



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

**DANIEL DE FREITAS GURGEL**

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ZONA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO – RN, ATRAVÉS DO  
SMC-BRASIL**

**Natal - RN**  
**2017**

**DANIEL DE FREITAS GURGEL**

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ZONA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO – RN, ATRAVÉS DO  
SMC-BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação stricto sensu 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  
**Coorientadora:** Prof. Dra. Maria de Fátima A. de Matos

**Natal - RN  
2017**

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

Gurgel, Daniel de Freitas.

Modelagem do transporte de sedimentos na Zona Costeira da Barreira do Inferno - RN, através do SMC-Brasil / Daniel de Freitas Gurgel. - 2017.

115 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ada Cristina Scudelari.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria de Fátima Alves de Matos.

1. Clima de ondas - Dissertação. 2. Vizinho natural - Dissertação. 3. Krigagem - Dissertação. 4. Métodos interpoladores - Dissertação. I. Scudelari, Ada Cristina. II. Matos, Maria de Fátima Alves de. III. Título.

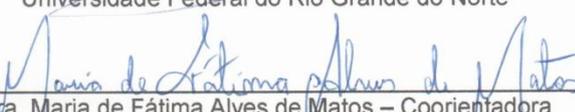
DANIEL DE FREITAS GURGEL

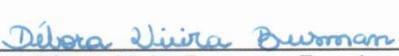
**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ZONA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO – RN, ATRAVÉS DO  
SMC-BRASIL**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
stricto sensu 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**

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Ada Cristina Scudelari - Orientadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Maria de Fátima Alves de Matos – Coorientadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Débora Vieira Busman – Examinadora Interna  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Puhl – Examinador Externo  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Natal, 25 de Agosto de 2017**

## DEDICATÓRIA

Aos meus familiares, à minha noiva Nathália e aos meus amigos, por toda a força e apoio que me dão.

## AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre cuidar de mim, por guiar-me sempre pelos bons caminhos e por me reerguer nos momentos de angústia, tristeza e frustração.

Aos meus pais, Lázaro e Cristina, por sempre acreditarem em mim, por me apoiarem não só emocionalmente, mas trabalhando arduamente todos os dias.

À minha irmã, Déborah, por ter passado por muitos momentos, tristes e felizes, junto comigo. É uma honra ser o seu irmão, talvez você não imagine o quanto você me inspira.

À minha companheira, namorada, noiva e futura esposa, Nathália. Nesses quase 11 anos de relacionamento você foi o meu alicerce, a minha melhor amiga. Já passamos por tantas situações que é impossível comentá-las aqui. Você sabe que foi peça fundamental para que eu chegasse ao término deste trabalho. Obrigado por tudo, de coração.

A todos os meus familiares, por terem me servido como bons exemplos a serem seguidos e por torcerem por mim sempre.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Ada Cristina Scudelari, por, além de ter me orientado de forma magnífica, ter sido compreensiva nas dificuldades e lentidões que apresentei por várias vezes.

À professora Maria de Fátima, que sempre se mostra com uma disposição impressionante para ajudar em qualquer dificuldade. Sua vontade de pesquisar é admirável. Talvez você não saiba, mas eu lhe tenho como parâmetro de o que é ser um grande pesquisador.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Venerando Eustáquio Amaro, por ter me proporcionado uma visita de campo na área da Praia da Barreira do Inferno no início do mestrado. Esse fato foi crucial para um maior entendimento da área a ser estudada.

Aos amigos feitos ao longo de toda a minha vida, em especial Daniel dos Anjos, pelo companheirismo, por gostarem de mim como sou e por estarem presentes até mesmo nos momentos difíceis da vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado que possibilitou a realização desse trabalho com dedicação exclusiva.

Ao Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, pela liberação do acesso e estudo da área para a realização dessa pesquisa.

À Lívia, que, sem me conhecer e sem ter a obrigação, encontrou espaços em sua agenda para me passar sua experiência com o SMC-Brasil. O seu altruísmo é admirável e serei eternamente grato pelo que você fez por mim.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, por todo apoio e orientação ao longo desses dois anos.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e por aceitarem participar da construção deste trabalho. Agradeço por todas as contribuições dadas por vocês.

A todos que, por ventura, não estão contemplados nos agradecimentos anteriores, mas que sabem que participaram de forma positiva na minha vida.

## EPÍGRAFE

“Quando o retiraram da cova, viram que ele não tinha nenhum arranhão, porque tinha posto sua confiança em Deus” (Daniel 6:24).

## RESUMO

O estado do Rio Grande Norte vem apresentando eventos de erosão costeira ao longo de sua costa, em diversos graus de intensidade. Os trechos afetados pela erosão costeira tem esse fenômeno atribuído principalmente ao reduzido aporte fluvial de sedimentos, decorrentes das pequenas dimensões das bacias fluviais regionais e da perda de sedimentos para o continente com a formação dos campos dunares. O conhecimento do clima de ondas, bem como a taxa de transporte de sedimentos presentes na área, é fator preponderante nos estudos de erosão costeira. Este trabalho teve como área de estudo a praia da Barreira do Inferno. Os objetivos consistiram, com o uso da ferramenta de modelagem costeira SMC-Brasil, (i) conhecer o clima de ondas ao largo da praia da Barreira do Inferno por meio da análise dos dados fornecidos pelos pontos de propagação contidos na base de dados do SMC; (ii) realizar análise da dinâmica sedimentar da praia por meio da modelagem de transporte longitudinal de sedimentos; (iii) Identificar a sensibilidade do SMC-Brasil diante da inserção de carta náutica interpolada pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem. Dentre os resultados, destaca-se que o clima de onda do entorno da praia da Barreira do Inferno mostrou uma maior tendência de ondas vindas das direções E e ESE. O transporte longitudinal de sedimentos anual é da ordem de, aproximadamente,  $50.000\text{m}^3/\text{ano}$  no sentido Sul-Norte. As diferenças apresentadas pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem, no cálculo do transporte de sedimento, se mostraram negligenciáveis. Portanto, o modelo utilizado mostrou baixa sensibilidade aos métodos interpoladores no cálculo do transporte de sedimento.

**Palavras Chaves:** Clima de ondas; Vizinho Natural; Krigagem; Métodos Interpoladores.

## ABSTRACT

The state of Rio Grande do Norte/Brazil has been presenting coastal erosion events along its coast, in varying degrees of intensity. The stretches affected by coastal erosion are attributed mainly to the reduced fluvial contribution of sediments, due to the small size of the regional fluvial basins and the loss of sediments to the continent with the formation of dune fields. The knowledge of the wave climate, as well as sediment transport rate of an area, is a preponderant factor in studies of coastal erosion. This work had as study area the *Barreira do Inferno* beach. The objectives were to use the coastal modeling tool *SMC-Brasil* (i) to know the wave climate off the *Barreira do Inferno* beach by analyzing the data provided by the propagation points contained in the *SMC-Brasil* 60 years database; (ii) to perform analysis of the sedimentary dynamics of the beach through the longitudinal sediment transport model; (iii) to identify the sensitivity of the *SMC-Brasil* to the insertion of a nautical chart interpolated by the Natural Neighbor and Kriging methods. Among the results, it should be noted that the wave climate around the *Barreira do Inferno* beach showed a greater tendency of waves coming from the E and ESE directions. The annual longitudinal sediment transport is approximately 50,000 m<sup>3</sup>/year in the South-North direction. The differences presented by the Natural Neighbor and Kriging methods, in the sediment transport calculation, were negligible. Therefore, the model showed low sensitivity to the interpolation methods used in the sediment transport calculation.

**Keywords:** Wave climate; Natural Neighbor; Kriging; Interpolation Methods.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b>	Mapa de localização.....	25
<b>Figura 2.2</b>	Temperatura média ao longo do ano de 2016.).....	27
<b>Figura 2.3</b>	Precipitação ao longo do ano de 2016.....	27
<b>Figura 2.4</b>	Umidade relativa ao longo do ano de 2016.....	28
<b>Figura 2.5</b>	Direção do vento ao longo do ano de 2016.....	28
<b>Figura 2.6</b>	Velocidade do vento ao longo do ano de 2016.....	29
<b>Figura 2.7</b>	Mapa de Declividade da Barreira do Inferno.....	31
<b>Figura 2.8</b>	Digital de Elevação.....	32
<b>Figura 2.9</b>	Mapa Geológico simplificado da região da Barreira do Inferno.....	33
<b>Figura 2.10</b>	Mapa Geomorfológico simplificado da região da Barreira do Inferno.....	34
<b>Figura 2.11</b>	Recorte da carta náutica 22100 contendo a região da praia da Barreira do Inferno.....	35
<b>Figura 3.1</b>	Fluxograma dos procedimentos realizados com o auxílio do SMC - Brasil.....	38
<b>Figura 3.2</b>	Estrutura Global do SMC Brasil.....	40
<b>Figura 3.3</b>	Pontos DOW selecionados dentro interface SMC Tools.....	44
<b>Figura 3.4</b>	Perfis traçados para comparação dos métodos interpoladores.....	47
<b>Figura 3.5</b>	Comparação de perfis batimétricos e modelo de ajuste linear, extraídos dos MDE gerados por interpoladores, em zona submersa, Perfil 1.....	48
<b>Figura 3.6</b>	Comparação de perfis batimétricos e modelo de ajuste linear, extraídos dos MDE gerados por interpoladores, em zona submersa, Perfil 2.....	48
<b>Figura 3.7</b>	Medida estatística de erro, raiz do erro médio quadrático, RMSE.....	49
<b>Figura 3.8</b>	Batimetria em 3D da praia da Barreira do Inferno Interpolada pelo método da Krigagem (100m x 100m).....	51
<b>Figura 3.9</b>	Batimetria em 3D da praia da Barreira do Inferno Interpolada pelo método Vizinheiro Natural (100m x 100m).....	51
<b>Figura 3.10</b>	Carta Imagem – Imagem de satélite tratada com filtro direcional de Sul para Norte realçando o leito da praia da Barreira do Inferno.....	52
<b>Figura 3.11</b>	Esquematização dos casos de mar gerados para cada um dos métodos interpoladores.....	53
<b>Figura 3.12</b>	Perfis traçados até a profundidade de fechamento média adotada de 5m.....	57
<b>Figura 4.1</b>	Probabilidade de Direção dos pontos DOW analisados.....	61
<b>Figura 4.2</b>	a). Período de pico médio ( $T_{p50\%}$ ). b). Período de pico para condições extremas ( $T_{p12}$ ).....	62
<b>Figura 4.3</b>	a). Altura significativa média ( $H_{s50\%}$ ). b) Altura significativa para condições extremas ( $H_{s12}$ ).....	62
<b>Figura 4.4</b>	Relação entre a altura significativa em condições regulares do ponto 6 com a média das alturas significativas de todos os pontos analisados.....	64

<b>Figura 4.5</b> Relação entre a altura significativa em condições extremas do ponto 6 com a média das alturas significativas em condições extremas de todos os pontos analisados. ....	65
<b>Figura 4.6</b> Roseta de direções de onda do ponto P6 (média anual).....	66
<b>Figura 4.7</b> Série temporal de Hs de 1949 até 2009. ....	67
<b>Figura 4.8</b> Função de distribuição de Hs. ....	68
<b>Figura 4.9</b> Histograma de altura significativa (Hs). ....	68
<b>Figura 4.10</b> Função de distribuição de período de pico (Tp). ....	68
<b>Figura 4.11</b> Histograma de Tp .....	68
<b>Figura 4.12</b> Distribuição Conjunta Hs-Tp.....	69
<b>Figura 4.13</b> Distribuição conjunta Hs-Direção. ....	69
<b>Figura 4.14</b> Hs isolinhas caso 1.....	71
<b>Figura 4.15</b> Hs e topografia caso 1.....	71
<b>Figura 4.16</b> Hs isolinhas caso 2.....	72
<b>Figura 4.17</b> Hs topografia caso 2.....	72
<b>Figura 4.18</b> Hs isolinhas caso 3.....	73
<b>Figura 4.19</b> Hs topografia caso 3.....	73
<b>Figura 4.20</b> Hs isolinhas caso 4.....	74
<b>Figura 4.21</b> Hs topografia caso 4.....	74
<b>Figura 4.22</b> Hs isolinhas caso 5.....	75
<b>Figura 4.23</b> Hs topografia caso 5.....	75
<b>Figura 4.24</b> Hs isolinhas caso 6.....	76
<b>Figura 4.25</b> Hs topografia caso 6.....	76
<b>Figura 4.26</b> Hs isolinhas caso 7.....	77
<b>Figura 4.27</b> Hs topografia caso 7.....	77
<b>Figura 4.28</b> Hs isolinhas caso 8.....	78
<b>Figura 4.29</b> Hs topografia caso 8.....	78
<b>Figura 4.30</b> Hs isolinhas caso 1.....	79
<b>Figura 4.31</b> Hs topografia caso 1.....	79
<b>Figura 4.32</b> Hs isolinhas caso 2.....	80
<b>Figura 4.33</b> Hs topografia caso 2.....	80
<b>Figura 4.34</b> Hs isolinhas caso 3.....	81
<b>Figura 4.35</b> Hs topografia caso 3.....	81
<b>Figura 4.36</b> Hs isolinhas caso 4.....	82
<b>Figura 4.37</b> Hs topografia caso 4.....	82
<b>Figura 4.38</b> Hs isolinhas caso 5.....	83
<b>Figura 4.39</b> Hs topografia caso 5.....	83
<b>Figura 4.40</b> Hs isolinhas caso 6.....	84
<b>Figura 4.41</b> Hs topografia caso 6.....	84
<b>Figura 4.42</b> Hs isolinhas caso 7.....	85
<b>Figura 4.43</b> Hs topografia caso 7.....	85
<b>Figura 4.44</b> Hs isolinhas caso 8.....	86
<b>Figura 4.45</b> Hs topografia caso 8.....	86
<b>Figura 4.46</b> Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 2) – Vizinho Natural .....	89
<b>Figura 4.47</b> Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 3) – Vizinho Natural .....	89

<b>Figura 4.48</b>	Correntes em condições médias de preamar – Direção ESE (caso 6) – Vizinho Natural .....	90
<b>Figura 4.49</b>	Correntes em condições de tempestade de baixamar – Direção ESE (caso 7) – Vizinho Natural.....	90
<b>Figura 4.50</b>	Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 2) – Krigagem .....	91
<b>Figura 4.51</b>	Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 3) – Krigagem .....	91
<b>Figura 4.52</b>	Correntes em condições médias de preamar–Direção ESE (caso6) – Krigagem .....	92
<b>Figura 4.53</b>	Correntes em condições de tempestade de baixamar– Direção ESE (caso 7) – Krigagem.....	92
<b>Figura 4.54</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio anual – Vizinho Natural. ....	99
<b>Figura 4.55</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Julho, Junho e Agosto – Vizinho Natural.....	99
<b>Figura 4.56</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro – Vizinho Natural.....	100
<b>Figura 4.57</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio anual – Krigagem.....	100
<b>Figura 4.58</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Julho, Junho e Agosto – Krigagem.....	101
<b>Figura 4.59</b>	Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro – Krigagem.....	101

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	Intervalos das Zonas Costeiras de acordo com a relação entre a altura (h) e o comprimento de onda (L) definidos pelo SMC-Brasil. ....	42
<b>Tabela 3.2</b>	Coordenadas dos pontos DOW; profundidade Z(m); profundidade média Zmédio(m). ....	45
<b>Tabela 3.3</b>	Profundidade média de todos os pontos selecionados (m); Desvio padrão $\sigma$ (m).....	45
<b>Tabela 3.4</b>	Estatísticas das discrepâncias das isóbatas obtidas nos métodos interpoladores. ....	50
<b>Tabela 3.5</b>	Parâmetros de onda utilizados como dados de entrada para as propagações.....	54
<b>Tabela 4.1</b>	Probabilidade de direção, período de pico e altura significativa fornecidas pelo ponto 6.....	66
<b>Tabela 4.2</b>	Transporte Médio Anual de Sedimentos obtido para cada perfil por meio da formulação de Bayram (2007) – Vizinho Natural.....	95
<b>Tabela 4.3</b>	Transporte Médio Anual de Sedimentos obtido para cada perfil por meio da formulação de Bayram (2007) – Krigagem. ....	95
<b>Tabela 4.4</b>	Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) – Vizinho Natural. ....	96
<b>Tabela 4.5</b>	Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) - Krigagem.....	97
<b>Tabela 4.6</b>	Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) – Vizinho Natural. ....	97
<b>Tabela 4.7</b>	Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) - Krigagem.....	98

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>2. ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>24</b>
<b>2.1. Apresentação</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2. Caracterização do Clima e Ventos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3. Geologia e Geomorfologia</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4. Batimetria</b> .....	<b>35</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1. Sistema de Modelagem</b> .....	<b>39</b>
3.1.1. Algumas aplicações do SMC-Brasil .....	41
<b>3.2. Análise do Clima De Ondas</b> .....	<b>42</b>
3.2.1. Seleção Dos Pontos De Propagação .....	43
<b>3.3. Batimetria</b> .....	<b>45</b>
3.3.1. Análises Geoestatísticas dos Métodos Interpoladores .....	47
3.3.2. Avaliação Estatística de Acurácia dos Métodos Interpoladores ....	49
3.3.3. Análise das topografias geradas a partir dos métodos interpoladores.....	50
<b>3.4. Propagação de Ondas</b> .....	<b>53</b>
<b>3.5. Correntes</b> .....	<b>55</b>
<b>3.6. Transporte Longitudinal de Sedimentos</b> .....	<b>56</b>
3.6.1. Formulação de Bayram .....	58
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1. Clima de Ondas</b> .....	<b>61</b>
4.1.1. Direção Incidente .....	62
4.1.2. Ponto de Propagação.....	63
<b>4.2. Propagação de Ondas</b> .....	<b>70</b>
4.2.1. Análise da Propagação de Ondas.....	87
<b>4.3. Correntes</b> .....	<b>87</b>
4.3.1. Análise das Correntes .....	93
<b>4.4. Transporte Longitudinal de Sedimentos</b> .....	<b>94</b>
4.4.1. Transporte Longitudinal de Sedimentos – Comparação entre Krigagem e Vizinho Natural.....	102
4.4.2. Transporte Longitudinal Médio Anual.....	103
4.4.3. Transporte Longitudinal Médio Sazonal .....	104

<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>106</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>109</b>

# **INTRODUÇÃO**

## **Capítulo 1**

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado do Rio Grande Norte vem apresentando eventos de erosão costeira caracterizados ao longo de sua costa, em diversos graus de intensidade (VITAL *et al.*, 2008; VITAL, 2003; VITAL *et al.*, 2006). Os trechos afetados pela erosão costeira tem esse fenômeno atribuído principalmente à ação das ondas atrelada ao reduzido aporte fluvial de sedimentos, decorrentes das pequenas dimensões das bacias fluviais regionais e da perda de sedimentos para o continente com a formação dos campos dunares (DOMINGUEZ *et al.*, 2006).

Dentro desse contexto, destaque pode ser dado à ocorrência de erosão nas regiões de falésias, que são taludes íngremes sujeitos principalmente à ação marinha, responsável por desencadear processos erosivos costeiros, conforme apresentado em diversos trabalhos, (AMARAL, 2001; SILVA, 2003; SEVERO, 2005; NASCIMENTO, 2009; SOUZA JUNIOR, 2013; RIBEIRO, 2015; E CÂMARA *et al.*, 2017).

Na região próxima a Natal, numa região militarmente protegida e de preservação ambiental, encontra-se um conjunto de Falésias vivas denominadas de Barreira do Inferno, indexadas ao Centro de Lançamentos Barreira do Inferno (CLBI), do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA do governo Brasileiro, e onde vem sendo desenvolvido o projeto Estudo Ambiental e Monitoramento de Mudanças Morfológicas Costeiras nas Falésias do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno – CLBI, RN, vinculado ao Acordo de Cooperação firmado entre o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Segundo Câmara *et al.* (2017), nessa região, entre 1986 e 2004, foi identificado um significativo recuo da borda da falésia da ordem de 6.700 m<sup>2</sup> de área recuada em toda sua extensão.

A estabilidade de falésias pode ser influenciada por processos marítimos e continentais, sendo os principais: erosão marítima, provocando incisões na base das mesmas; e precipitação pluviométrica, que pode causar movimentos de massa por perda de resistência devido ao aumento do grau de saturação. De acordo com Brossard e Duperret (2004), a estabilidade das falésias

depende também de propriedades intrínsecas como suas características estruturais, mecânicas e hidráulicas.

Quanto à erosão marítima, são vários os fatores que podem desencadear os processos erosivos atuantes sobre os ambientes costeiros, condicionando a evolução da linha de costa. As principais alterações presentes nesse tipo de ambiente são provenientes da interação entre componentes energéticos (vento, correntes e ondas) e materiais (sedimento e água) e podem ser entendidas como um mecanismo de retroalimentação (BIRD, 2008). Conseqüentemente, 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).

Dos trabalhos de Silva (2003), Severo (2005), Nascimento (2009), Junior (2013), Ribeiro (2015), e Câmara *et al.* (2017), observa-se que, no litoral do Rio Grande do Norte, o desmonte das falésias vivas são muitas vezes ocasionados por incisões basais causadas por erosão marítima. É válido destacar que a erosão basal consiste na destruição mecânica e/ou remoção de partículas de solo do “pé” das falésias costeiras, através principalmente da ação das ondas.

Sendo assim, a intensidade da erosão basal marítima é um fator que exerce influência importante, visto que em regiões onde ocorrem taxas médias de erosão basal predominam deslizamentos de terra, enquanto que em falésias submetidas à ação marítima forte, surgem rupturas profundas (BARBOSA, 2017).

O conhecimento do clima de ondas, bem como a taxa de transporte de sedimentos presentes na área, é fator preponderante nesses estudos. Uma forma de se determinar o clima de ondas e a taxa de transporte de sedimentos é através do uso de simulação computacional, estratégia esta já bem consolidada frente à comunidade científica em vários estudos.

Uma das tendências brasileiras, quanto à utilização de simulação computacional nessa área, vem sendo o uso da ferramenta de modelagem Sistema de Modelagem Costeira - Brasil (SMC-BRASIL), (LUCA, 2011; ALMEIDA, 2013; GOMES, 2014; ARAÚJO, 2015; SOUZA RIBEIRO *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Este sistema integra um conjunto de ferramentas que inclui metodologias, base de dados de dinâmica marinha (ondas, nível do mar, batimetria e linha de costa) e modelos numéricos, os quais permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que ocorrem no litoral como consequência de eventos naturais e/ou de atuações antrópicas na costa a longo prazo (MMA, 2011)

Importa ressaltar que o SMC-Brasil foi desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH-Cantabria) e transferido ao Brasil, em 2009, através do estabelecimento de um projeto de colaboração internacional entre a Agência de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria do Patrimônio da União (SPU), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e o IH-Cantabria, intitulado “*Transferencia de metodologías y herramientas de apoyo a la gestión del litoral brasileño*”. Nesse projeto, foi firmado um Acordo de Cooperação Técnica, com ação conjunta entre Ministério do Meio Ambiente (MMA), Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA) e Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com o objetivo de implementar o “Estudo de Caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileiro (SMC-Brasil) no Rio Grande do Norte” (ALMEIDA *et al.*, 2013).

Portanto, na perspectiva de contribuir com os trabalhos de Araújo (2015), Barbosa (2017), Oliveira (2017), Almeida Júnior (2017) e Taquez (2017) quanto à compreensão dos processos erosivos na costa, complementando, também, o conhecimento desenvolvido no projeto “Estudo Ambiental e Monitoramento de Mudanças Morfológicas Costeiras nas Falésias do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno – CLBI/RN”, este trabalho tem como objetivos: (i) conhecer o clima de ondas ao largo da praia da Barreira do Inferno por meio da análise dos dados fornecidos pelos pontos de propagação contidos na base de dados do SMC; (ii) realizar análise da dinâmica sedimentar da praia por meio da modelagem de transporte longitudinal de sedimentos; (iii) Identificar a sensibilidade do SMC-Brasil diante da inserção de carta náutica interpolada pelos métodos Vizinheiro Natural e Krigagem.

