Ondas**. Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria. Santander, p. 155, 2013d.

IH-CANTÁBRIA. **Modelo de Referência – Modelo de Correntes de Quebra em Praias**. Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria. Santander, p. 160, 2013c.

IH-CANTÁBRIA. **Modelo de Referência – Modelo de Propagação de Onda Espectral**. Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria. Santander, p. 172, 2013b.

IH-CANTÁBRIA. **Sistema de Modelado Costeiro - Manual de Referência**. Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria. Santander, p. 160, 2013a.

INMAN, D.L.; BAGNOLD, R.A. **Littoral processes, the sea**. In: Hill, M.N. (Ed.), *The Earth Beneath the Sea*, v. 3. Interscience, NY, p. 529–551, 1963.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **The Synthesis Report of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. p. 138, 2014.

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. **The NCEP/ NCAR Reanalysis Project**. Bulletin of the American Meteorology Society, n. 77, p. 437–471, 1996.

KAMPHUIS, J.W. **Alongshore sediment transport rate**. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, v. 117, p.624–640, 1991.

KAMPHUIS, J.W., READSHAW, J.S. **A model study of alongshore sediment transport rate**. ASCE, Hamburg, Germany, p. 1656–1674, 1978.

KIRBY, J. T. **Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves**. Journal of Geophysical Research, v. 91, n. C1, p. 933-952, 1986.

KOMAR, P.D. **The longshore transport of sand on beaches**. 1969. Tese - Ph.D., Scripps Institute of Oceanography, University of California, San Diego, 1969, p. 104.

KOMAR, P.D.; Inman, D.L. **Longshore sand transport on beaches**. Journal of Geophysical Research, v.75, n. 30, p. 5914–5927, 1970.

KRAUS, N.C., ISOBE, M., IGARASHI, H., SASAKI, T., HORIKAWA, K. **Field experiments on longshore sand transport in the surf zone**. Proceedings of the 18th Coastal Engineering Conference, ASCE, p. 969–988, 1982.

KUMAR, V.S; ANAND, N.M.; CHANDRAMOHAN, P.; NAIK, G.M. **Longshore sediment transport rate - measurement and estimation, central west coast of India**. Coastal Engineering, v. 48, p. 95-109, 2003.

LABOMAR - INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR. **Relatório Técnico de Análise Ambiental do Litoral de Ponta Negra – RN para implantação do emissário submarino**. 32p. 2007.

LARSON, M. & KRAUS, N. **Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales**. Marine Geology, v. 126, p. 111–127, 1995.

LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWARTH, R. W. **Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'Surf Beat'**. Journal of Fluids Mechanics, v. 13, p. 481-504, 1962.

MIL-HOMENS, J.; RANASINGHE, R.; VRIES, J.S.M.V.T.; STIVE, M.J.F. **Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas**. Coastal Engineering, v. 75, p. 29-39, 2013.

MILLER, H.C. **Field measurements of longshore sediment transport during storms**. Coastal engineering, v. 36, p. 301-321, 1999.

NUNES, L. S.. **Dinâmica Costeira entre as Praias de Areia Preta e do Forte, Natal/RN** (2011). Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 132, 2011.

OLIVEIRA, M.I.M., 1978.- **Os Recifes de Natal**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 30 Anais. Recife, p. 838-847,1978.

REEVE, D.; CHADWICK, A.; FLEMING, C. **Coastal Engineering: processes, theory and design practice**. New York: Spon Press, p. 490, 2004.

REGUERO, B. G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F.J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I. J.. **A Ocean Global Wave (GOW) Calibrated Reanalysis from 1948 Onwards**. Coastal Engineering, n. 65, p. 38-55, 2012.

RIBBERINK, J. **Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows**. Coastal Engineering, v. 34, p. 52– 82, 1998.

ROSMAN, P. C. C. e SCUDELARI, A, C.. **Análises complementares e prognósticos do funcionamento do emissário submarino de Ponta Negra em Natal-RN com efluentes tratados: Relatório sobre de avaliação de aspectos sedimentológicos e estruturais**, p. 52, 2009.

SCHOONEES, J. S.; THERON, A. K. **“Improvement of the most accurate longshore transport formula”** 25 Intern, Conf. On Coastal – Eng. ASCE, v. 4, p. 3652-3665, 1996.

SCHOONEES, J.S., THERON, A.K. **Review of the field-data base for longshore sediment transport**. Coastal Engineering, v. 19, p.1–25, 1993.

SEMURB - SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E URBANISMO. **Natal ambiental**. Natal, p, 34, 2010a. Disponível em: < <http://www.natal.rn.gov.br/semurb/paginas/ctd-97.html>> Acesso em 20 Nov. 2013a.

SEMURB - SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E URBANISMO. **Natal –Geografia e Meio Ambiente**. Natal, p, 18, 2010b. Disponível em: < <http://www.natal.rn.gov.br/semurb/paginas/ctd-97.html>> Acesso em 20 Nov., 2013b.

SEPLAN – Secretaria de Estado do Planejamento e das Finanças. Governo do Rio Grande do Norte. Coordenadoria de Estudos Socioeconômicos. IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. **Perfil do Rio Grande do Norte**. Natal, 2012 . Disponível em: <<http://www.seplan.rn.gov.br/arquivos/download/PERFIL%20DO%20RN.pdf>> Acesso em: 17/09/2013.

SILVESTER, R.. Coastal Engineering., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Publ. Co., v.2, p. 338, 1974.

SMITH, E.R.; WANG, P.; EBERSOLE, B.A.; ZHANG, J. **Dependence of total longshore sediment transport rates on incident wave parameters and breaker type**. Journal of Coastal Research, n. 250 (3), p. 675–683, 2009.

SOULSBY, R.L. **Dynamics of Marine Sands. A Manual for Practical Applications**. Thomas Telford, London, UK, p. 249, 1997.

SOULSBY, R.L.; DAMGAARD, J.S. **Bedload sediment transport in coastal waters**. Coastal Engineering, v. 52, p. 673-689, 2005.

SPROVIERI, F.C.; FONTOURA, J.A.S. **Modelagem Numérica do Potencial Hidrodinâmico e do Transporte de Sedimentos na Praia do Cassino e no Entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), Utilizando o Modelo SMC**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.17, n.3, p. 187-195, 2012.

SWART, D. W. Coastal Sediment Transport: Computation of Longshore Transport. Delft Hydraulics Laboratory, Report on Investigation N° R 968, Part I, 1976.

SWART, D. W. Predictive Equations Regarding Coastal Transports, In 15° Coastal Engineering Conference, Honolulu, 1976.

TECHNOR ENGENHARIA. **Relatório de Impacto Ambiental – Adequação e Implantação de Melhorias da Rodovia RN 301 (Via Costeira)**. Natal, Technor Engenharia LTDA, p. 66, 2007.

THORNTON, E.B. E GUZA, R.T.. “**Surf zone longshore currents e random waves: Field data e model**”, J. Physical Oceanography, n. 16, p. 1165-1178, 1986.

TOLMAN, H .L. **User manual and documentation of Wavewatch – III version 2.22**. NOAA/NCEP. 2002.

TOMASICCHIO, G.R.; D’ALESSANDO, F.; BARBARO, G.; MALARA, G. **General Longshore Transport Model**. Coastal Engineering, v.71, p. 28-36, 2013.

USACE - US Army Corps of Engineers. **Shore Protection Manual**, Coastal Engineering Research Center, 1984.

VALENTINI DE SOUZA , E. M. S. **Os métodos de cálculo do transporte litorâneo e sua aplicação ao litoral de Natal – RN**. Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ,1981.

VAN DER MEER, J.W. **Static and dynamic stability of loose material**. Coastal Protection, Balkema, p. 157–195, 1990.

VAN RIJN, L. **Handbook Sediment Transport by Currents and Waves**. Delft Hydraulics, v. Report H461, 1989.

VAN RIJN, L.C. **Sediment transport: Part I: Bed load transport**; Journal of Hydraulic Division, v. 110, p.1431– 1456, 1984a.

VAN RIJN, L.C. **Sediment transport: Part II: Suspended load transport**. Journal of Hydraulic Division, v. 110, p. 1613– 1641, 1984b.

VAN RIJN, L.C. **Sediment transport: Part III: Bed forms and alluvial roughness**. Journal of Hydraulic Division, v. 110, p.1733-1754, 1984c.

VITAL, H. **Erosão e progradação no litoral do Rio Grande do Norte**. In: MUEHE, D. (org.). Erosão e progradação no litoral brasileiro. Brasília, MMA, 2006.