Para se atingir esses objetivos, este trabalho está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 2 apresenta as características gerais da área estudada, o Capítulo 3 apresenta o SMC-Brasil com breve apanhado de suas aplicações, em seguida é descrito procedimentos de análise do clima de ondas, definição da batimetria, propagação das ondas, modelagem das correntes e cálculo do transporte longitudinal de sedimentos. O Capítulo 4 trata dos resultados e discussão sobre o clima de ondas, propagação de ondas, modelagem das correntes, e do cálculo do transporte longitudinal de sedimentos. Ao final, o Capítulo 5 consiste nas conclusões deste trabalho e o Capítulo 6 reúne as referências utilizadas.

# **ÁREA DE ESTUDO**

## **Capítulo 2**

## 2. ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo, é apresentada uma descrição geral da zona costeira frontal da praia da Barreira do Inferno, sua localização, clima, agentes costeiros (ventos, ondas, correntes e marés), geologia e geomorfologia.

### 2.1. Apresentação

Considerando que este trabalho se insere no âmbito do Projeto Estudo Ambiental e Monitoramento de Mudanças Morfológicas Costeiras nas Falésias do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno – CLBI/RN, vinculado ao Acordo de Cooperação firmado entre o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a área de estudo está situada na porção oriental do estado do Rio Grande do Norte (figura 2.1), e engloba os trechos do litoral de dois municípios: Natal e Parnamirim, mais precisamente a zona marítima adjacente ao CBLI. A área têm cerca de 24 km<sup>2</sup> com uma extensão da LC de aproximadamente 11 km, e é caracterizada por praias arenosas, precedidas por uma extensa faixa de falésia da Formação Barreiras e linhas de *beachrocks* frontais a zona da Barreira do Inferno.

Segundo Vital *et al.* (2008), as variações do nível do mar nessa região caracterizam marés do tipo semi-diurnas, com a variação média das marés de sizígia de aproximadamente 2,20m e das marés de quadratura de aproximadamente 1,3m.

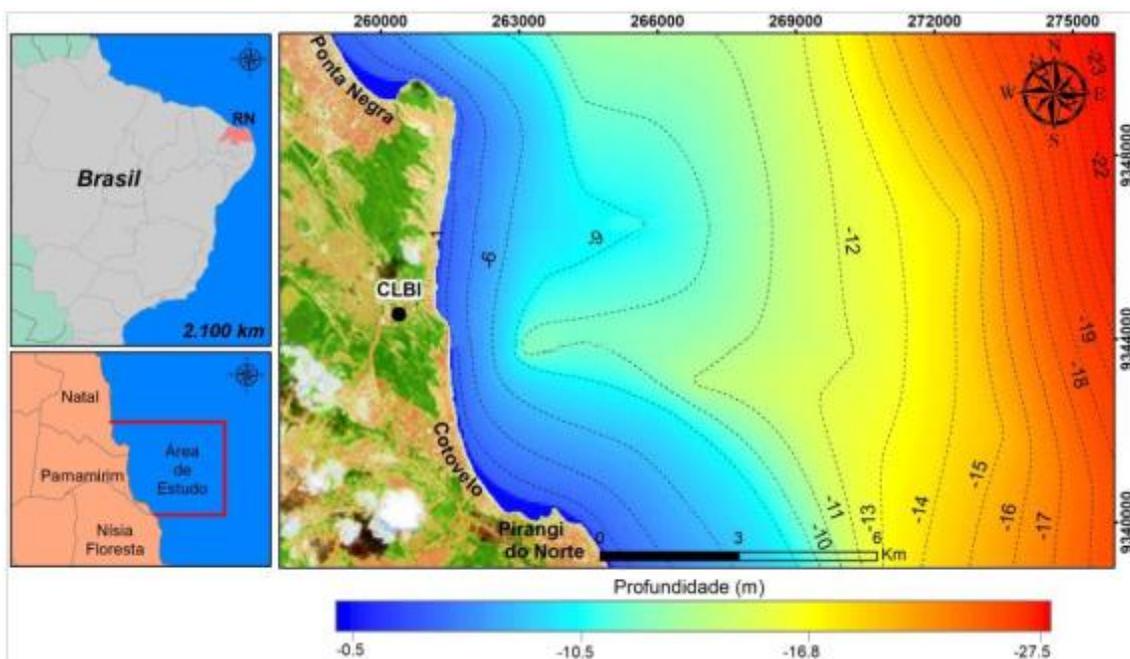


Figura 2.1 Mapa de localização da área de estudo.

## 2.2. Caracterização do Clima e Ventos

Segundo os autores do Atlas – Rio Grande do Norte – Estudo Geo-Histórico e Cultural, nos anos em que as chuvas precipitam com regularidade, como é o caso dos anos de 2006 e 2010 e levando-se em consideração entre os diversos fatores climáticos, apenas as médias anuais de precipitações e as isoietas por estas determinadas, o território do Rio Grande do Norte pode ser dividido em cinco tipos climáticos: Clima Úmido, Sub-Úmido, Sub-Úmido Seco, Semi-Árido e Semi-Árido Intenso. (SEPLAN, 2014). Para a área de estudo, localizada no litoral do Município de Pamamirim, o clima é caracterizado como úmido e sub-úmido, equivalente ao clima tropical chuvoso na classificação de Köppen (SEPLAN, 2014).

A estação meteorológica para coleta de dados de vento mais próxima da Barreira do Inferno é a estação automática A304, que está localizada na cidade de Natal, na latitude  $-5.837187^{\circ}$  e na longitude  $-35.207921^{\circ}$ , e é de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Embora sejam de uma cidade vizinha, os dados da estação A304 podem ser utilizados para fins de caracterização da área da Barreira do Inferno, uma vez que esta região

está a menos de 12km de distância da estação A304 e, portanto, está inserida no raio de representatividade da estação A304, que é de 150km.

A temperatura mínima média para a região da Barreira do Inferno é de, aproximadamente, 22°C. Já a temperatura máxima média é de 28°C. A umidade relativa média do ar é de 70%. Os ventos têm uma direção predominante de quadrante sudeste (SE), com velocidade média de 4m/s podendo atingir até um valor máximo médio de 28m/s. Esses valores foram obtidos por meio da análise dos dados da série histórica fornecida pela estação A304, que compreende o período de 1961 até 2016.

As médias anuais pluviométricas situam-se entre 800 mm e 1200 mm para as regiões que se estendem de Parnamirim/Natal a Touros. As chuvas são concentradas no período de Março à Julho, podendo se estenderem até o mês de Agosto (SEPLAM, 2014).

A partir de uma série histórica de 1961 a 2016 da estação climatológica de Natal (INMET, 2016), a precipitação média anual ocorrida foi de 1.671,90 mm. Neste período, a menor precipitação anual ocorreu no ano de 1993, com 849 mm, enquanto que a maior precipitação se deu no ano de 2008, com 2.485,9 mm. O período chuvoso na região estende-se de Março a Agosto, sendo o mês de Junho o mais chuvoso (média de 368,9 mm), e os meses do período de seca em Outubro, Novembro e Dezembro, sendo as menores precipitações registradas no mês de Outubro.

As figuras 2.2 a 2.6 representam, respectivamente, a variação da temperatura média, da precipitação, direção do vento e da velocidade do vento ao longo do ano de 2016 (INMET, 2016).

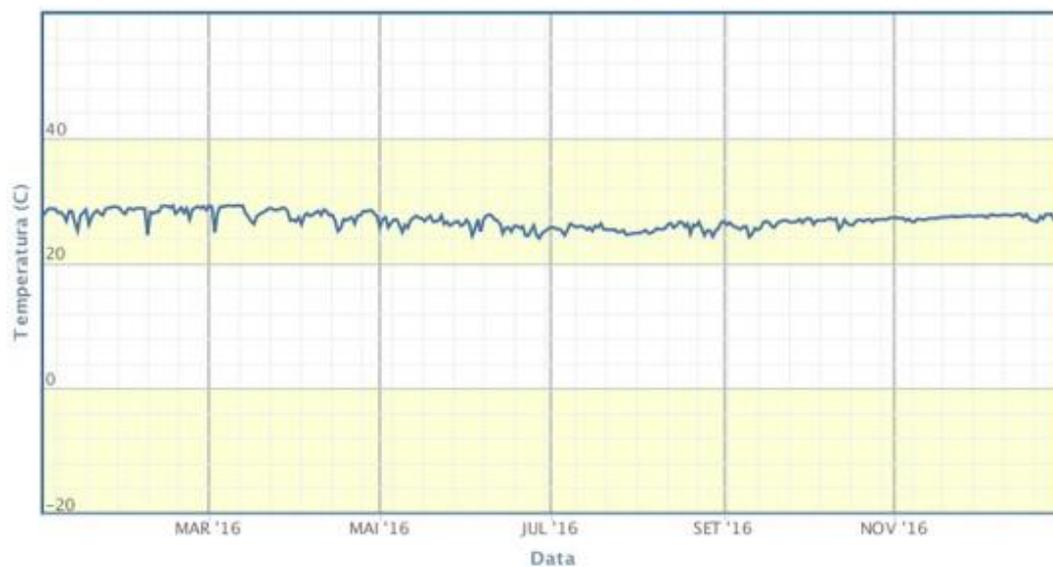


Figura 2.2 Temperatura média ao longo do ano de 2016. (Fonte: Estação A304 - INMET).

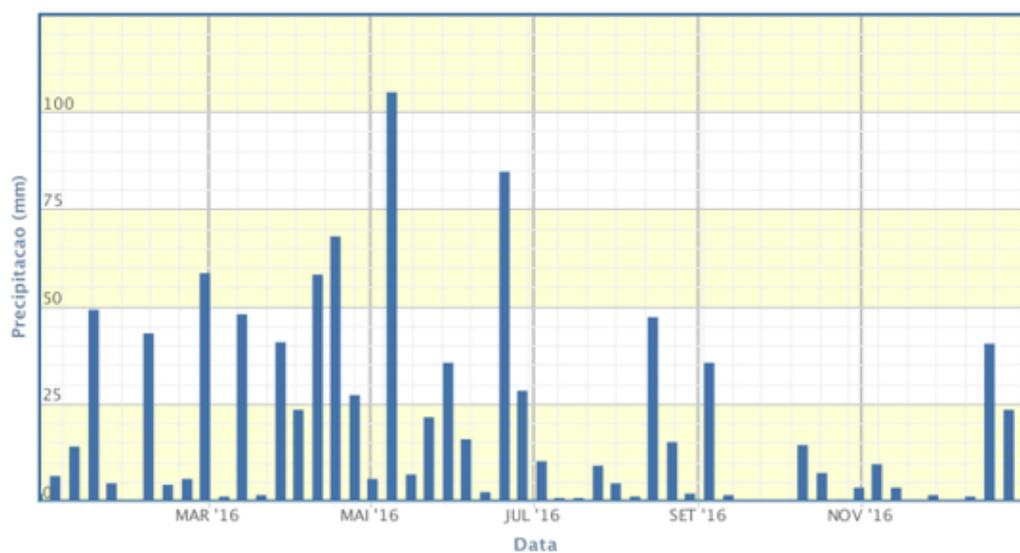


Figura 2.3 Precipitação ao longo do ano de 2016. (Fonte: Estação A304 - INMET).



Figura 2.4 Umidade relativa ao longo do ano de 2016. (Fonte: Estação A304 - INMET).

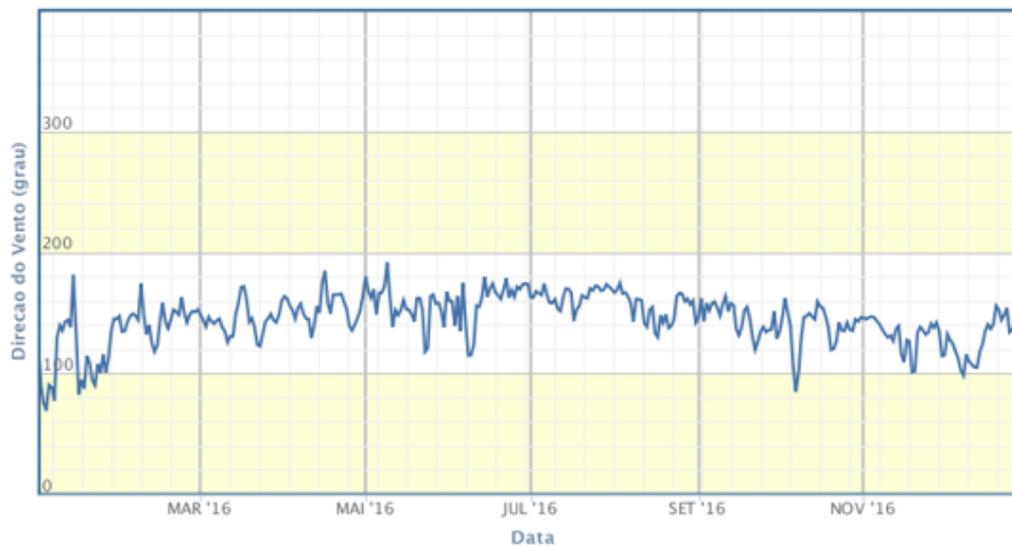


Figura 2.5 Direção do vento ao longo do ano de 2016. (Fonte: Estação A304 - INMET).

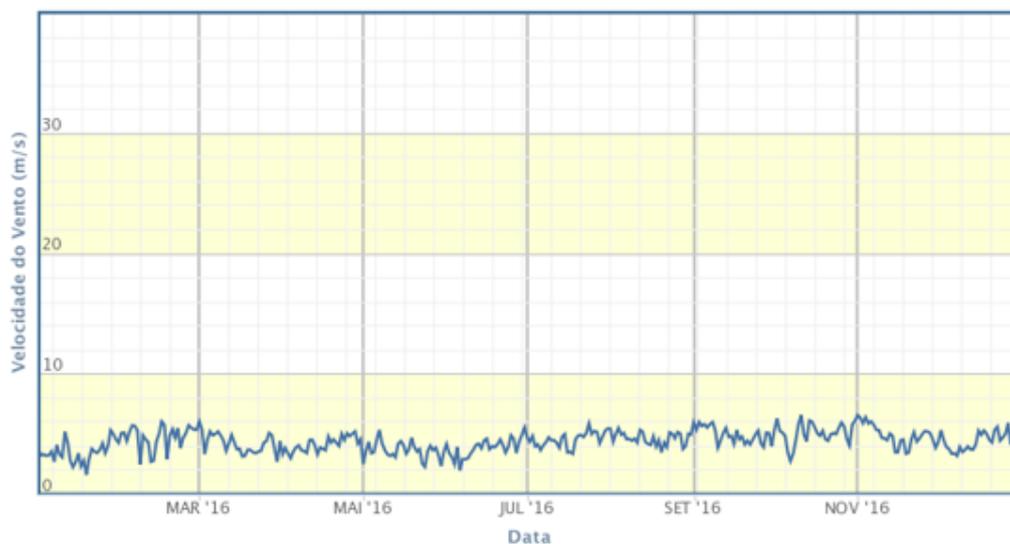


Figura 2.6 Velocidade do vento ao longo do ano de 2016. (Fonte: Estação A304 - INMET).

Os valores explicitados nesses gráficos corroboram com os valores médios obtidos da análise da série histórica da estação automática A304 e, portanto, indicam que, para esses parâmetros, 2016 foi um ano típico.

### 2.3. Geologia e Geomorfologia

Tendo como base visita de campo bem como o auxílio de imagens de satélite e ferramentas de sensoriamento remoto, foi possível identificar, inicialmente, a extensão e forma da área estudada. Com, aproximadamente, 8km de linha de costa, a praia da Barreira do Inferno faz fronteira com a capital Natal (ao Norte) e com a praia de Cotovelo (ao Sul) e apresenta uma morfologia levemente côncava, marcada por um afloramento de mais de 1 quilômetro de falésias da Formação Barreiras aproximadamente no centro da praia.

Os litotipos da Formação Barreiras são freqüentemente interpretados como sistemas deposicionais de leque aluvial e fluvial entrelaçado, em ambiente continental. Tais sistemas são bastante citados na literatura e por vezes associados à presença de clima árido ou semi-árido que controlava as condições deposicionais. Obviamente que as condições climáticas restritas favorecem o desenvolvimento destes sistemas. Entretanto, a presença de microclimas ou mesmo outras condições específicas, que envolvam rios com

baixo gradiente, podem permitir a deposição de sedimentos pelíticos em regiões próximas à linha de costa (ARAÚJO *et al.*, 2006).

Ainda segundo Araújo *et al.* (2006), essa formação é a unidade geológica de maior ocorrência na costa brasileira, aflorando desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá.

Próximo ao afloramento, há a ocorrência de arenitos de praia, formação que, de acordo com Bird (2008), também é encontrada nos litorais do Brasil, Mar Vermelho, Golfo Árabe, África do Sul e Austrália.

Na figura 2.7, encontra-se o mapa de declividade para a região da Barreira do Inferno elaborado por Oliveira (2017). Foi identificado que, na linha costeira, predominam declividades fortes, da ordem de até 45%, principalmente na região central da praia, onde se localiza o afloramento do Grupo Barreiras.

Esses sedimentos quaternários recobrem rochas sedimentares do Grupo Barreiras e rochas sedimentares do período Cretáceo (VITAL *et al.*, 2006).

Na figura 2.8, está representado o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área da Barreira do Inferno. Os trechos de maior declividade coincidem com os trechos de maior cota topográfica. Tais trechos correspondem aos picos das Dunas presentes nessa região e também ao afloramento.

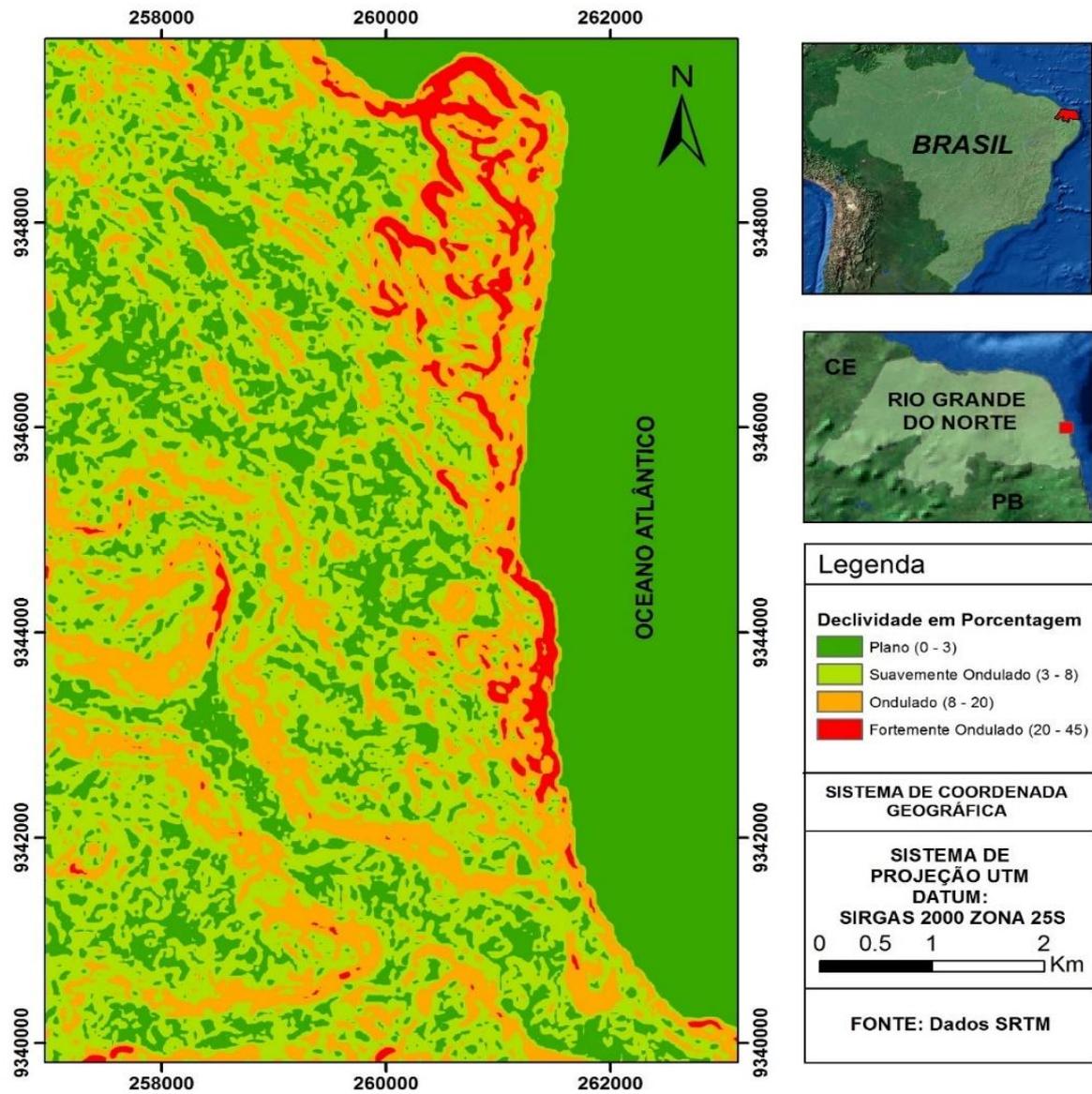


Figura 2.7 Mapa de Declividade da Barreira do Inferno, obtidos de dados da SRTM. Fonte: Oliveira (2017).

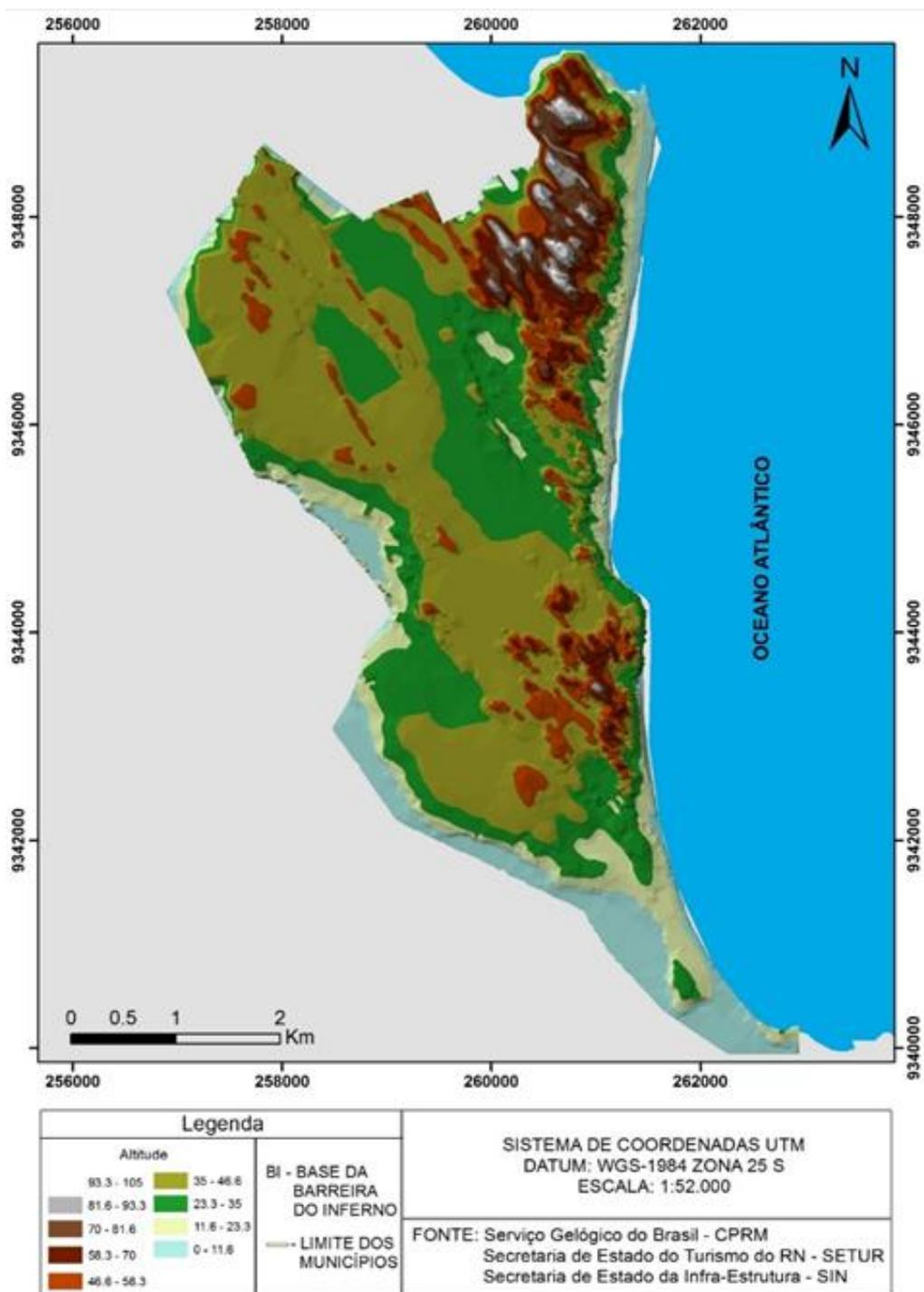


Figura 2.8 Modelo Digital de Elevação. Fonte: Oliveira (2017).

A seguir, na figura 2.9, Oliveira (2017) classificou, em seu mapa geológico, a faixa praial como depósitos eólicos litorâneos não vegetados em quase toda sua extensão. Apenas na região central da praia, por um trecho de, aproximadamente, 1 km, identificou-se a Formação Barreiras.

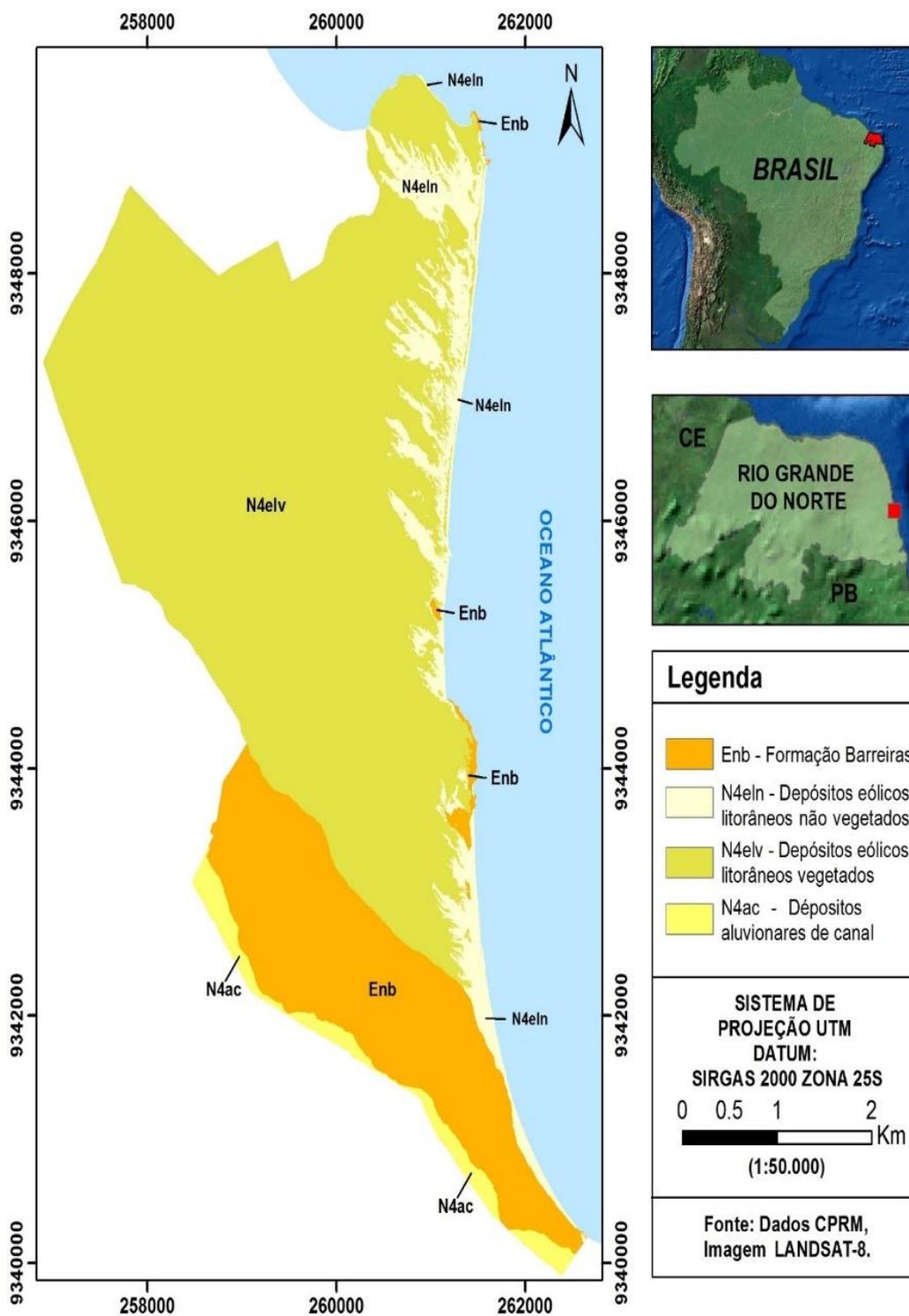


Figura 2.9 Mapa Geológico simplificado da região da Barreira do Inferno. Fonte:Oliveira (2017).

Em termos de geomorfologia, a figura 2.10 apresenta a faixa praial em sua extensão como Dunas Móveis e, para a região central, Tabuleiros Costeiros.

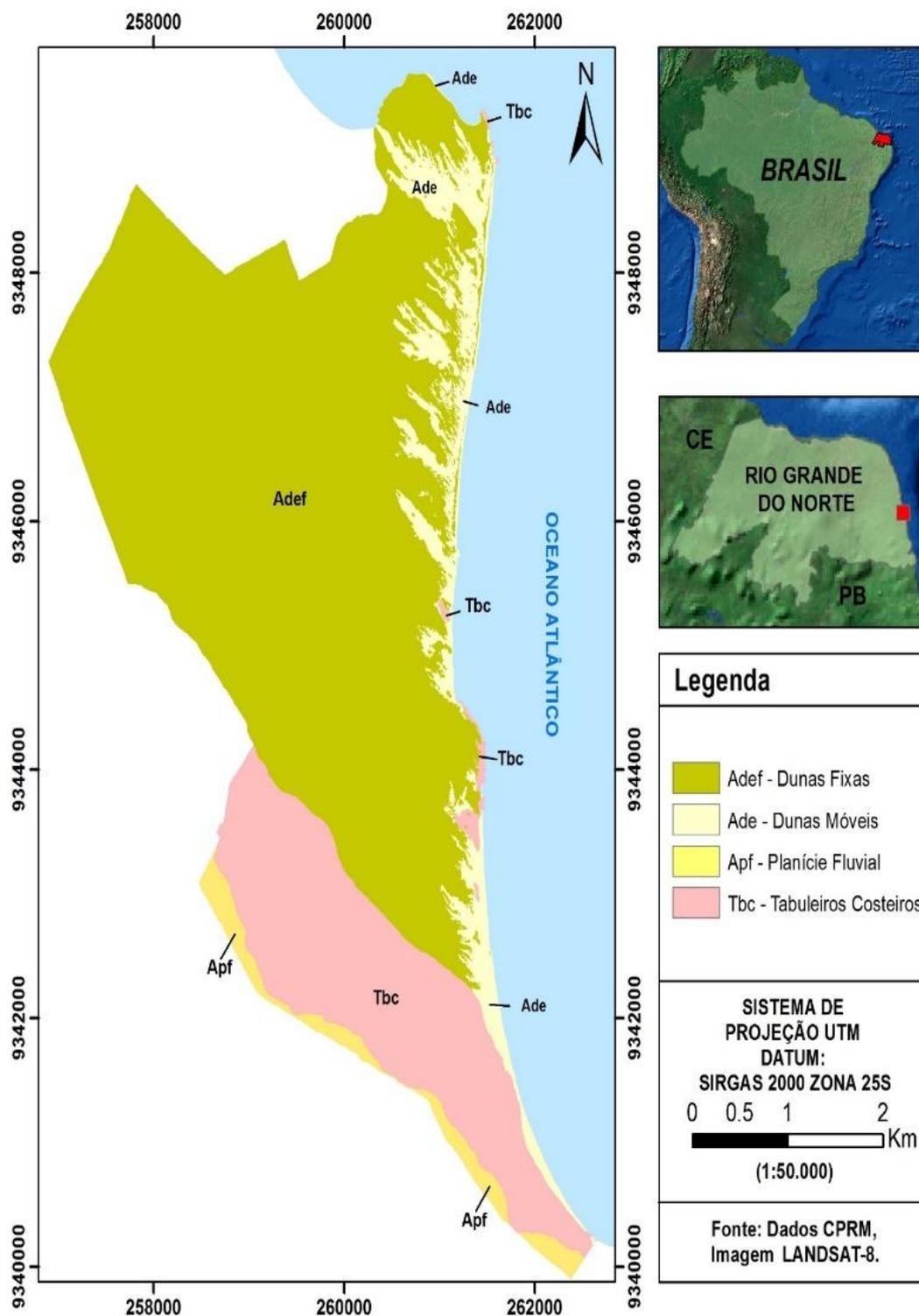


Figura 2.10 Mapa Geomorfológico simplificado da região da Barreira do Inferno. Fonte: Oliveira (2017).

Em resumo, praia da Barreira do Inferno tem, em média, 8 quilômetros de comprimento e pode ser descrita por meio de uma subdivisão em três principais trechos: Norte, Centro e Sul. O trecho Norte é marcado por um

contraste de declividade, sendo esta menos acentuada à medida que se aproxima do trecho central. O trecho central, que chega a ter 1 quilômetro de comprimento, praticamente não apresenta faixa praial, sendo o afloramento do Grupo Barreiras a feição geológica que está em contato direto com o mar. Ainda nesse trecho, destaca-se a maior presença de *arenito de praia* na zona de arrebentação (zona de quebra de ondas). O trecho Sul se inicia com o fim do afloramento e não tem acesso por meio do trecho central, sendo necessário que se atravesse trilhas dentro da área da Barreira do Inferno.

## 2.4. Batimetria

Acerca da batimetria da costa da praia da Barreira do Inferno, os dados batimétricos disponíveis consistem na carta náutica 22100 (CN 22100), disponibilizada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil, (Marinha do Brasil,2015). A Carta Náutica 22100, de escala 1:300000, Datum WGS – 1984, projeção Mercator, compreende todo litoral entre o Cabo Calcanhar, no município de Touros-RN, até Cabedelo, município do estado da Paraíba. A figura 2.11 é um recorte da CN 22100 contemplando a área da Barreira do Inferno.

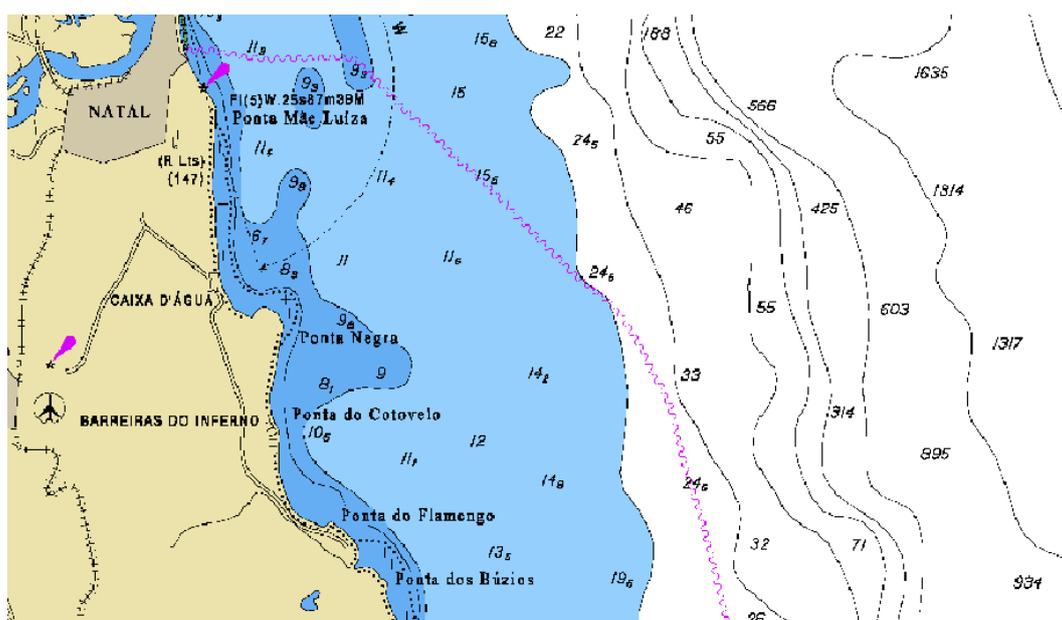


Figura 2.11 Recorte da carta náutica 22100 contendo a região da praia da Barreira do Inferno.

Dessa forma, definiu-se esta carta náutica como base de dados batimétricos para o processo de modelagem da dinâmica sedimentar da praia da Barreira do Inferno.

# **METODOLOGIA**

## **Capítulo 3**

### 3. METODOLOGIA

Visando atender aos objetivos deste trabalho, que consistem em definir o clima de ondas bem como avaliar a influência de batimetrias, obtidas de dois métodos de interpolação espacial, nos padrões da propagação de ondas e correntes e no cálculo do transporte longitudinal de sedimentos, via modelagem numérica através do SMC-Brasil do litoral oriental do Rio Grande do Norte, este trabalho seguiu a metodologia descrita neste capítulo. A figura 3.1 apresenta o fluxograma com a sequência dos procedimentos feitos com o auxílio do SMC-Brasil.

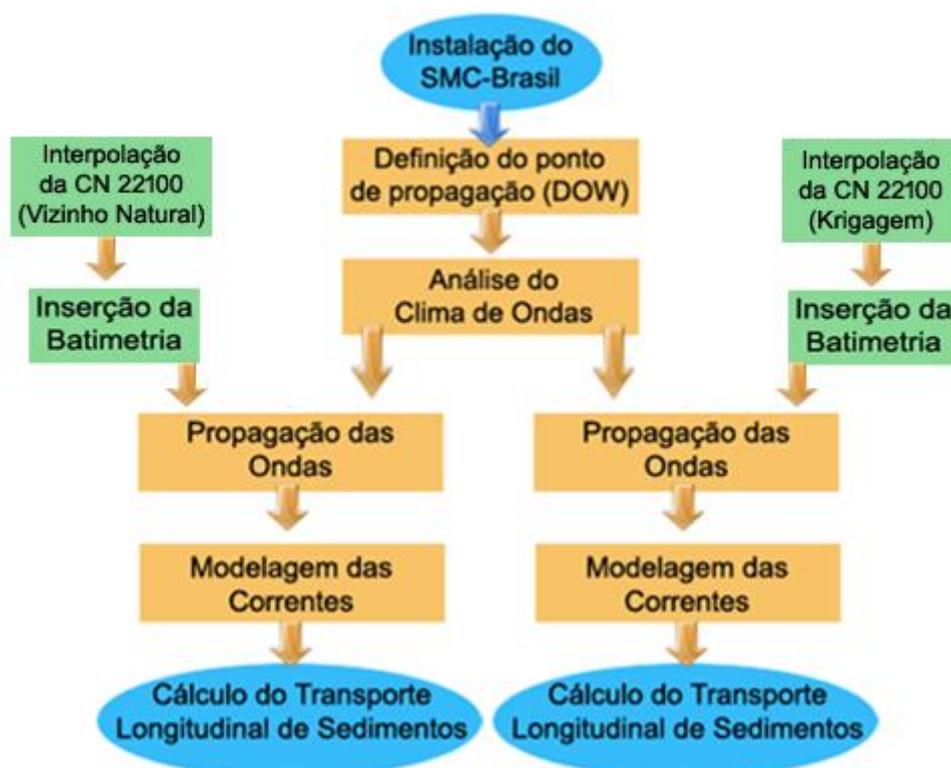


Figura 3.1 Fluxograma dos procedimentos realizados.

Inicialmente, é mostrada uma apresentação breve do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil, o modelo computacional utilizado neste trabalho. Na sequência, define-se os procedimentos realizados para se obter os dados que permitem a análise do clima de ondas ao largo da praia da Barreira do Inferno, propagação das ondas, modelagem das correntes e o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos. Esse procedimento foi feito para duas batimetrias diferentes.

### 3.1. Sistema de Modelagem

O sistema de modelagem definido para o desenvolvimento deste trabalho foi o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil - SMC-Brasil.

Os avanços científicos, metodologias e ferramentas numéricas na área costeira, têm permitido entender em maior medida os processos que ocorrem nesta e, portanto, como o equilíbrio da área costeira é afetado pelas distintas atuações. Este conhecimento tem permitido identificar as ondas como um dos principais motores dos processos litorâneos (IH-CANTÁBRIA, 2013a).

O Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) é uma ferramenta computacional que combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira. As metodologias permitem abordar o estudo de um problema de forma sistemática (Quais dados de entrada são necessários? Quais escalas de processos analisar? Que modelo aplicar? etc.). As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em duas: (1) o SMC Tools que inclui uma base de dados de batimetria, ondas, nível do mar, transporte de sedimentos, etc.; além de ter duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais, e outra ferramenta que permite realizar a propagação de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa; e (2) o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) propriamente dito, que integra uma série de modelos numéricos, que permitem dar um suporte prático à correta aplicação da metodologia de trabalho proposta nos Documentos Temáticos (IH CANTÁBRIA, 2013b).

O SMC-Brasil foi desenvolvido a partir do SMC, que é uma ferramenta que foi desenvolvida pelo Instituto Hidráulico Ambiental da Universidade da Cantábria (IH-Cantábria). Após um projeto de colaboração entre 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) chamado “*Transferência*

de metodologias e ferramentas de apoio à gestão do litoral brasileiro”, o SMC foi adaptado para a costa brasileira, dando origem ao SMC-Brasil.

O SMC também foi transferido a diferentes países do mundo (Colômbia, Taiwan, Tunísia, etc.). A versão brasileira inclui novos desenvolvimentos, graças aos avanços científicos na engenharia costeira e aos avanços informáticos nos últimos anos que permitiram criar uma versão mais avançada e prática (IH-CANTÁBRIA, 2013b).

A figura 3.2 ilustra um esquema organizacional do SMC-Brasil, apresentando tanto os módulos do sistema quanto os documentos em que eles são baseados.

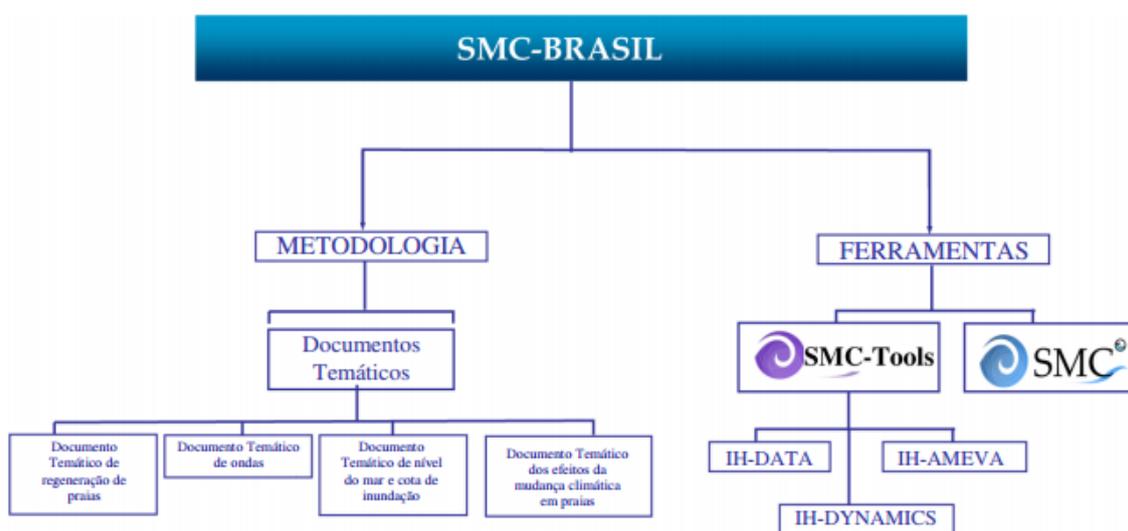


Figura 3.2 Estrutura Global do SMC Brasil.

O SMC-Tools é uma das duas principais ferramentas do SMC-Brasil, e é a base do pré-processo de qualquer projeto. Ele é formado por 3 módulos, o IH-Data, que armazena dados de batimetria, ondas e níveis do mar; o IH-Ameva, complementa-se ao IH-Data e é responsável pelo pré-processo e análise estatística de toda a base de dados; e o IH-Dynamics, responsável pela propagação de ondas até pontos da costa e pela avaliação do transporte litoral de sedimentos, a direção e a grandeza do fluxo médio de energia de onda e a cota de inundação em um ponto da costa (IH-CANTÁBRIA, 2013b).

O SMC é dividido em dois módulos, “Análise em curto prazo de praias” e “Análise em longo prazo de praias”, que contém os programas que permitem

analisar os sistemas costeiros a uma escala espacial e temporal de curto prazo e de longo prazo respectivamente.

### **3.1.1. Algumas aplicações do SMC-Brasil**

O SMC-Brasil já tem sido utilizado em diversos estudos costeiros. Neste capítulo encontra-se um breve histórico de aplicações do SMC-Brasil.

No estado de Santa Catarina, Almeida (2013) realizou um estudo sobre a dinâmica litoral na parte sul da praia de Piçarras. Foi feita uma análise da dinâmica marinha local e estabeleceu-se um modelo morfodinâmico de funcionamento da praia de Piçarras. A praia apresentava processos erosivos e a prefeitura propôs a construção de um dique para conter a faixa praial. Foi analisada a funcionalidade da atual solução proposta pela prefeitura do município e concluiu-se que o dique precisava ter um maior comprimento para que a condição de erosão fosse estabilizada.

No estado de São Paulo, o SMC-Brasil foi aplicado por Luca (2011) na praia de Massaguaçu. Foi feito um estudo morfodinâmico para embasar propostas de alternativas para estabilização da faixa praial. O problema em questão era o ataque da erosão à rodovia BR 101 que passa na orla da praia de Massaguaçu. Foram propostas três ações para induzir a sua forma em planta de equilíbrio: Construção de um espigão na linha de costa, aporte misto de areia e deslocamento e retrocesso da BR-101 Rio Santos.

Notou-se uma grande quantidade de trabalhos com o uso do SMC no estado de Santa Catarina. Recentemente, Souza Ribeiro *et al.* (2015), em seu trabalho intitulado “Caracterização Morfológica e Hidrodinâmica de Praias do Estado de Santa Catarina com Vista à Avaliação de Perigo ao Banhista”, utilizou a base de dados do SMC-Brasil para o levantamento das informações relacionadas à altura de onda para avaliar as condições de segurança para balneabilidade.

Em Pernambuco, o SMC foi utilizado por Gomes e Silva (2014) para modelar o processo de erosão costeira na praia de Candeias, zona metropolitana da capital Recife.

No trabalho intitulado “ Nearshore Dynamics and Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil ”, desenvolvido por de Oliveira *et al.* (2016), o SMC - Brasil foi utilizado para análise da propagação de ondas próximas à costa para simular a geração de correntes geradas pela quebra das ondas bem como o transporte de sedimento da região.

No estado do Rio Grande do Norte, Araújo (2015) estudou a dinâmica da praia de Ponta Negra por meio da ferramenta SMC-Brasil.

A pesquisa feita sobre as aplicações já realizadas do SMC-Brasil indica que há aceitação do sistema, e, portanto, legítima a escolha do sistema de modelagem utilizado neste trabalho.

### 3.2. Análise do Clima De Ondas

Definir o clima de ondas ao largo de uma praia significa definir, além da direção predominante das ondas, os valores mais representativos de altura significativa e período de pico tanto para os casos comuns (regime médio) quanto para os eventos tempestivos (regime extremo). Neste capítulo, será detalhado o procedimento utilizado para caracterização do clima de onda ao largo da praia da Barreira do Inferno.

O SMC-Brasil permite a caracterização do clima para três zonas da costa. O que diferencia essas zonas é a razão entre a profundidade (h) e a interação do leito submarino com a propagação das ondas (representada pelo comprimento de onda “L”).

Tabela 3.1 Intervalos das Zonas Costeiras de acordo com a relação entre a altura (h) e o comprimento de onda (L) definidos pelo SMC-Brasil.

Relação h/L	Zona
Menor que 0,04	Zona de águas rasas
Entre 0,04 e 0,5	Zona de águas intermediárias
Maior que 0,5	Zona de águas profundas

O SMC-Brasil já possui, em sua base de dados, uma malha de pontos com 60 anos de série histórica, que dispõe das informações estatísticas referentes às ondas das zonas de águas intermediárias e profundas para toda a costa brasileira. Embora esses dados não sejam ideais para uma análise próxima da costa (pois faltam os dados da Zona de águas rasas), eles são de grande importância para a definição do clima de onda da região.