WATANABE, A. **Total rate and distribution of longshore sand transport**. Proceedings of the 23rd Coastal Engineering Conference, p. 2528– 2541, 1992.

WELLEN, E.V.; CHADWICK, A.J.; MASON, T. **A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches**. Coastal Engineering, v.40, p. 243–275, 2000.

WENTWORTH, C. K. "**A scale of grade and class terms for clastic sediments**", The Journal of Geology, n. 30, p. 377–392, 1922.

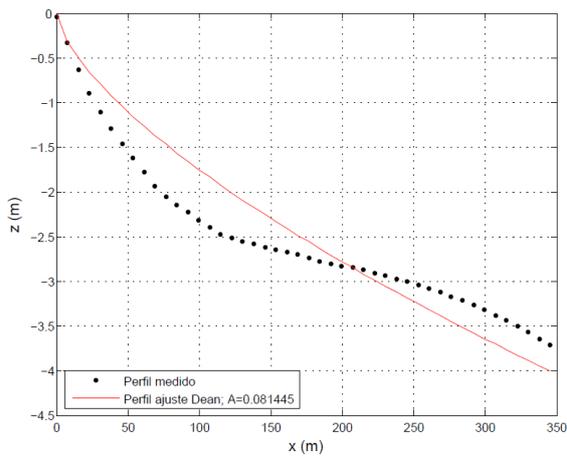
WHITE, T.E. **Status of measurement techniques for coastal sediment transport**. Coastal Engineering, v.35, p. 17-45, 1998.

WINYU, R.; TOMOYA, E. S.. "**Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves**", Coastal Eng. Journal, v. 40, n. 4, p. 327-346, 1998.

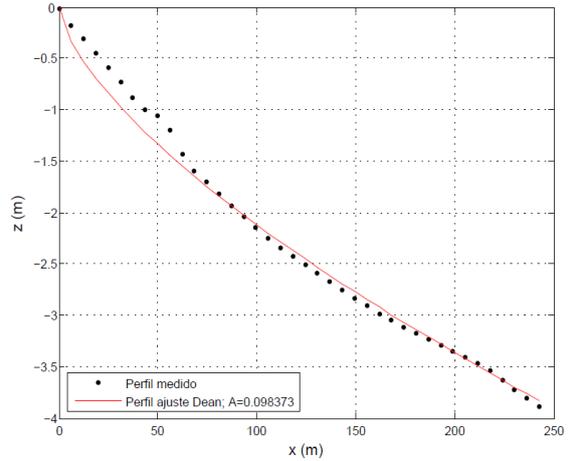
Anexo 1

As figuras a seguir contêm os perfis medidos com o auxílio de ferramentas do SMC-Brasil e os perfis ajustados de acordo com o modelo de perfil de equilíbrio proposto por Dean (1977)

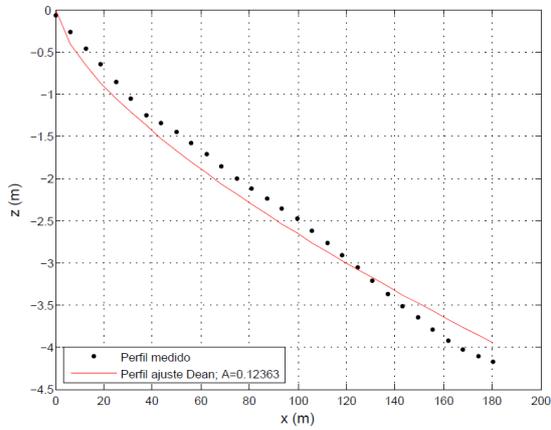
Perfil 1



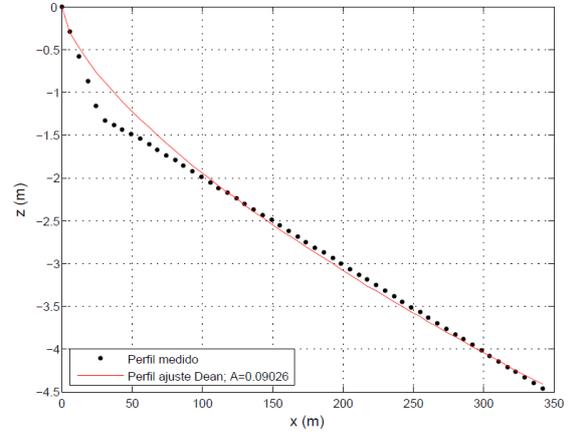
Perfil 2



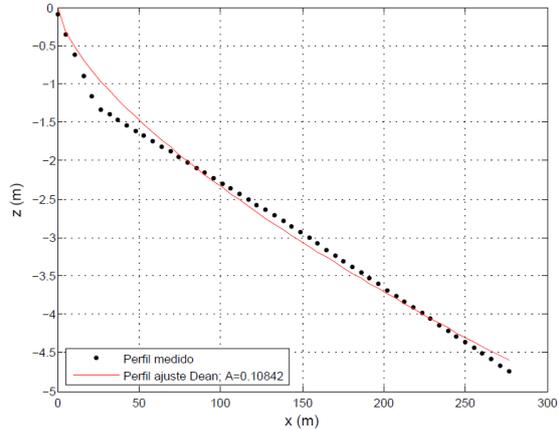
Perfil 3



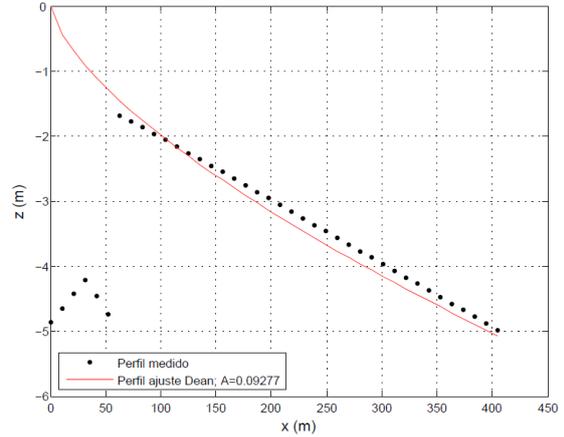
Perfil 4



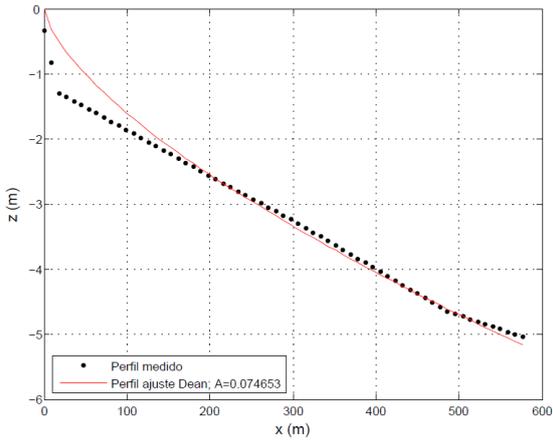
Perfil 5



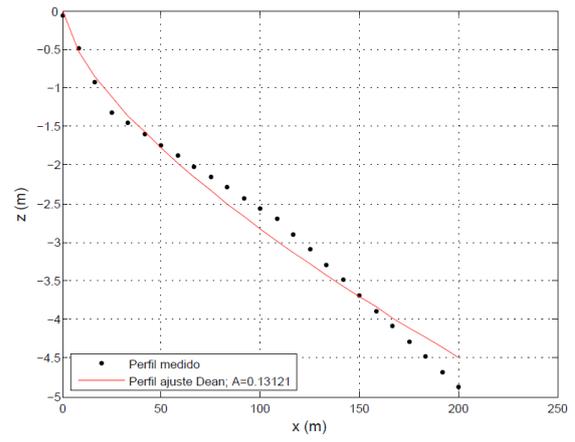
Perfil 6