Os nós analisados serão os de profundidade intermediária, que são obtidos a partir dos pontos de profundidade indefinida (grandes profundidades) por meio de um processo de *downscaling*. A malha obtida por esse processo é chamada de Dowscaled Ocean Waves (DOW).

Foi dado início, então, ao procedimento de escolha do ponto DOW representativo da costa da Barreira do Inferno e, então, foram obtidos os parâmetros que definem o clima de onda: altura significativa de onda ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção média ( $\theta_m$ ) e altura de onda superada 12 horas ao ano ( $H_{s12}$ ). O procedimento de escolha do ponto DOW será detalhado mais adiante.

Esses dados servem de entrada para outros módulos utilizados neste estudo, que estão inseridos na plataforma SMC-Brasil.

### **3.2.1. Seleção Dos Pontos De Propagação**

O banco de dados do SMC-Brasil fornece uma grande malha de pontos denominados pontos DOW (Downsacaled Ocean Waves) por toda a costa brasileira. Portanto, ao mesmo tempo em que se tem riqueza de informação ao longo da plataforma continental, deve-se escolher o conjunto de dados (ponto DOW) que melhor represente a situação real. Esse cuidado é necessário pois a malha de propagação utilizará os dados do ponto DOW escolhido como informação de contorno (dados da linha inicial de propagação) para toda a propagação na costa praial. Isto é, para uma praia com grande variação de profundidade ao longo de sua linha de costa, necessita-se de cautela para se escolher o ponto DOW mais representativo. Embora a plataforma continental ao largo da praia da Barreira do Inferno apresente aspecto suavizado com

pouca variação de profundidade, buscou-se definir o ponto DOW de forma menos arbitrária possível.

Para o caso da praia da Barreira do Inferno, foi possível traçar uma linha paralela à linha de costa e observar uma pequena evolução da profundidade no sentido Norte-Sul. De acordo com trabalhos já realizados e o Manual de Usuário do SMC, a propagação simulada pelo SMC costuma ser mais próxima da realidade quando o ponto DOW escolhido está dentro da faixa de profundidade de 10 a 20 metros e quando os dados desse ponto são os mais representativos do clima de onda que predomina na região. Neste trabalho, definiu-se uma longitude próxima da profundidade de 15 metros (-35,0482) e variou-se somente a latitude ao longo de toda a costa da praia. Obteve-se, portanto, um total de 9 pontos DOW (figura 3.3).



Figura 3.3 Pontos DOW selecionados dentro interface SMC Tools. Fonte: SMC Tools.

Em seguida, os dados fornecidos por cada ponto DOW (Probabilidade de Direção,  $T_p$  50%,  $T_{p12}$ ,  $H_s$  50%,  $H_{s12}$ ) foram plotados em gráfico e comparados entre si. Os pontos analisados mostraram valores de probabilidade não nulos somente para 4 direções, ENE, E, ESE e SE. Portanto, somente essas direções foram consideradas na construção dos gráficos.

Na tabela 3.2, estão as coordenadas geográficas de cada ponto bem como as cotas de fundo. Na tabela 3.3, estão a profundidade média e o desvio padrão.

Tabela 3.2 Coordenadas dos pontos DOW; profundidade  $Z(m)$ ; profundidade média  $Z_{médio}(m)$ .

<i>Ponto</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Z (m)</i>
<b>1</b>	-5,8865	-35,0482	<b>15,32</b>
<b>2</b>	-5,8956	-35,0482	<b>15,86</b>
<b>3</b>	-5,9046	-35,0482	<b>15,34</b>
<b>4</b>	-5,9137	-35,0482	<b>16,07</b>
<b>5</b>	-5,9227	-35,0482	<b>16,14</b>
<b>6</b>	-5,9317	-35,0482	<b>15,59</b>
<b>7</b>	-5,9408	-35,0482	<b>15,05</b>
<b>8</b>	-5,9498	-35,0482	<b>14,73</b>
<b>9</b>	-5,9589	-35,0482	<b>15</b>

Tabela 3.3 Profundidade média de todos os pontos selecionados (m); Desvio padrão  $\sigma$  (m).

<b>Z médio (m)</b>	<b><math>\sigma</math> - Desvio padrão (m)</b>
<b>15,46</b>	<b>0,41</b>

Como resultados diretos da seleção dos 9 pontos, prosseguiu-se para a construção dos gráficos comparativos para todos os pontos, ilustrando a probabilidade de direção das ondas, o período de pico médio ( $T_{p50\%}$ ), o período de pico para condições extremas ( $T_{p12}$ ), altura significativa média ( $H_{s50\%}$ ) e altura significativa para condições extremas ( $H_{s12}$ ).

### **3.3. Batimetria**

Para dar continuidade às etapas seguintes do processo de modelagem, ou seja, propagação das ondas, correntes e cálculo do Transporte Longitudinal de Sedimentos, foi preciso iniciar um estudo das possíveis batimetrias a serem inseridas como base para o modelo.

Os dados batimétricos foram compilados a partir da Carta Náutica 22100, disponibilizada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil, em 2015. A carta foi georreferenciada (usando o *Datum WGS1984* e coordenadas *UTM*) e digitalizada no *software* ArcGis 10.3. A partir da malha batimétrica, com informações dos pontos de posição (X, Y) e profundidades

(Z), ajustadas ao nível médio do mar, aplicou-se, através do *software* Surfer 11, os interpoladores espaciais geoestatísticos: Vizinho Natural, desenvolvido por Sibson (1981) e Krigagem, método interpolador formalizado por Matheron (1962) com base no trabalho de Krige (1951). As interpolações foram feitas para células de dimensão 100m x 100m.

Moura *et al.* (2011), em seu trabalho com base no modelo hidrodinâmico SisBahia ®, evidenciou que as batimetrias interpoladas pelos métodos do Vizinho Natural e Krigagem acarretaram diferenças, entre si, nas direções das velocidades do fluxo. Ele chama a atenção de que mudanças na direção do vetor velocidade são de interesse, entre outros, de estudos de transporte de sedimentos.

A interpolação do vizinho natural encontra o subconjunto mais próximo de amostras de entrada para um ponto de consulta e aplica pesos a eles com base em áreas proporcionadas para interpolar um valor (SIBSON, 1981).

Kriging é uma forma de média ponderada em que os pesos são escolhidos de tal forma que o erro associado ao preditor seja menor do que para qualquer outra soma linear. Os pesos dependem da localização dos pontos utilizados no processo de predição e da covariação refletida no semivariograma Hemyari e Nofziger (1987).

Portanto, a partir do perfil batimétrico apresentado pela carta náutica 22100, após o processo de refinamento dos dados por meio dos métodos Vizinho Natural e Krigagem, foram traçadas, no SMC-Brasil, as malhas de propagação ondas. Tomou-se o cuidado na construção das malhas de forma que a frente de entrada desta tivesse a menor distância possível do ponto de DOW definido anteriormente, pois toda linha de entrada da malha tem, como contorno inicial, os dados fornecidos pelo ponto DOW escolhido. Para cada uma das interpolações, foram construídas duas malhas, uma para as ondas vindas da direção E (leste) e outra para as ondas vindas de ESE (leste-sudeste).

Foi feita, então, análises comparativas para se definir qual dos métodos melhor se adéqua ao leito da área de estudo e, conseqüentemente, qual é o mais apropriado para servir de entrada para o modelo do SMC-Brasil.

As subseções 3.3.1 e 3.3.2, a seguir, apresentam dados obtidos em estudo (GURGEL *et al.*, 2017) que contemplou análises geoestatísticas bem como avaliação estatística de acurácia dos métodos interpoladores Vizinho Natural e Krigagem.

### 3.3.1. Análises Geoestatísticas dos Métodos Interpoladores

Com intuito de definir a batimetria mais adequada para executar os modelos de propagação de ondas e correntes e geração dos casos de transporte, traçou-se dois perfis batimétricos e foi feita uma avaliação estatística de acurácia dos métodos interpoladores.

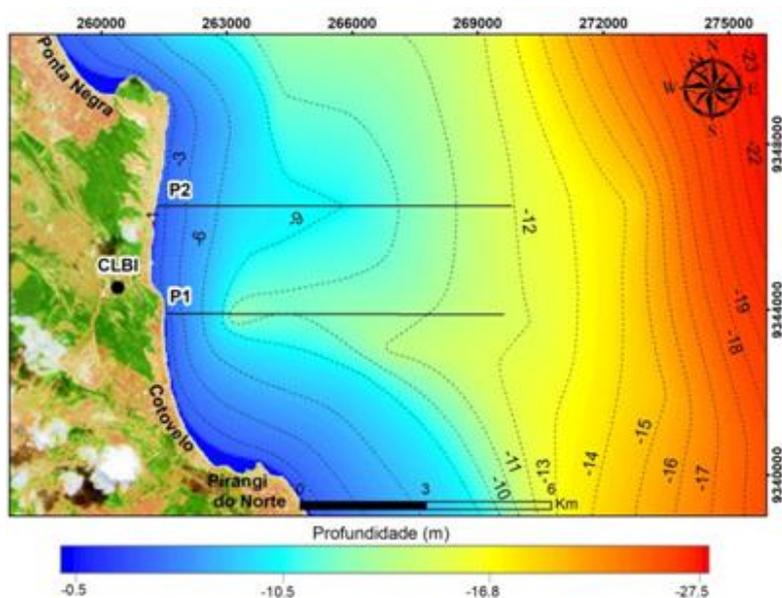


Figura 3.4 Perfis traçados para comparação dos métodos interpoladores.

Com base nas análises estatísticas das diferenças entre as isóbatas interpoladas nos modelos, foi efetuada uma avaliação de acurácia dos MDE.

A visualização dos perfis transversais, extraídos a partir dos MDE, permitiu verificar a regularidade das superfícies geradas nas regiões entre as isóbatas. A figura 3.5 mostra o Perfil 1, localizado na zona frontal a falésia da Barreira do Inferno (figura 3.4). Verificou-se uma superfície regular e semelhante para ambos os métodos até a isóbata de 10 metros. A partir desta profundidade, ocorre uma média de -0.378 m de diferença entre as profundidades, ou seja, notou-se que o VN conseguiu reproduzir um suave gradiente de fundo,

enquanto que a Krigagem reproduziu uma condição de alisamento. Observando o gráfico do modelo de ajuste linear ao lado, verificou-se uma excelente correlação, com o valor do coeficiente de  $R$  de 0.99, entretanto, o modelo explicou exatamente a variância dos dados a partir da isóbata de 10 metros.

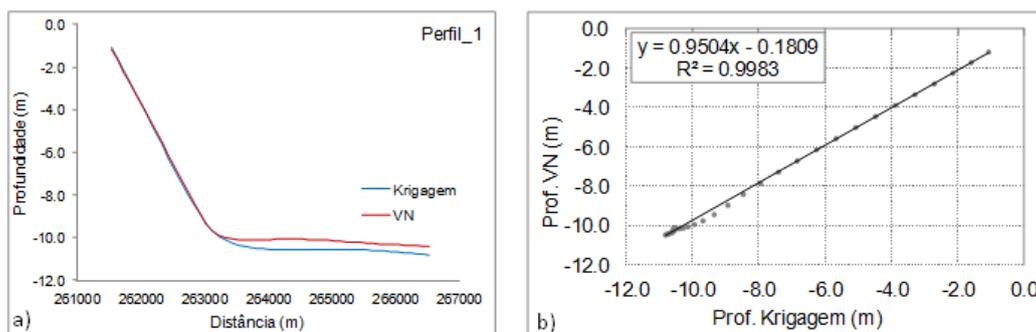


Figura 3.5 Comparação de perfis batimétricos e modelo de ajuste linear, extraídos dos MDE gerados por interpoladores, em zona submersa, Perfil 1.

Em seguida, na figura 3.6, gerou-se outro perfil transversal à costa (Perfil 2, situado na zona frontal à faixa praial do limite da Barreira do Inferno), para a verificação das diferenças entre as profundidades extraídas dos interpoladores.

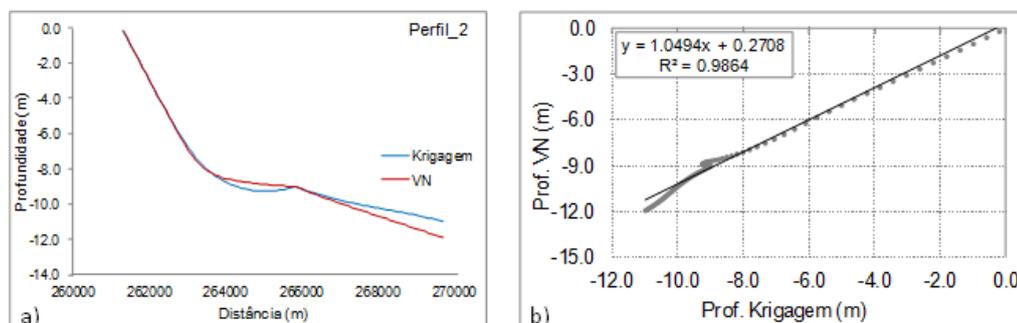


Figura 3.6 Comparação de perfis batimétricos e modelo de ajuste linear, extraídos dos MDE gerados por interpoladores, em zona submersa, Perfil 2.

Novamente, verificou-se uma variância das superfícies geradas, apesar do modelo de ajuste linear mostrar o valor do coeficiente de  $R$  igual a 0.98, ou seja, bem ajustável. O modelo explica uma tendência de aumento da variância a partir da profundidade de 10 m.

Embora, estatisticamente, o modelo de ajuste linear seja muito bem aceitável, há uma autocorrelação dos resíduos nas profundidades abaixo de 10 m, o que não acontece com as profundidades acima desta isóbata. Portanto, para uma

análise mais abrangente, recomenda-se verificar as isóbatas em maiores profundidades e construção de batimetrias mais detalhadas.

### 3.3.2. Avaliação Estatística de Acurácia dos Métodos Interpoladores

A acurácia dos dados foi executada nos dados da carta náutica em relação os dados obtidos pelos interpoladores. Foram aplicados os métodos estatísticos de medidas de erro: raiz do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de determinação e adoção do índice de concordância ( $d$ ) definido por Willmot *et al.* (1985) que se reflete em um valor adimensional entre 0 e 1, indicando que há maior concordância entre os valores da carta náutica e os interpolados a medida em que esse valor se aproxima de 1. Portanto, a figura 3.7, expressa a acurácia métrica dos dados, de acordo com esta figura, os dois métodos mostraram erros elevados (  $RMSE_{krigagem} = 0.437$  e  $RMSE_{vn} = 0.345$ ), sobretudo o interpolador Krigagem. O erro médio quadrático elevado já era esperado devido à escassez de pontos da carta náutica 22100 ao largo da praia da Barreira do Inferno.

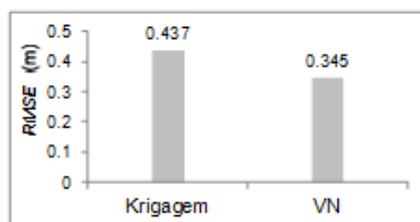


Figura 3.7 Medida estatística de erro, raiz do erro médio quadrático, RMSE.

Apesar disso, os métodos mostraram as curvas batimétricas coerentes visualmente e, portanto, após a análise estatística, passaram por uma análise visual comparativa com uma imagem de satélite.

A tabela 3.4 mostra o resultado da aplicação do coeficiente de determinação, também conhecido como  $R^2$ , e o índice de concordância  $d$ . Considerando que, quanto maior o valor do  $R^2$  e do  $d$ , ou seja, quanto mais próximo de 1, mais explicativo é o modelo. Tanto a Krigagem quanto o Vizinho Natural apresentaram fortes correlações ( $R^2$ ) e índices de concordância ( $d$ ).

Tabela 3.4 Estatísticas das discrepâncias das isóbatas obtidas entre os métodos interpoladores.

	Krigagem	Vizinho Natural
$R^2$	0.996	0.997
$d$	0.996	0.998

Diante da análise estatística, evidencia-se que ambos os métodos interpoladores geraram batimetrias semelhantes entre si considerando as profundidades até 10m. A única análise estatística que permitiu julgar o melhor método para a praia em estudo foi a raiz do erro quadrático médio, que mostrou o Vizinho Natural com um erro inferior ao método da Krigagem quando comparados a carta náutica 22100.

### 3.3.3. Análise das topografias geradas a partir dos métodos interpoladores

Para dar suporte à análise estatística, foi feita uma análise por meio da comparação das batimetrias em 2D de cada método com uma imagem de satélite (carta imagem). A imagem de satélite foi tratada com filtro direcional de orientação Sul para Norte com o intuito de ressaltar as feições de fundo da praia da Barreira do Inferno. As topografias em 2D utilizando os dois métodos foram geradas pelo SMC-Brasil. Abaixo, seguem as topografias em 2D e a imagem de satélite tratada.

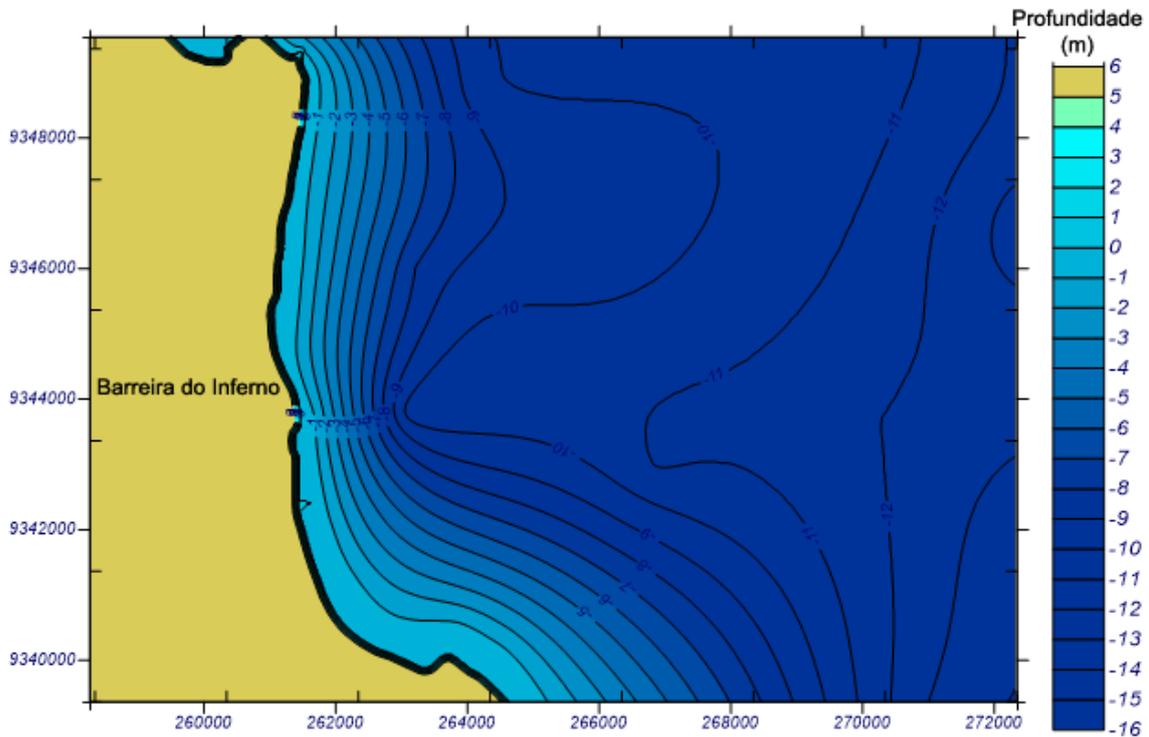


Figura 3.8 Batimetria em 2D da praia da Barreira do Inferno Interpolada pelo método da Krigagem.

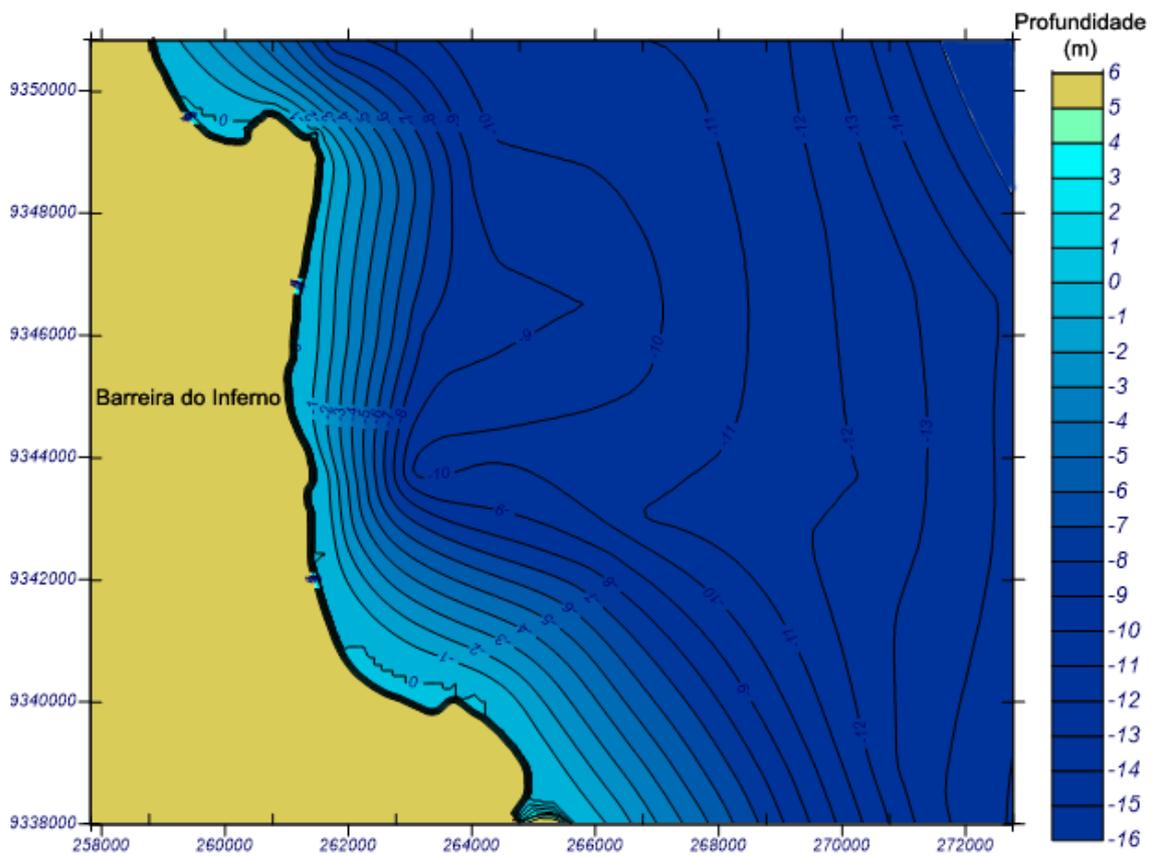


Figura 3.9 Batimetria em 2D da praia da Barreira do Inferno Interpolada pelo método Vizinho Natural.

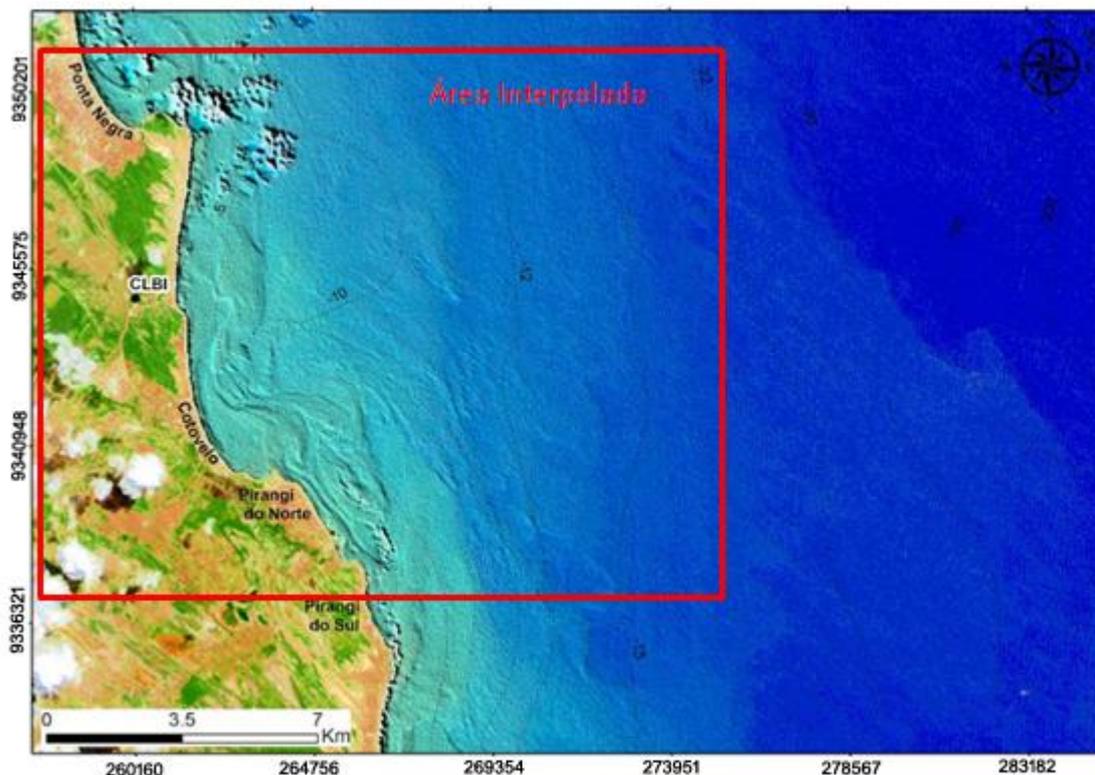


Figura 3.10 Carta Imagem – Imagem de satélite tratada com filtro direcional de Sul para Norte realçando o leito da praia da Barreira do Inferno.

A carta imagem (figura 3.10) mostra que ao largo da praia da barreira do inferno existem feições pouco proeminentes. É possível notar que, principalmente para a linha batimétrica de 10 metros, a batimetria advinda da interpolação por Vizinho Natural (figura 3.9) mostra mais semelhanças com a imagem de satélite que a advinda da Krigagem (figura 3.8).

Após análises estatísticas de perfis traçados, análise visual e suporte bibliográfico dado pelo trabalho de Moura *et al.* (2011), que, em um estudo comparativo de métodos interpoladores de cartas náuticas na costa do Rio Grande do Norte, classificou o Vizinho Natural como um método de curvas suavizadas, coerentes e sem extrapolações, esperou-se que o Vizinho Natural geraria os resultados mais confiáveis ao término do processo de modelagem.

Entretanto, para fins comparativos da sensibilidade do modelo à diferentes batimetrias, persistiu-se na execução da modelagem para os dois métodos interpoladores, isto é, Vizinho Natural e Krigagem. Afinal, o estudo realizado

por Moura *et al.* (2011) tomou como base um modelo hidrodinâmico, já este trabalho baseia-se em um modelo à base de propagação de ondas.

### 3.4. Propagação de Ondas

Foram propagados casos de curto prazo, isto é, casos de situações de mar específicas e delimitadas, para se ter uma noção do comportamento da praia da Barreira do Inferno de maneira preliminar.

Propagou-se, para cada um dos métodos interpoladores, os casos de regime médio e extremo para as duas direções principais, E e ESE, tanto em situações de baixamar quanto em situações de preamar. Os parâmetros de onda utilizados foram os fornecidos pelo ponto de propagação definido anteriormente. A figura 3.11 mostra um esquema explicativo dos casos, bem como os enumera.

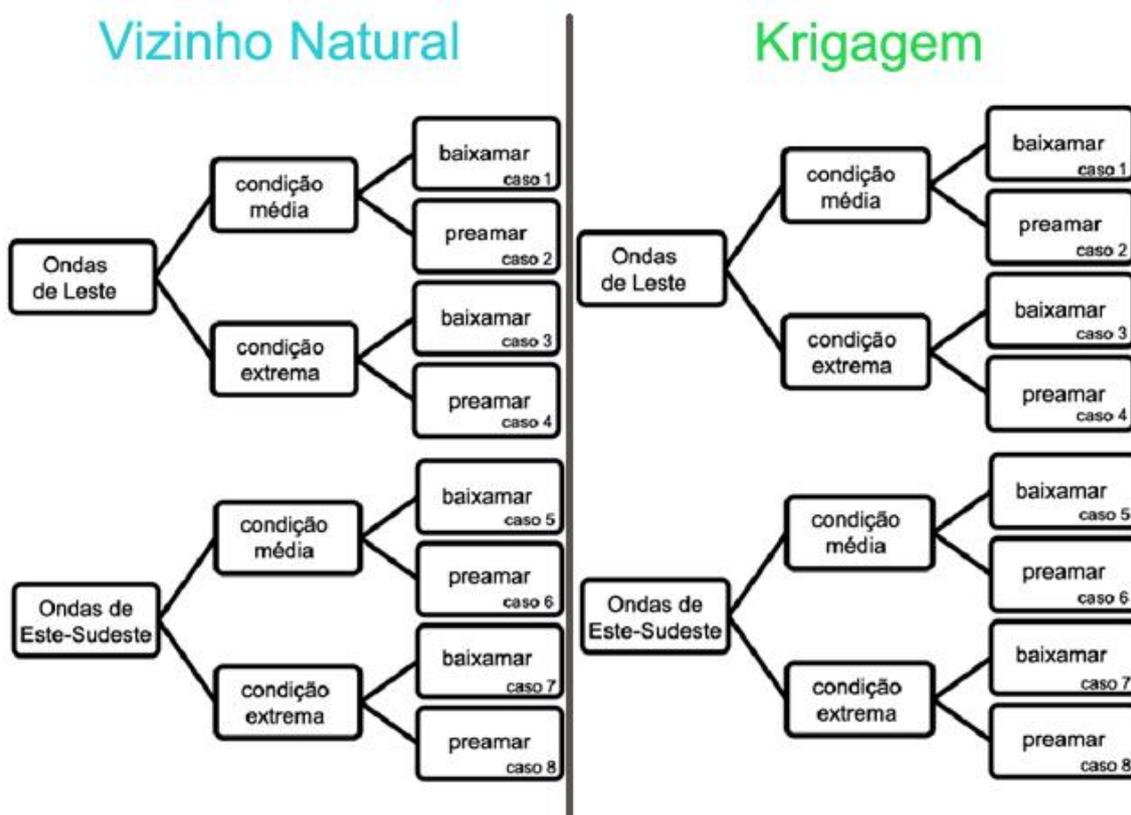


Figura 3.11 Esquematização dos casos de mar gerados para cada um dos métodos interpoladores.

Os principais parâmetros de onda utilizados como dados de entrada que o SMC exige são a altura significativa média  $H_{s50\%}$ , o período de pico médio  $T_{p50\%}$ , a altura significativa para situações de tempestade  $H_{s12}$ , o período de pico para situações de tempestade  $T_{p12}$ . O espectro direcional é definido pela função de dispersão direcional dada por Borgman (1984), que exige, dentro do SMC, a direção média das ondas  $\theta$  e a largura do espectro  $\sigma$ , ambas dadas em graus, como dados de entrada. A equação 3.1 é a função de dispersão direcional formulada por Borgman (1984). Os valores apresentados pela tabela 3.5 foram os adotados tanto para os 8 casos do Vizinho Natural, quanto para os 8 casos da Krigagem.

$$G(\theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^J \left\{ \exp \left[ -\frac{(j\sigma_m)^2}{2} \right] \cos j(\theta - \theta_m) \right\} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde  $\theta_m$  é a direção média da onda,  $J$  um número arbitrário de harmônicos para representar a série de Fourier (valor selecionado no Oluca-SP  $J=100$ ) e  $\sigma_m$  o parâmetro que determina a largura da dispersão direcional. Segundo o Manual de Referência do Modelo de Propagação de Ondas Espectrais em Praias, esta expressão tem sido aplicada com bons resultados por diferentes autores (VICENT *et. al.*, 1989; PANCHANG *et. al.*, 1990, PAE *et. al.*, 1992; CHAWLA *et. al.*, 1998).

Tabela 3.5 Parâmetros de onda utilizados como dados de entrada para as propagações.

	Direção	Hs50% (m)	TP50% (s)	HS12 (m)	TP12 (s)	$\gamma$	$\sigma$ (graus)	Maré (m)
<b>Caso 1</b>	E	1.38	7.58	-	-	3.3	20	0
<b>Caso 2</b>	E	1.38	7.58	-	-	3.3	20	2.6
<b>Caso 3</b>	E	-	-	2.39	12.4	8	15	0
<b>Caso 4</b>	E	-	-	2.39	12.4	8	15	2.6
<b>Caso 5</b>	ESE	1.46	7.41	-	-	3.3	20	0
<b>Caso 6</b>	ESE	1.46	7.41	-	-	3.3	20	2.6
<b>Caso 7</b>	ESE	-	-	2.39	11.33	8	15	0
<b>Caso 8</b>	ESE	-	-	2.39	11.33	8	15	2.6

Os principais parâmetros de onda utilizados em cada caso podem ser conferidos na tabela 3.5, que representa tanto os casos do Vizinho Natural

quanto da Krigagem. A altura de maré máxima, 2,6 metros, foi definida com base na maior altura de maré já registrada nas tábuas de maré para a região próxima do porto de Natal. O parâmetro  $\gamma$  corresponde ao fator de alargamento de pico, que indica a dispersão da frequência do espectro tipo JONSWAP. Os valores foram definidos com base nos valores adotados por Araújo (2015).

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  $\sigma$  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  $\sigma_\theta = 15$ ). (ARAÚJO, 2015).

Em resumo, foram gerados 16 casos representativos das principais situações de mar da região, sendo 8 referentes ao método Vizinho Natural e 8 referentes à Krigagem.

### 3.5. Correntes

Ao mesmo tempo em que o SMC propagou as ondas até a costa, também foi realizada a modelagem das correntes geradas pela energia das ondas. As correntes associadas à magnitude do vetor velocidade foram plotadas em um gráfico para os casos principais.

Uma vez definido o clima de onda, a batimetria, e tendo feito o procedimento de propagação das ondas e correntes até a costa, prosseguiu-se, então, com o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos.

Devido à semelhança entre os gráficos de corrente gerados para todos os casos, analisou-se somente dois casos de cada direção predominante (dois casos de E e dois casos de ESE). Foram selecionados os casos 2, 3, 6 e 7, respectivamente, os casos de condições médias de preamar e condições extremas de baixamar para a direção E e os casos de condições médias de preamar e condições extremas de baixamar para a direção ESE.

### 3.6. Transporte Longitudinal de Sedimentos

Ao se estudar o transporte de sedimentos ao longo da costa, além de simular os casos principais de corrente em situações específicas, também é importante considerar os dados de toda a série histórica fornecida pelo SMC-Brasil (60 anos de dados). Em outras palavras, a análise de curto prazo é complementada pela análise de longo prazo para que se permita um melhor entendimento da dinâmica de sedimentos ao longo da costa.

Como continuação das etapas de propagação de ondas e geração das correntes, o SMC permite o cálculo do transporte de sedimento tomando como base um número pré-determinado de casos criados aleatoriamente com os dados de onda da série histórica de 60 anos. Foram gerados os gráficos de transporte longitudinal de sedimento médio anual e, em seguida, também foi feita a análise do transporte longitudinal de sedimento para as estações chuvosas e períodos sem chuva. Para a área de estudo, a estação chuvosa compreendeu a interface dos mais chuvosos e os meses com vento mais fortes, ou seja, os meses de Junho, Julho e Agosto. Já o período compreendido por Dezembro, Janeiro e Fevereiro, diz respeito ao período com escassez de chuvas.

Para o cálculo da taxa de transporte longitudinal de sedimentos (TLS), traçou-se cinco perfis (enumerados de 1 a 5, ver figura 3.12) ao longo da costa da praia em estudo até a profundidade de fechamento adotada. Tomou-se como base o valor médio das profundidades de fechamento encontradas para a praia vizinha (Ponta Negra) por Araújo (2015) por meio da formulação de Harllermeier, que foi em torno da linha batimétrica de 5 metros de profundidade.

Um dos dados de entrada para o cálculo do transporte de sedimento é o diâmetro médio dos grãos de areia. Como não há, ainda, estudo de caracterização sedimentológica para a praia da Barreira do Inferno, optou-se pela aplicação do modelo de perfil de equilíbrio proposto por Brunm (1954) e Dean (1977).

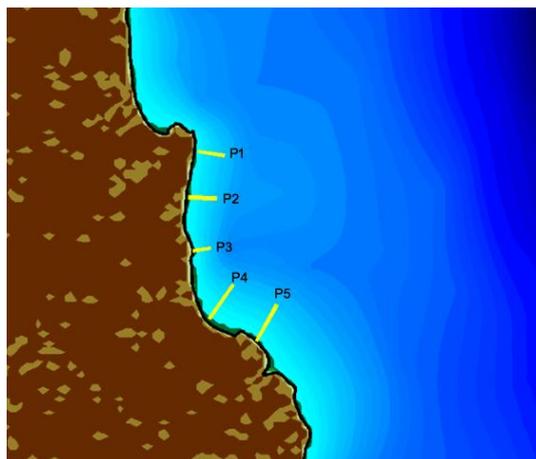


Figura 3.12 Perfis traçados até a profundidade de fechamento média adotada de 5m.

A granulometria encontrada para todos os perfis ficou na faixa de silte ( $D_{50}$  entre 0,004mm e 0,0625mm), com exceção do perfil 3, o qual apresentou uma granulometria na faixa de areia fina, com um  $D_{50}$  igual a 0,074mm.

Entretanto, o SMC - Brasil não aceita granulometrias inferiores a 0,1mm. Desse modo, optou-se por adotar o  $D_{50}$  igual a 0,1mm para todos os perfis. A classificação média dos grãos, então, foi dada como areia muito fina, de acordo com a classificação granulométrica proposta por Wentworth (1922).

Com relação à equação que regerá o transporte longitudinal de sedimentos, o SMC oferece três opções, a formulação de CERC (USACE, 1984), Kamphuis (1991) e Bayram *et al.* (2007).

Araújo (2015), após estudo comparativo, determinou que a formulação que melhor representa o transporte de sedimento para a região da praia de Ponta Negra é a formulação de Bayram *et al.* (2007).

A capacidade preditiva da fórmula 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 (ARAÚJO, 2015).

Portanto, para o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos na praia da Barreira do Inferno aplicou-se a formulação proposta por Bayram et. al (2007).

Assim como após os processos de propagação de ondas e modelagem das correntes, para o transporte longitudinal de sedimentos também foram feitas as análises dos resultados de forma geral e uma comparação entre os métodos interpoladores.

### 3.6.1. Formulação de Bayram

Segundo Araújo (2015), de acordo com a formulação de Bayram et. al. (2007), 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 ( $w_s$ ).

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

Equação 3.2

Onde,  $x$  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. Considerando que apenas parte do fluxo de energia de onda ( $F$ ) é utilizada para a realização de trabalho e que a taxa de transporte longitudinal de sedimentos total ( $Q_{lst}$ ) pode ser representada pelo produto da concentração de sedimentos com a velocidade de corrente longitudinal ( $V$ ), tem-se a equação 3.3 (ARAÚJO, 2015).

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

Equação 3.3

Após considerar uma velocidade de corrente longitudinal constante, a formulação de Bayram *et al.* (2007) para a obtenção da taxa de transporte

longitudinal de sedimentos total ( $Q_{lst}$ ) se configura como mostrado na equação 3.4 (ARAÚJO, 2015).

$$Q_{lst} = \frac{\epsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - p)gw_s} F\bar{V}$$

Equação 3.4

Onde  $V$  é a velocidade longitudinal de corrente média,  $p$  a porosidade do sedimento e  $\epsilon$  é coeficiente de transporte, um valor adimensional que expressa a eficiência das ondas em manter o sedimento suspenso para calibração do modelo e foi definido por Mil-Homens *et al.* (2013). A seguir, na equação 3.5, encontra-se a expressão para definir  $\epsilon$  (ARAÚJO, 2015).

$$\epsilon = \left[ 7.682 \times 10^5 \left( \frac{H_{sb}}{L_o} \right)^{1.283} + 1672.2 \right]^{-1}$$

Equação 3.5

# **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **Capítulo 4**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, encontram-se os resultados obtidos para a análise do clima de ondas, para a propagação das ondas e correntes e para o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos. À medida que se apresenta os resultados, prossegue-se com as discussões.

### 4.1. Clima de Ondas

Uma das formas de se escolher um ponto DOW representativo do clima de onda é comparando-se os valores de probabilidade de direção incidente, período e altura de onda com outros pontos DOW próximos. A pouca variação entre os pontos indica maior segurança na definição do clima por meio das informações dadas pelo ponto DOW escolhido. Abaixo, nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3 encontram-se, para cada um dos 9 pontos selecionados, os gráficos de probabilidade de direção, período de pico em condições médias e extremas e de altura significativa em condições médias e extremas.

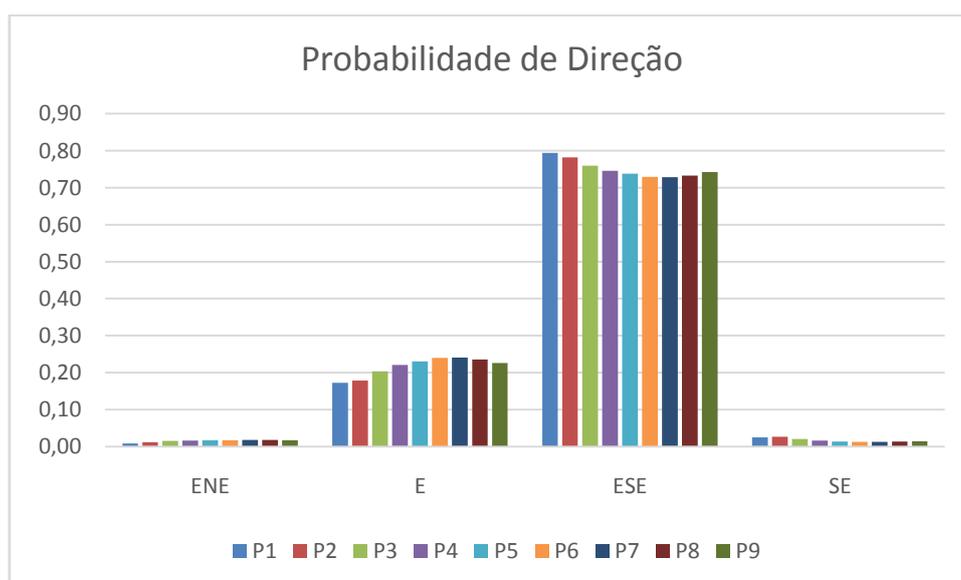


Figura 4.1 Probabilidade de Direção dos pontos DOW analisados.



Figura 4.2 a). Período de pico médio ( $Tp_{50\%}$ ). b). Período de pico para condições extremas ( $Tp_{12}$ ).

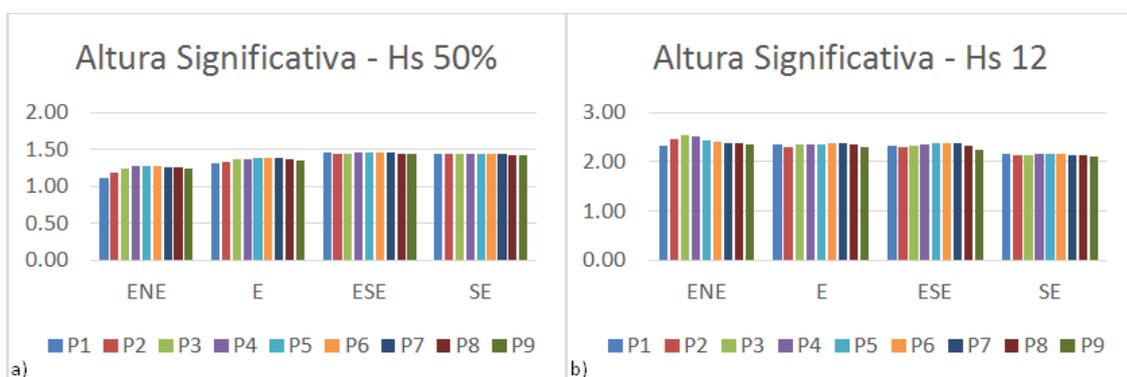


Figura 4.3 a). Altura significativa média ( $Hs_{50\%}$ ). b) Altura significativa para condições extremas ( $Hs_{12}$ ).

#### 4.1.1. Direção Incidente

Comparando-se a probabilidade de direção dos 9 pontos processados no SMC-Tools (base de dados de 60 anos), notou-se que a direção incidente foi predominantemente de ESE e também de E, pois, essas probabilidades, quando somadas, compreendem quase 100% das angulações incidentes (figura 4.1).

A partir da análise dos dados de vento da região, a série histórica de 1961 até 2010 da base de dados do INMET aponta que o vento na região de Natal é de Sudeste (SE) durante todo o ano.

Embora não se tenha dados de vento especificamente para a praia da Barreira do Inferno, a proximidade desta com a cidade de Natal permitiu uma comparação superficial com o objetivo de se validar a tendência de direção de mostrada pelo SMC, uma vez que a direção do vento é um fator que indica a

tendência de direção de onda. Portanto, a direção mostrada pela base de dados do SMC em conjunto com a análise dos dados de vento para a região de Natal permite afirmar que a tendência das ondas que incidem na praia da Barreira do Inferno é de quadrante sudeste, com maior probabilidade de ocorrência das ondas vindas de leste (E) e de leste-sudeste (ESE).

É importante definir a tendência de direção das ondas mediante confirmação dos dados de vento para calibrar bem os dados a serem inseridos no processo de modelagem de transporte de sedimento.

#### **4.1.2. Ponto de Propagação**

Definir o ponto de propagação (DOW) é, no âmbito do SMC, definir o clima de onda para a praia a ser modelada. Para a definição do ponto DOW, foi feita uma comparação entre variáveis estatísticas de onda (Hs50%, Hs12, Tp50% e Tp12) dos 9 pontos.

A direção das ondas vindas de Sudeste (mesma direção do vento medido em continente para a cidade de Natal), por apresentar uma probabilidade pouco expressiva se comparada às probabilidades de ESE e E, não se apresenta como principal direção do vento na região da praia da Barreira do Inferno. Portanto, na análise comparativa da altura de onda (Hs) e do período de pico (Tp), somente as direções ESE e E foram consideradas.

Em termos médios, o período de pico e a altura de onda se mostraram estatisticamente iguais para as 2 direções principais bem como entre os 9 pontos analisados.

A semelhança dos dados entre os 9 pontos é um indicativo de que qualquer um dos pontos pode representar o clima marítimo para a praia da Barreira do Inferno.

Entretanto, para uma definição mais profunda, outra variável foi analisada para a escolha do ponto DOW, a profundidade Z (m).

Para os pontos selecionados, a profundidade mostrou-se com um perfil levemente oscilatório em torno da média das profundidades, que é, aproximadamente, da ordem de 15,46 metros.

O desvio padrão das profundidades é de 0,4. Um valor baixo para pontos distribuídos ao longo de 8km de costa. Essa informação indica que os pontos analisados estão situados, praticamente, em uma mesma linha batimétrica. Isso torna a média das profundidades um valor confiável para representar as demais profundidades. Procurou-se, então, o ponto que possuía a profundidade mais próxima da média. Dessa forma, os pontos 3 e 6, com profundidades de 15,34 metros e 15,59 metros respectivamente se apresentam como bons representantes da profundidade da costa da Barreira do Inferno ao longo da longitude definida (-35,0482).

Para se fazer a escolha entre o ponto 3 e o ponto 6, optou-se pelo ponto que se situava mais próximo da metade do comprimento da costa e o que apresentou os maiores valores de Hs50% e Hs12 bem como os menores valores de Tp50% e Tp12. O critério da centralidade do ponto objetivou definir os dados que tivessem o mínimo de influência de praias vizinhas. Já o critério dos maiores valores de altura de onda e menores valores de período de pico objetivou encontrar o cenário extremo para a propagação, isto é, a situação mais energética tanto nos valores médios quanto em momentos de tempestade. Diante dessas considerações, o ponto 6 (-5,9317; -35,05) é o mais próximo do centro da costa bem como obteve os cenários de maior altura de onda. O fator  $R^2$  representado nos gráficos abaixo, por ser bem próximo do valor 1, confirma a alta correlação entre o ponto 6 e a média para a costa da Barreira do Inferno tanto para as condições regulares quanto para as extremas (figuras 4.4 e 4.5).