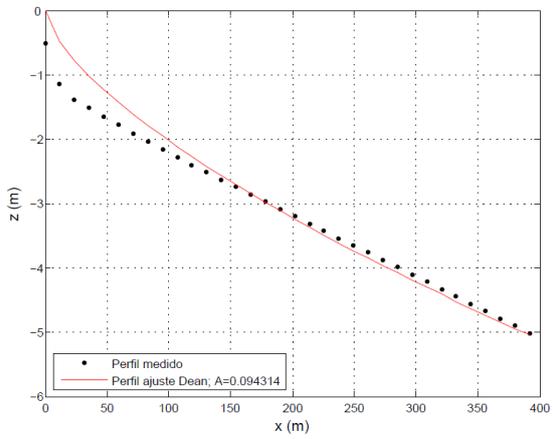
Perfil 7



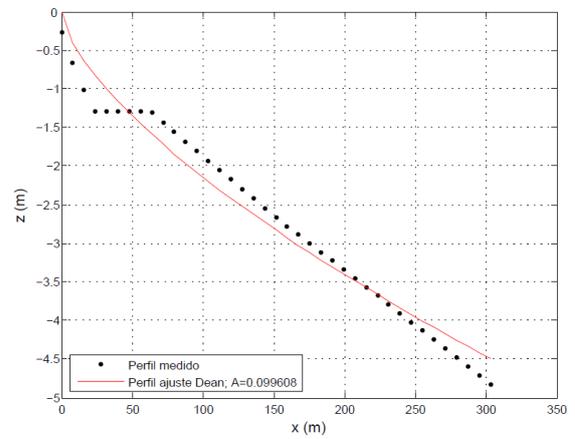
Perfil 8



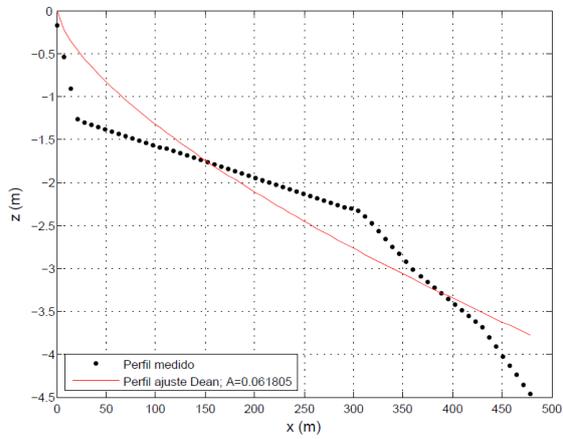
Perfil 9



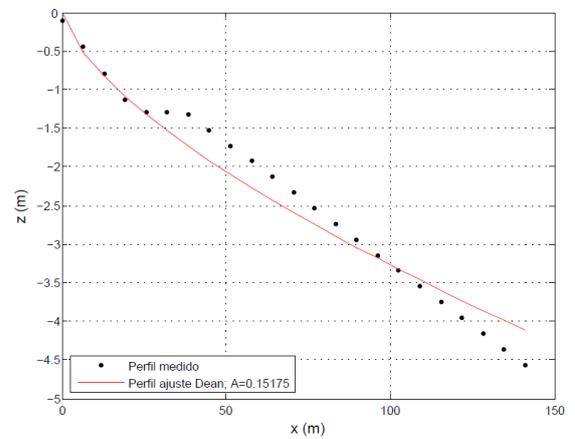
Perfil 10



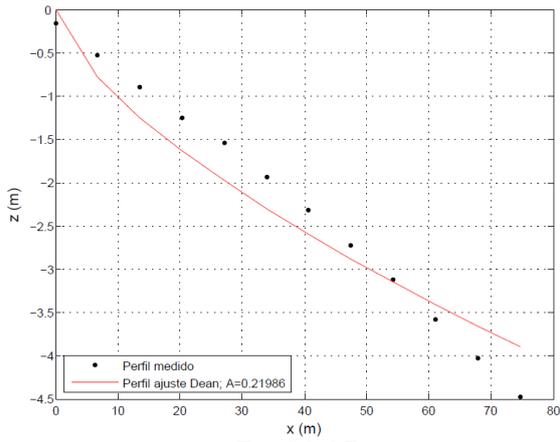
Perfil 11



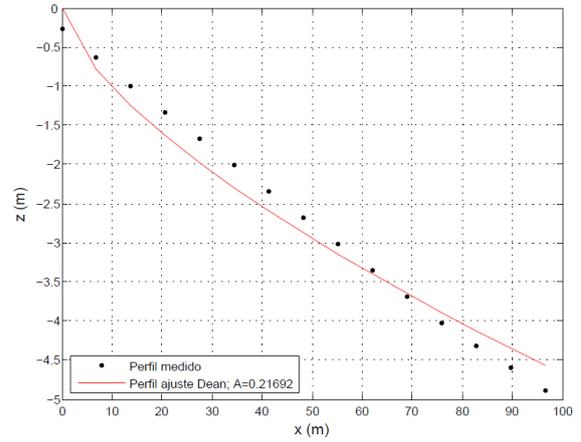
Perfil 12



Perfil 13



Perfil 14



Perfil 15