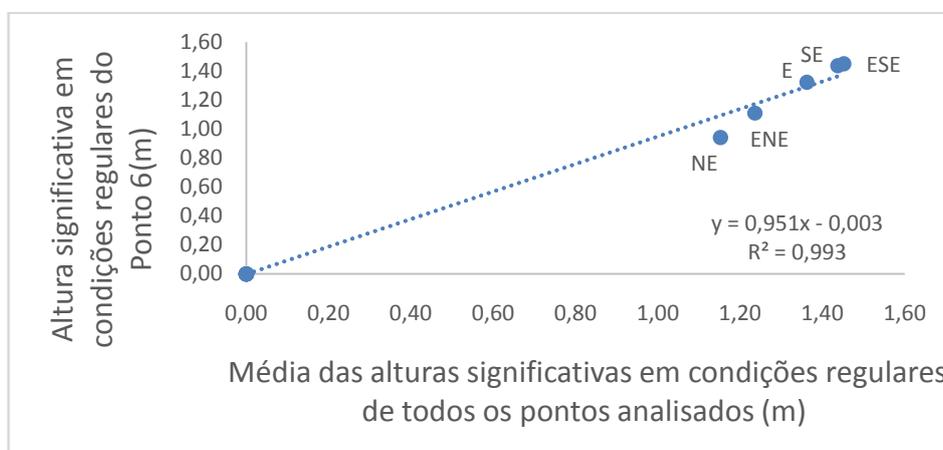


Figura 4.4 Relação entre a altura significativa em condições regulares do ponto 6 com a média das alturas significativas de todos os pontos analisados.

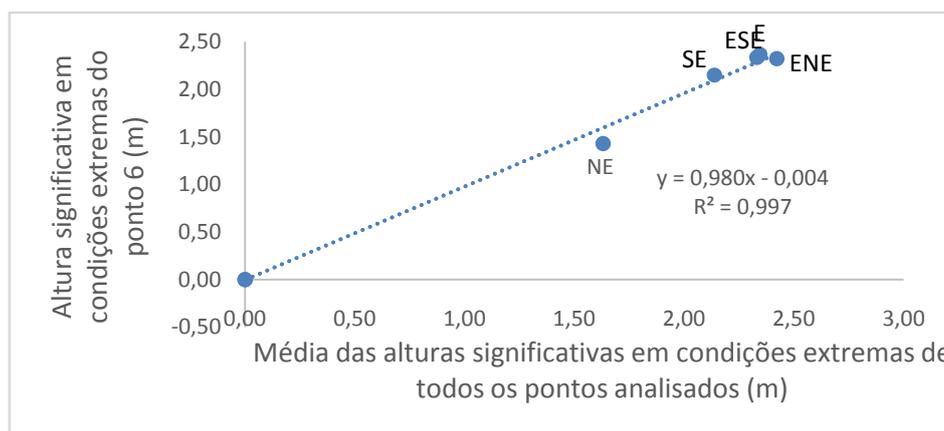


Figura 4.5 Relação entre a altura significativa em condições extremas do ponto 6 com a média das alturas significativas em condições extremas de todos os pontos analisados.

Portanto, diante das análises e discussão exposta, definiu-se o ponto 6 como o ponto representativo do clima de ondas ao longo da praia da Barreira do Inferno e o mais indicado para propagação de ondas até a costa.

Desse modo, foi possível definir o clima de onda da praia da Barreira do Inferno fazendo-se uma média (ponderada pelas probabilidades de ocorrência) dos períodos de pico e alturas significativas (fornecidos pelo ponto 6) de cada direção principal (E, ESE).

Para o regime médio, período de pico entre as principais direções de onda é de, aproximadamente, 7,58 segundos. A altura significativa é de, aproximadamente, 1,44 metros. Já para o regime extremo, o período de pico durou em média até 12,40 segundos e a altura significativa pode atingir 2,39 metros.

Comparando-se os dados deste trabalho com os dados de Almeida *et al.* (2014), percebeu-se grande semelhança entre os climas de ondas da PBI e da praia de Ponta Negra. Essa semelhança, por si só, não dá credibilidade ao clima obtido para a PBI por duas razões. A PBI e a PPN são praias vizinhas e Almeida *et al.* (2014) também se baseou no banco de dados do SMC-Brasil para a obtenção dos dados de onda, assim, a semelhança é esperada, mas não significa que os dados retornam valores próximos da realidade.

Entretanto, Almeida *et al.* (2014) comparou os dados de onda obtidos pelo SMC-Brasil com dados coletados em campo pelo Instituto de Pesquisas

Tecnológicas (IPT) e percebeu grande semelhança entre as alturas de onda. Esse fato torna consistente o clima de onda obtido para a PPN e, por consequência, também valida o clima de onda definido para a PBI neste trabalho.

Tabela 4.1 Probabilidade de direção, período de pico e altura significativa fornecidas pelo ponto 6.

P6	Prob. Direção	Tp50% (s)	Tp12 (s)	Hs50%	Hs12
E	0,24	8,08	15,64	1,38m	<b>2,39m</b>
ESE	0,73	7,41	11,33	1,46m	<b>2,39m</b>
Média Ponderada	-----	<b>7,58</b>	<b>12,40</b>	<b>1,44 m</b>	<b>2,39 m</b>

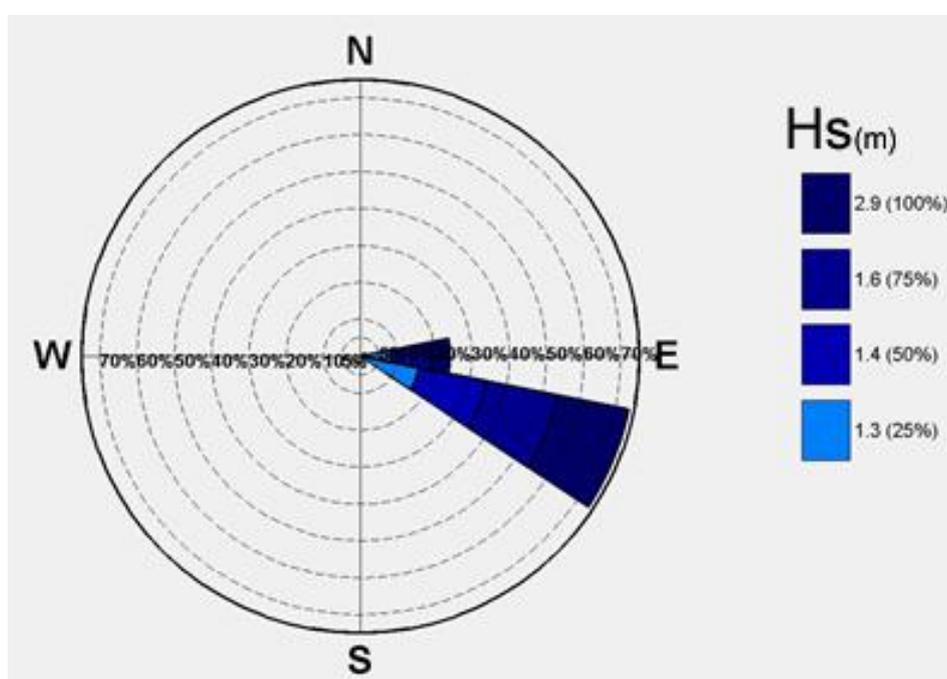


Figura 4.6 Roseta de direções de onda do ponto P6 (média anual).

A figura 4.6 ilustra os dados de probabilidade de direção associados aos dados de altura significativa fornecidos pela tabela 4.1. As direções de onda E e ESE representam, juntas, quase 98% dos casos de mar. Na caracterização do clima de onda para as praias urbanas da cidade de Natal (praias vizinhas ao norte da PBI) feita por Araújo *et al.* (2015), as probabilidades E e ESE representaram quase 97% dos casos de mar.

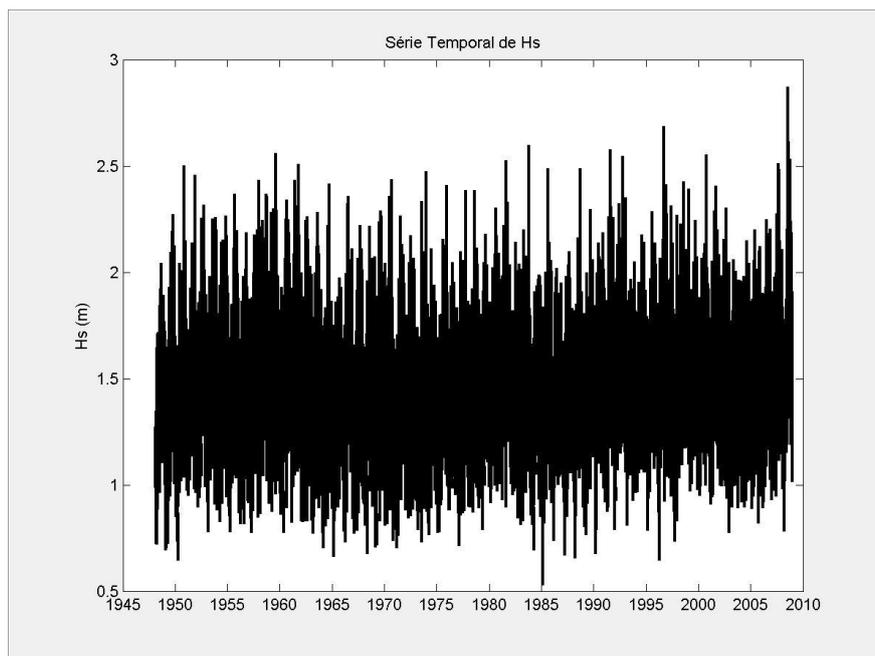


Figura 4.7 Série temporal de Hs de 1949 até 2009 para o ponto 6.

Ao se analisar a série temporal de Hs (figura 4.7) ao longo do período fornecido pelo banco de dados do SMC (60 anos), é possível perceber que não houve alteração do regime de alturas significativas. As alturas de onda na preamar e baixamar sempre estiveram, respectivamente, em torno de 2,4m e 0,7m. O valor médio de altura significativa mostrou-se, sempre, em torno de 1,5m.

Abaixo seguem os gráficos de probabilidade acumulada, de frequência de ocorrência e de distribuição conjunta para a altura significativa (Hs) e período de pico ( $T_p$ ) fornecidos pelo ponto 6.

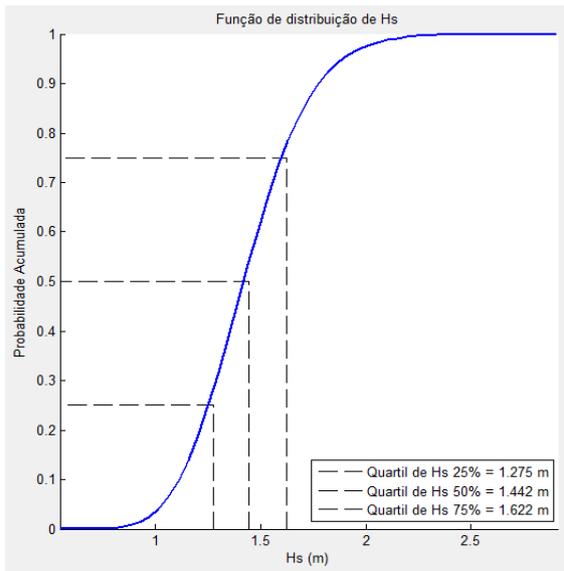


Figura 4.8 Função de distribuição de Hs.

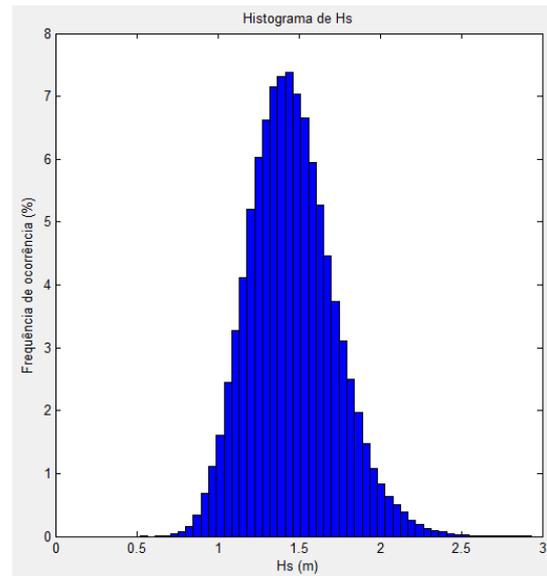


Figura 4.9 Histograma de altura significativa (Hs).

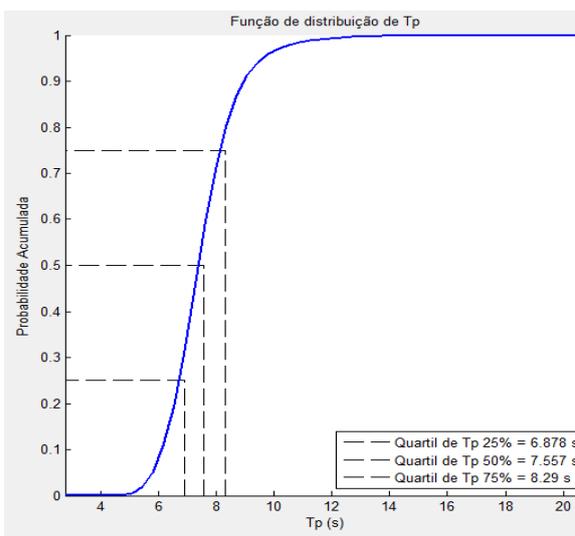


Figura 4.10 Função de distribuição de período de pico (Tp).

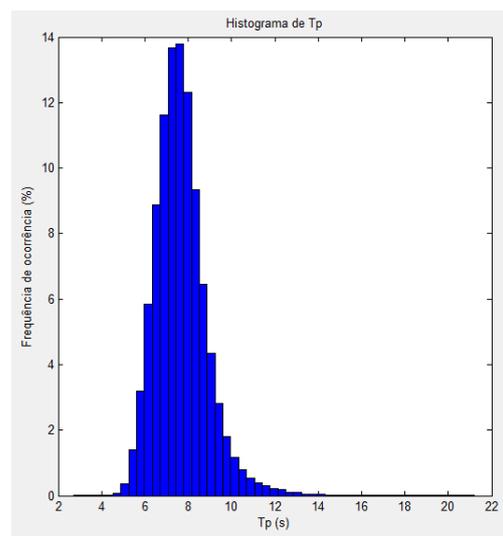


Figura 4.11 Histograma de Tp

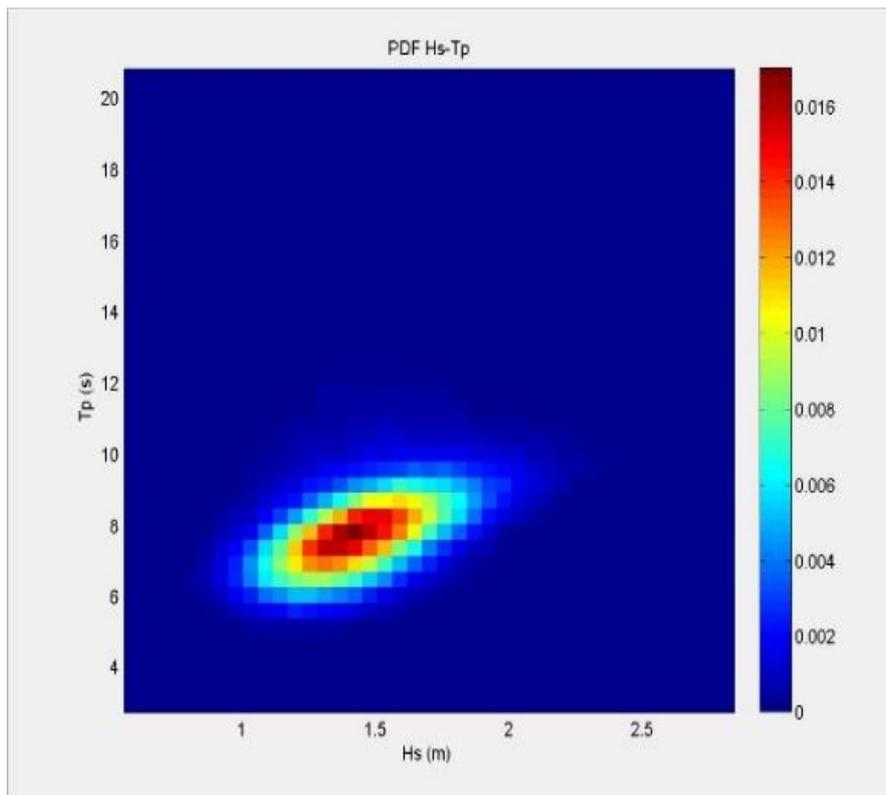
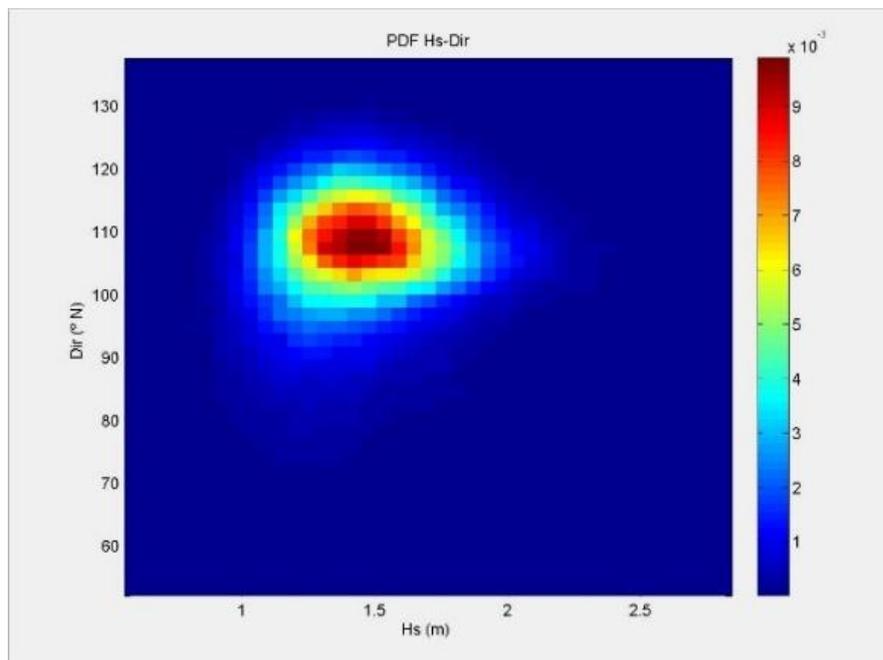
Figura 4.12 Distribuição Conjunta Hs- $T_p$ .

Figura 4.13 Distribuição conjunta Hs-Direção.

A figura 4.13 mostra a distribuição conjunta da altura significativa com a direção incidente. Percebe-se que grande maioria dos eventos ocorreram com uma direção incidente na faixa de  $100^{\circ}\text{N}$  até  $120^{\circ}\text{N}$ , intervalo que está compreendido dentro do quadrante sudeste.

## **4.2. Propagação de Ondas**

A partir desta etapa do trabalho, obteve-se resultados para cada um dos métodos interpoladores. A seguir encontram-se os gráficos que ilustram a distribuição das alturas significativas. As figuras de número 4.14 a 4.29 são os gráficos referentes às propagações dos casos que utilizaram a batimetria interpolada pelo Vizinho Natural. Já as propagações dos casos advindos da batimetria interpolada pela Krigagem estão representadas pelas figuras 4.30 a 4.45.

## PROPAGAÇÃO DE ONDAS – VIZINHO NATURAL

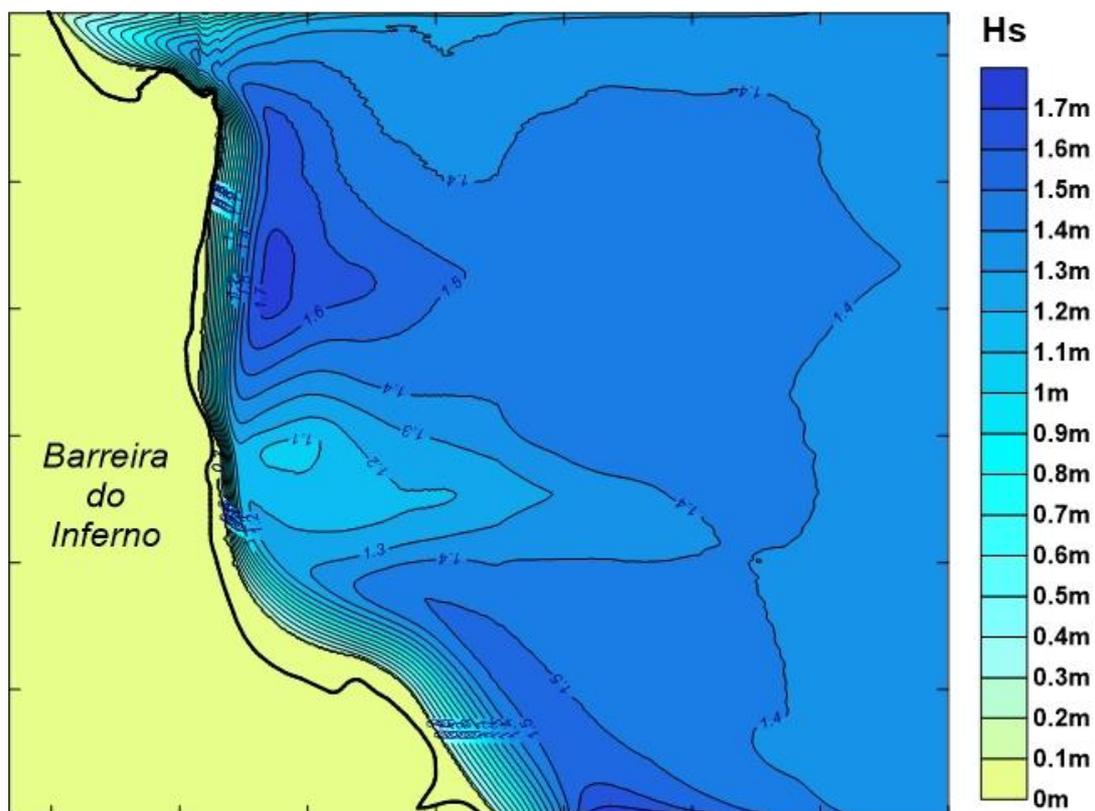


Figura 4.14 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições médias de baixamar (Caso 1) – Vizinho Natural

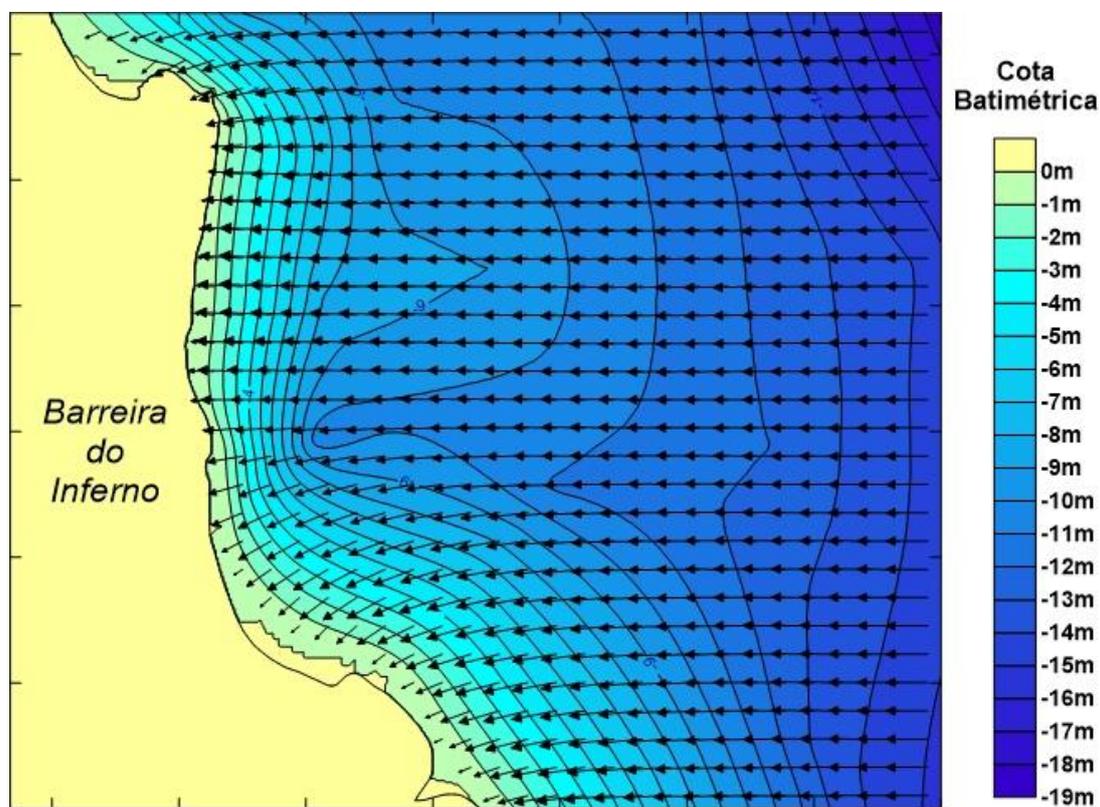


Figura 4.15 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições médias de baixamar (caso1) – Vizinho Natural

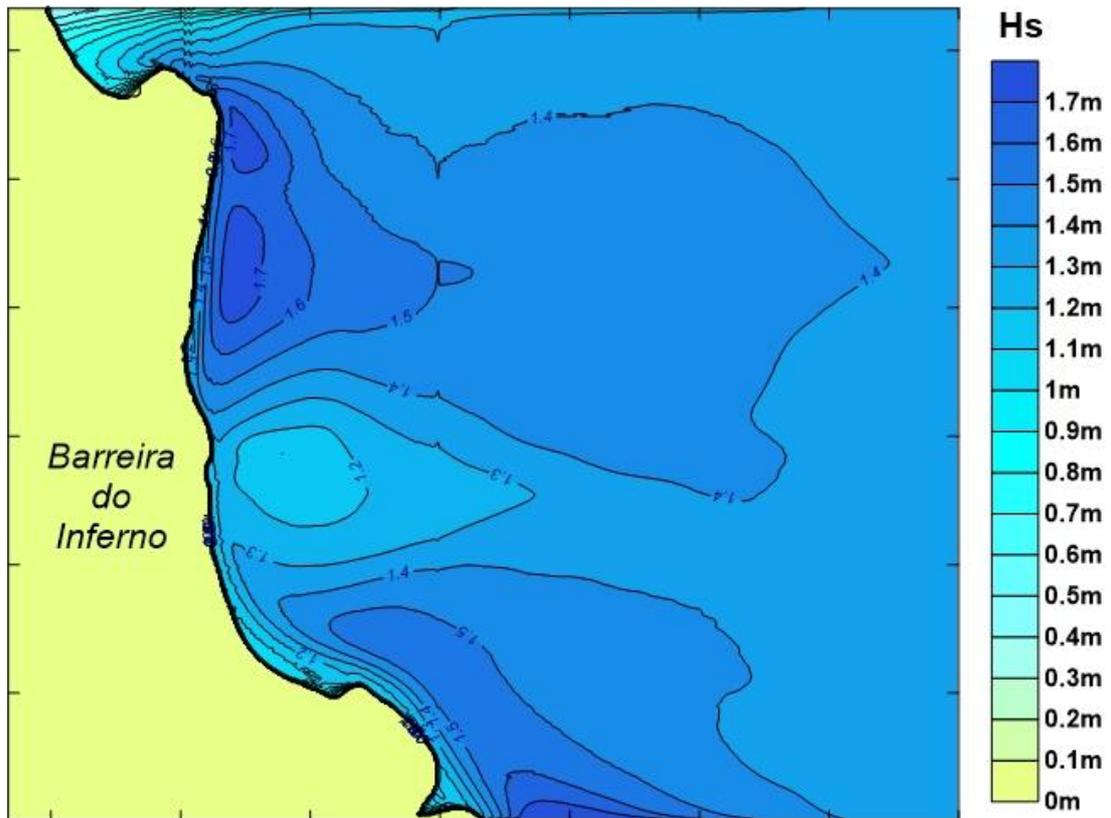


Figura 4.16 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições médias de preamar (Caso 2) – Vizinho Natural

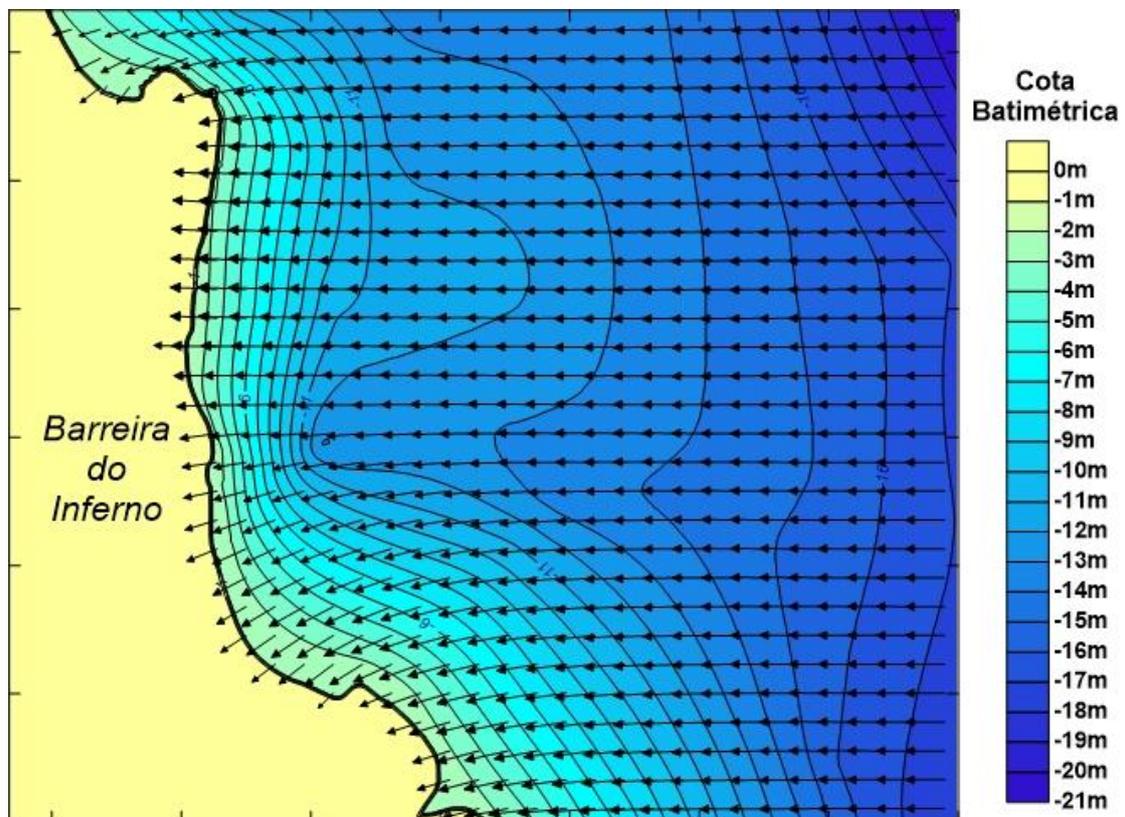


Figura 4.17 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições médias de preamar (caso2) – Vizinho Natural

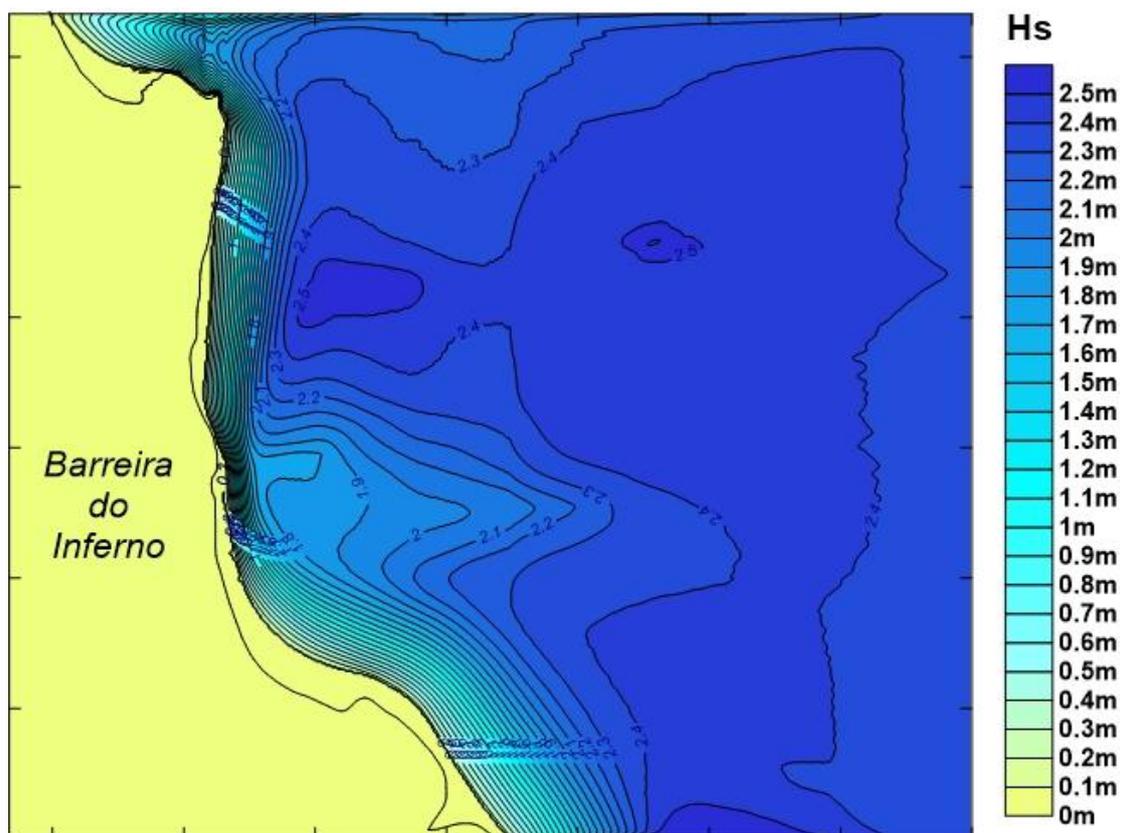


Figura 4.18 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições extremas de baixamar (Caso 3) – Vizinho Natural

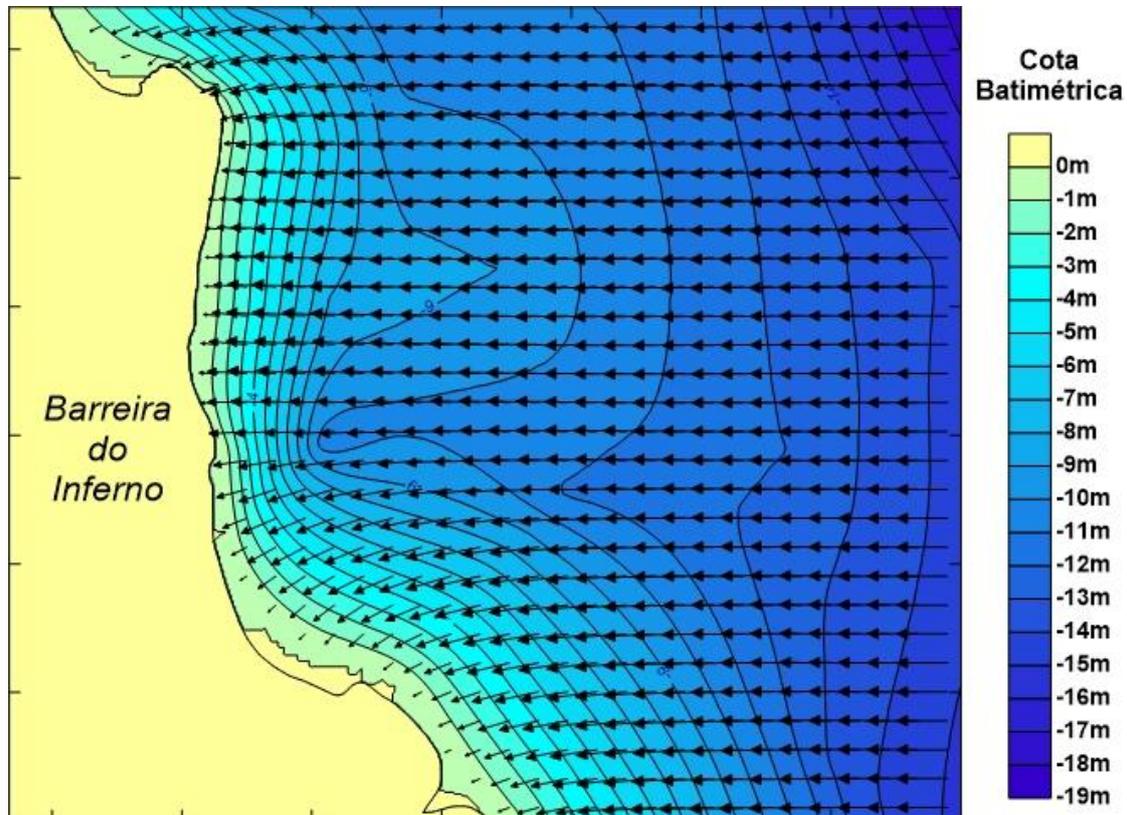


Figura 4.19 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições extremas de baixamar(caso 3) – Vizinho Natural

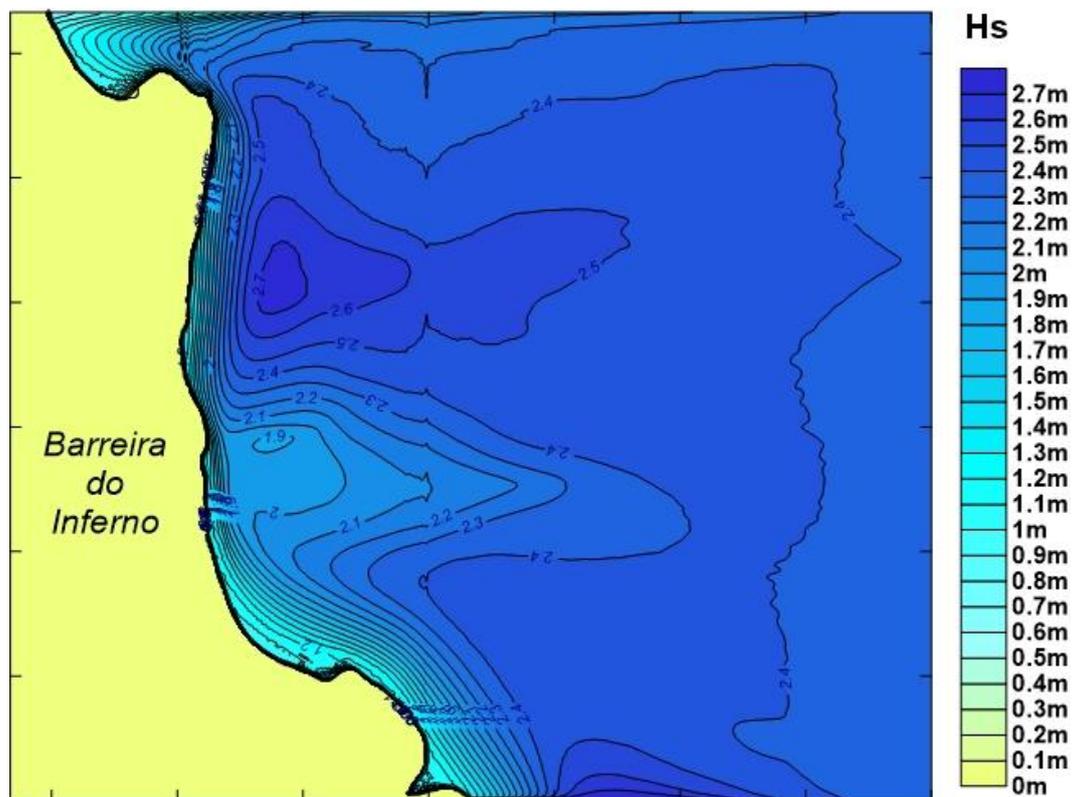


Figura 4.20 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições extremas de preamar (Caso 4) – Vizinho Natural

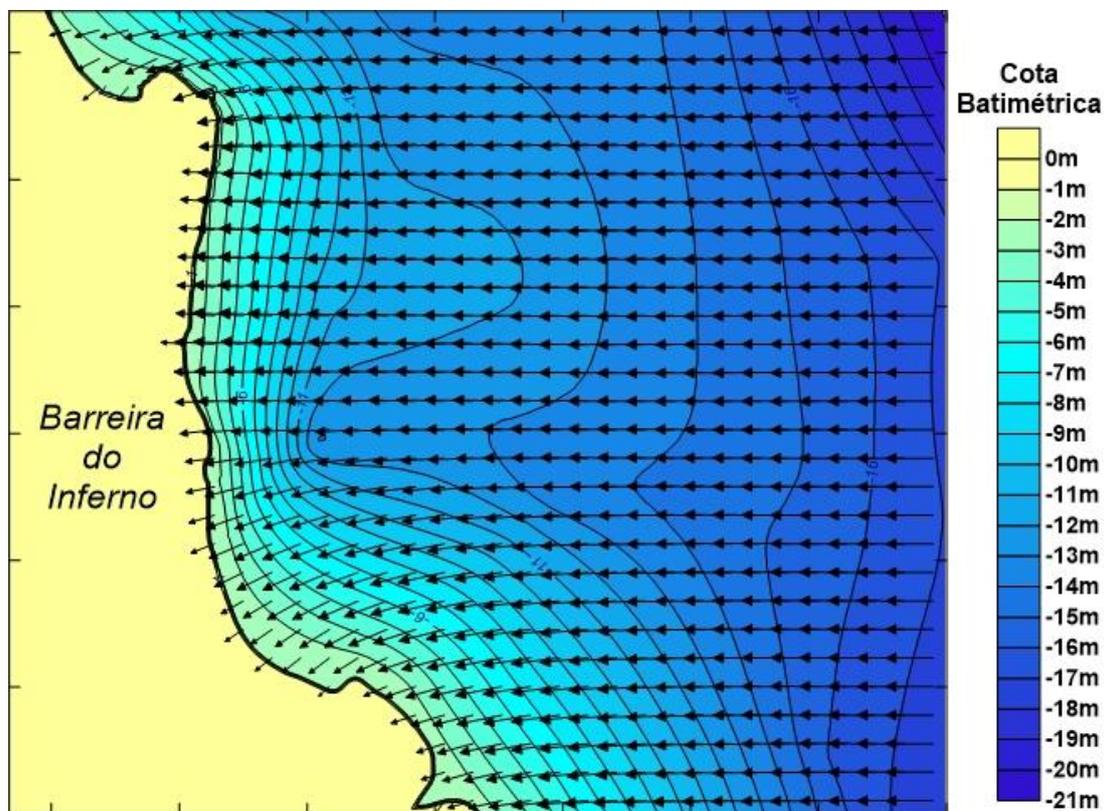


Figura 4.21 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições extremas de preamar (caso 4) – Vizinho Natural

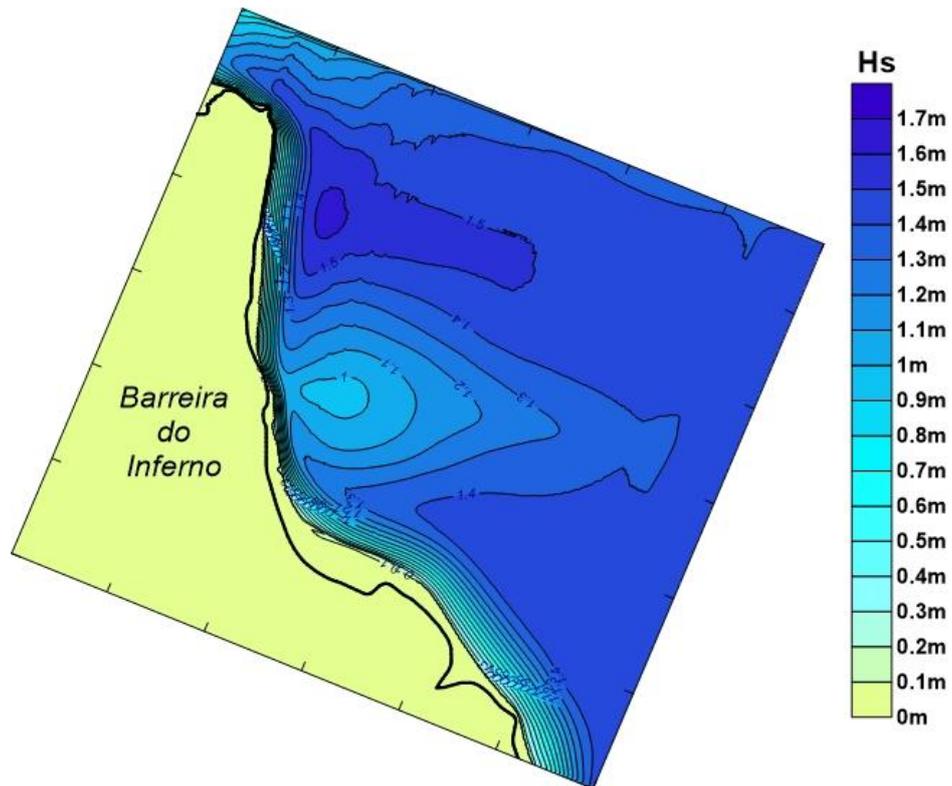


Figura 4.22 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições médias de baixamar (Caso 5) – Vizinho Natural

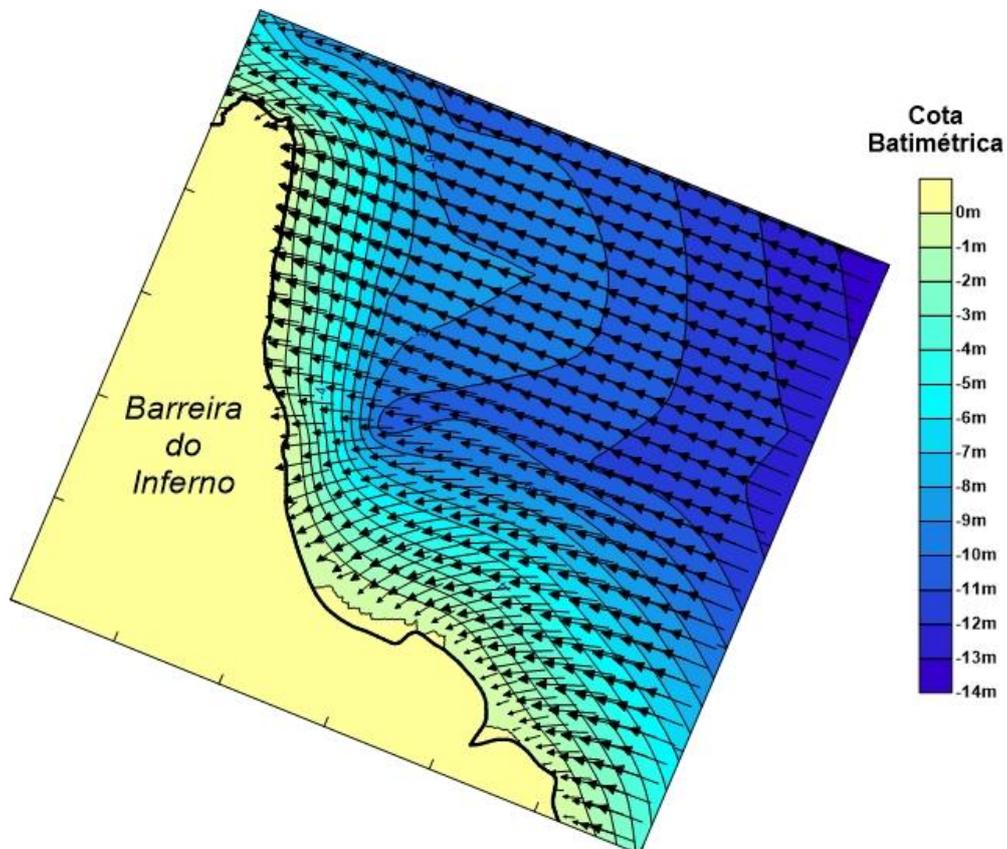


Figura 4.23 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições médias de baixamar (caso 5) – Vizinho Natural

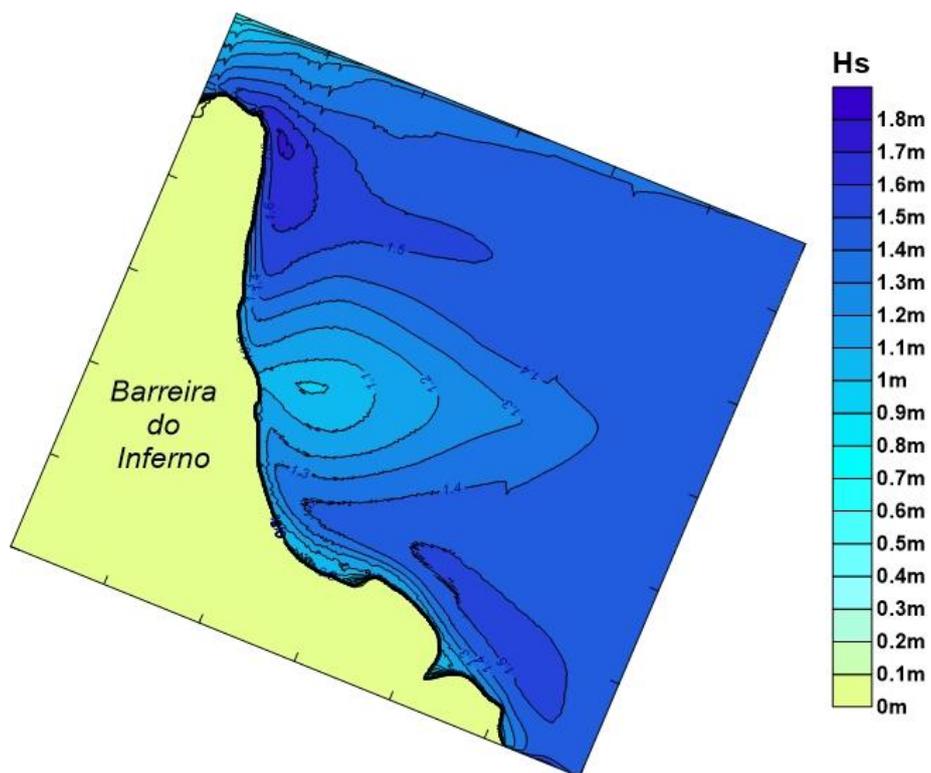


Figura 4. Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições médias de preamar (Caso 6) – Vizinho Natural

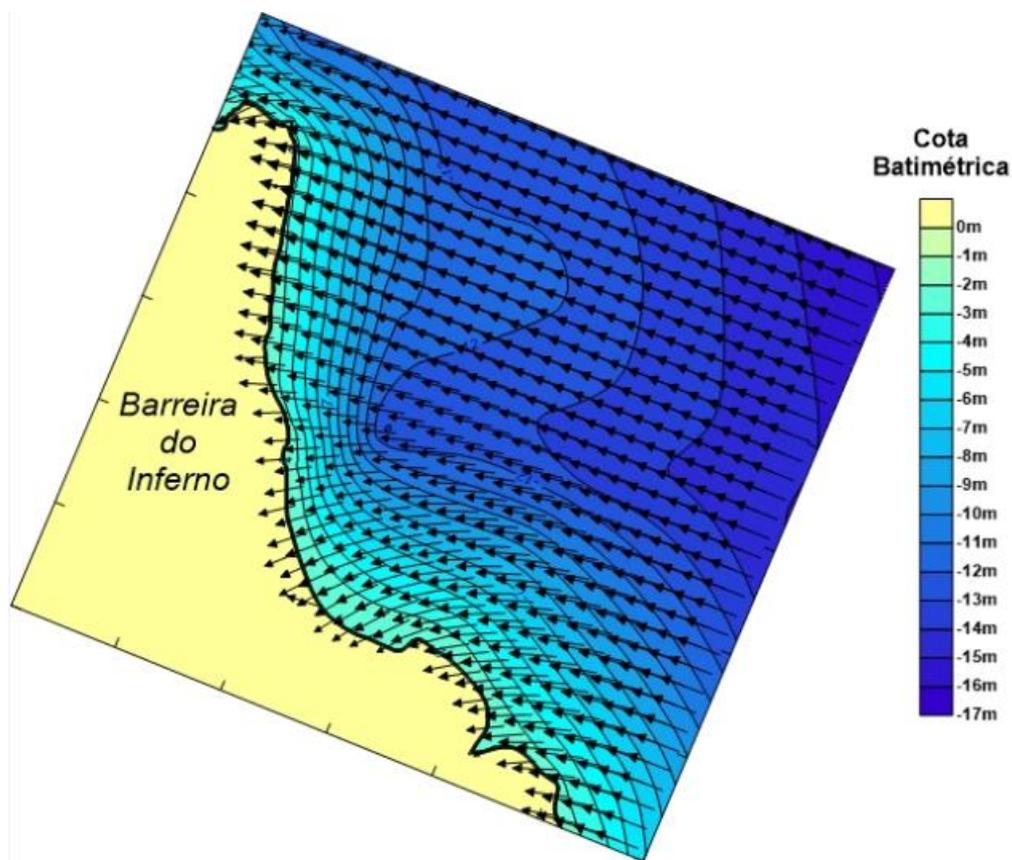


Figura 4.24 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições médias de preamar (caso 6) – Vizinho Natural

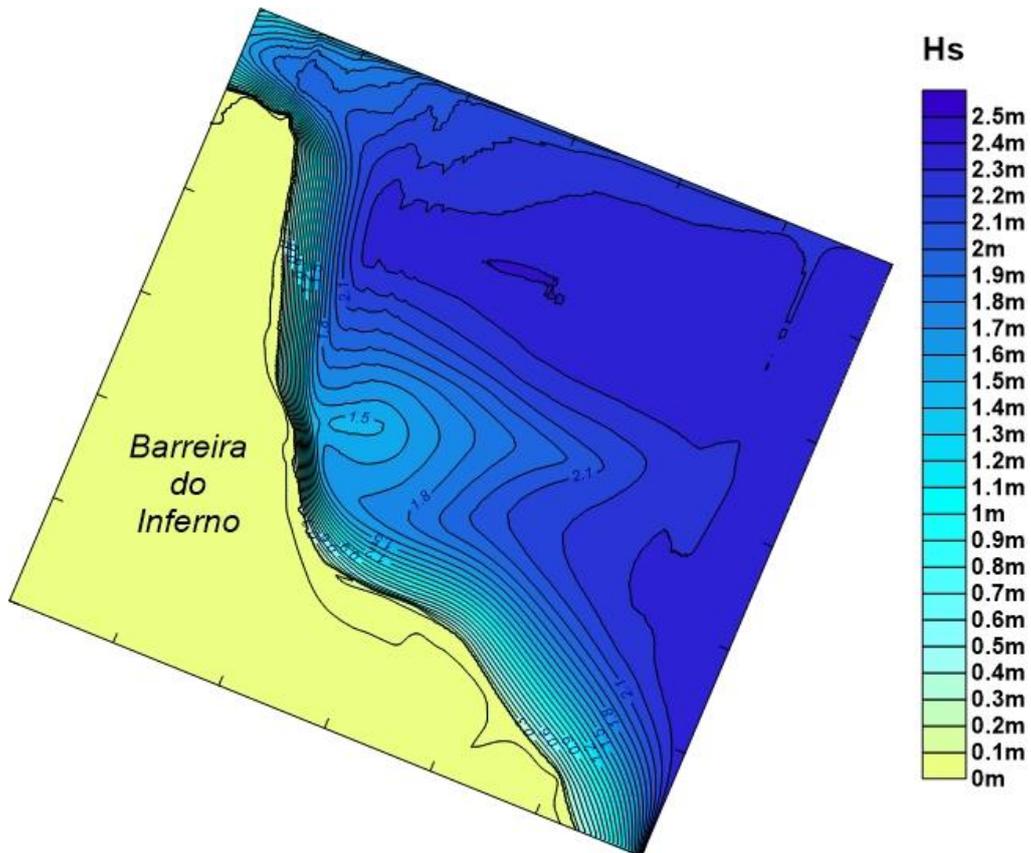


Figura 4.25 Isolinas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições extremas de baixamar (Caso 7)  
– Vizinho Natural

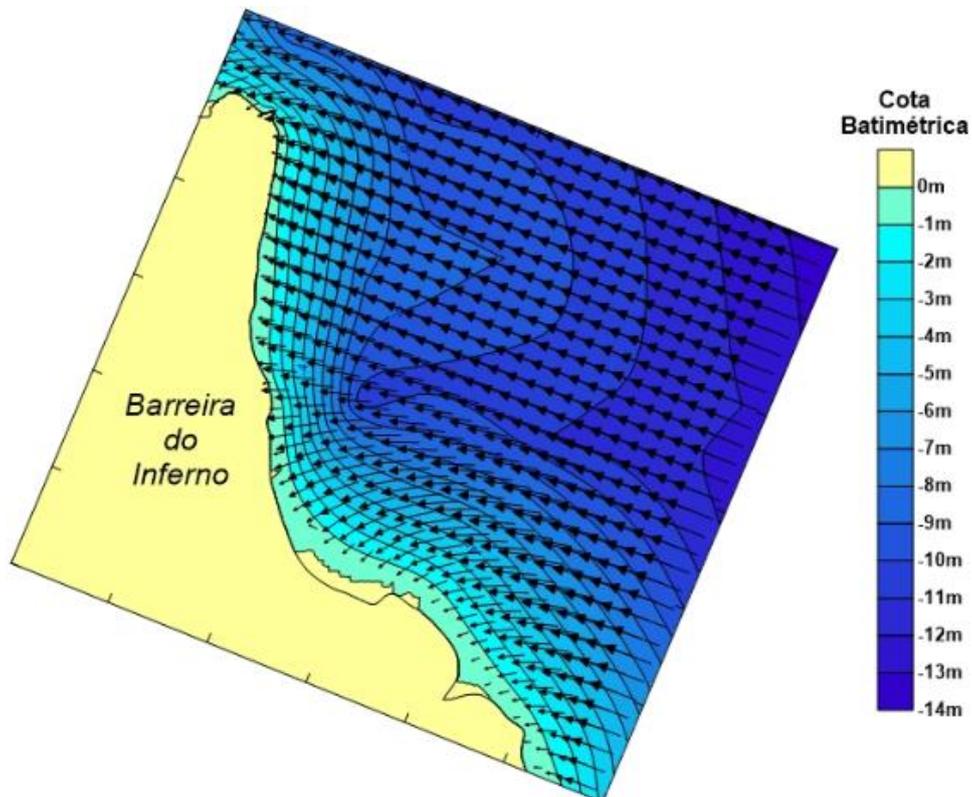


Figura 4.26 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições extremas de baixamar (caso 7) – Vizinho Natural

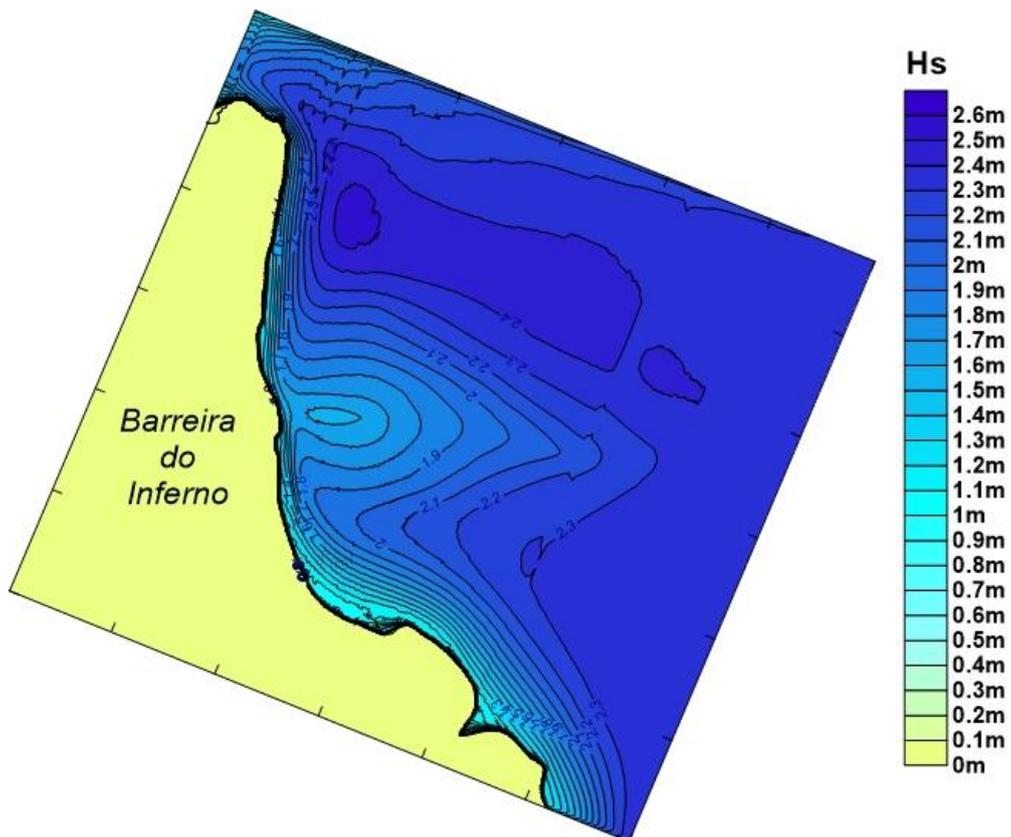


Figura 4.27 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições extremas de preamar (Caso 8)  
– Vizinho Natural

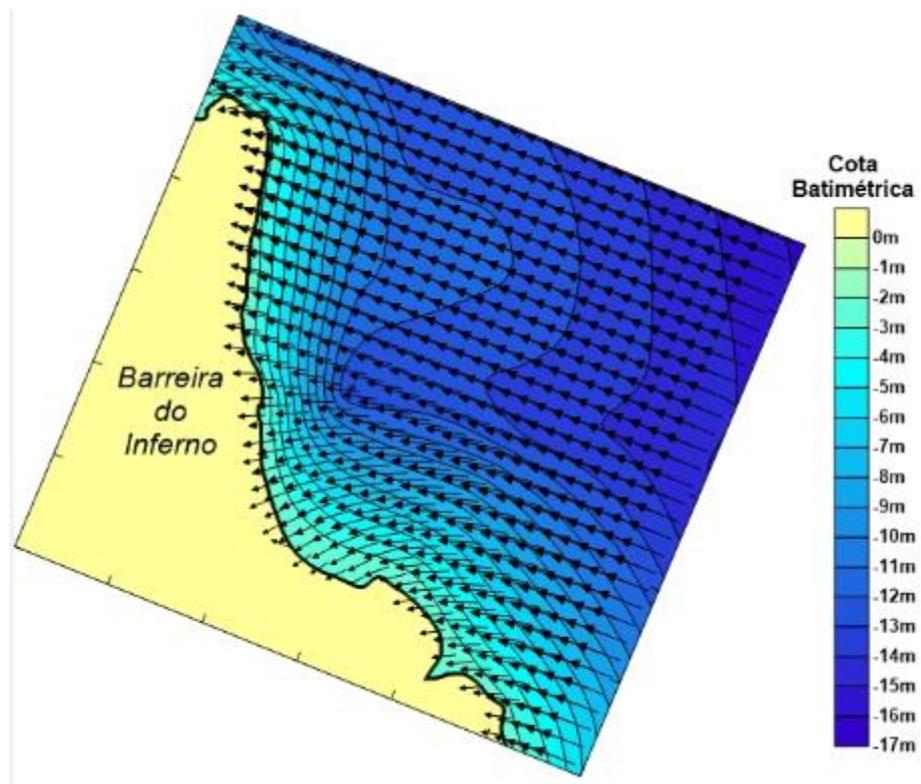


Figura 4.28 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições extremas de preamar (caso 8) – Vizinho Natural

## PROPAGAÇÃO DE ONDAS - KRIGAGEM

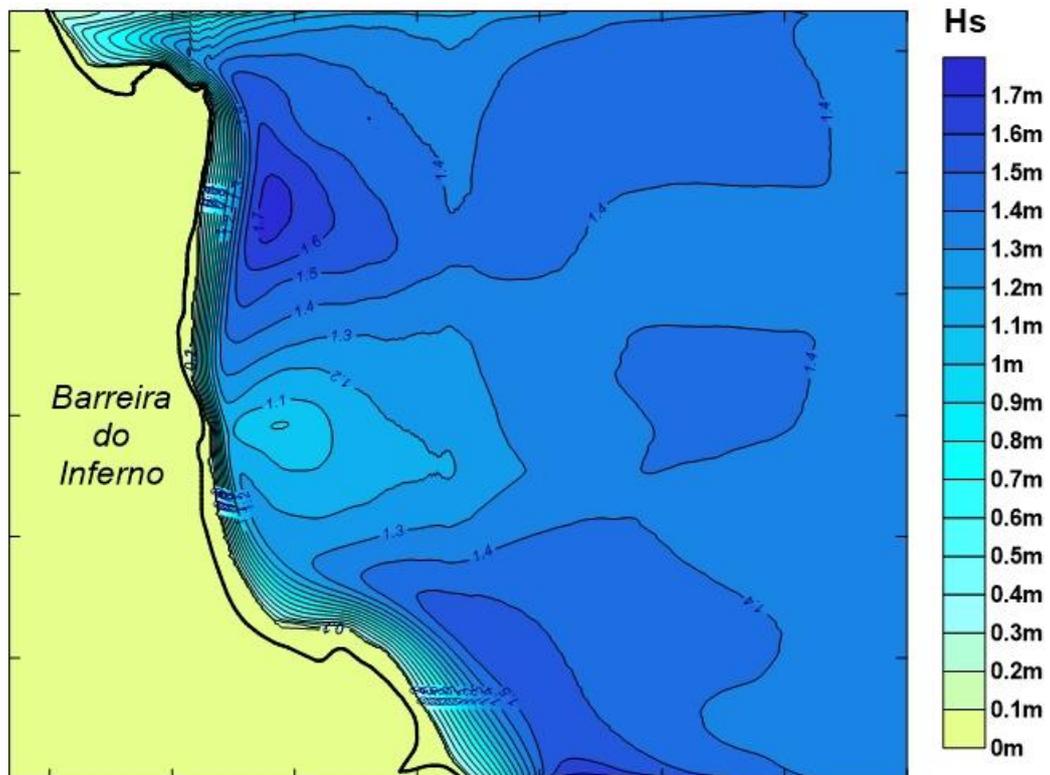


Figura 4.29 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições médias de baixamar (Caso 1) – Krigagem

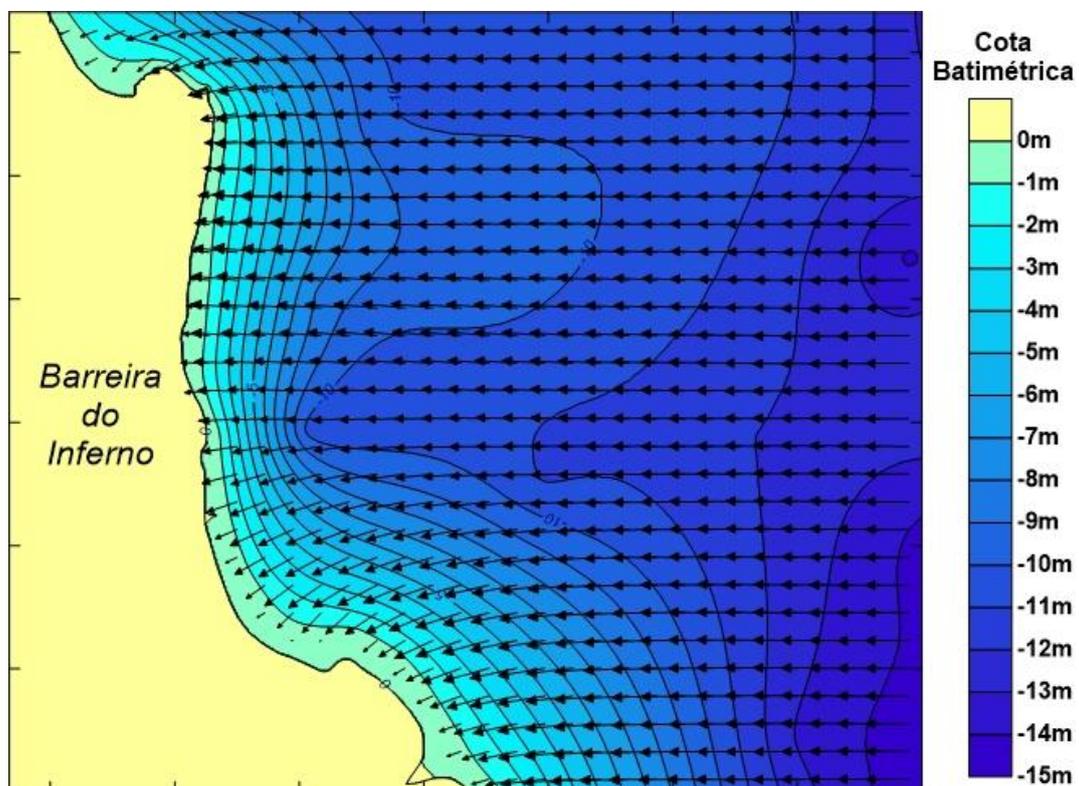


Figura 4.30 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições médias de baixamar (caso 1) – Krigagem

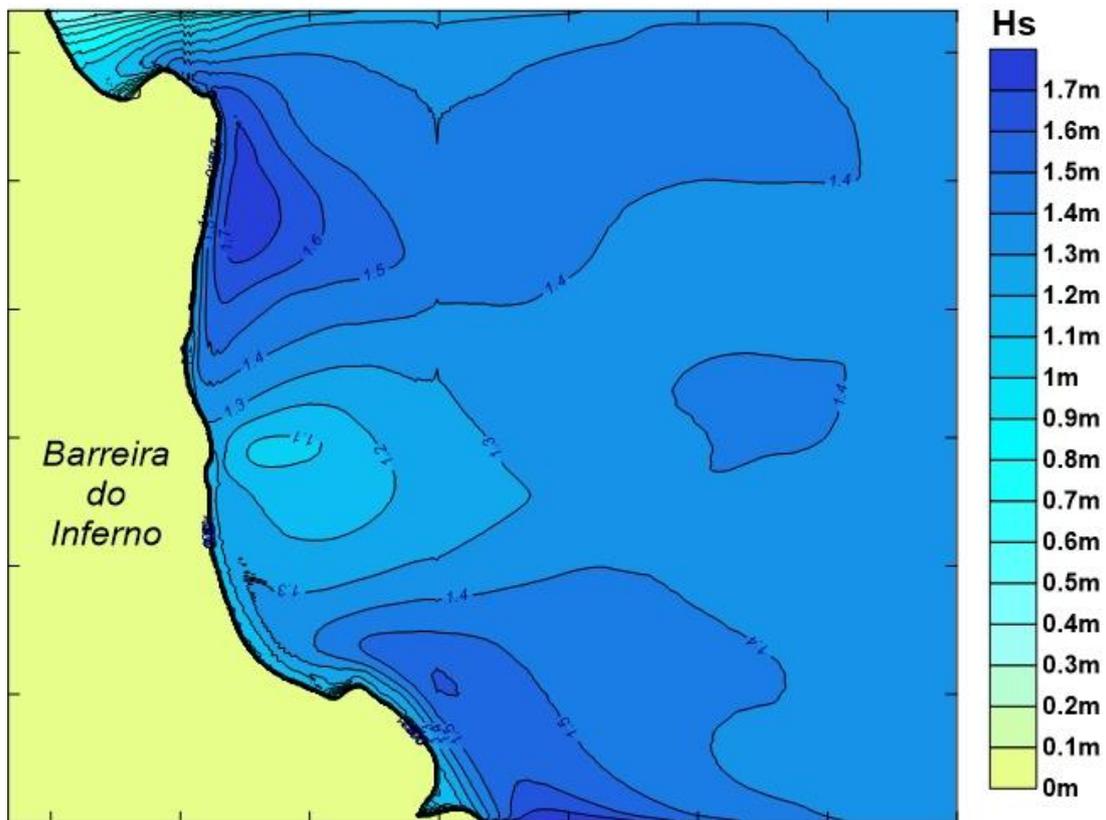


Figura 4.31 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições médias de preamar (Caso 2) – Krigagem

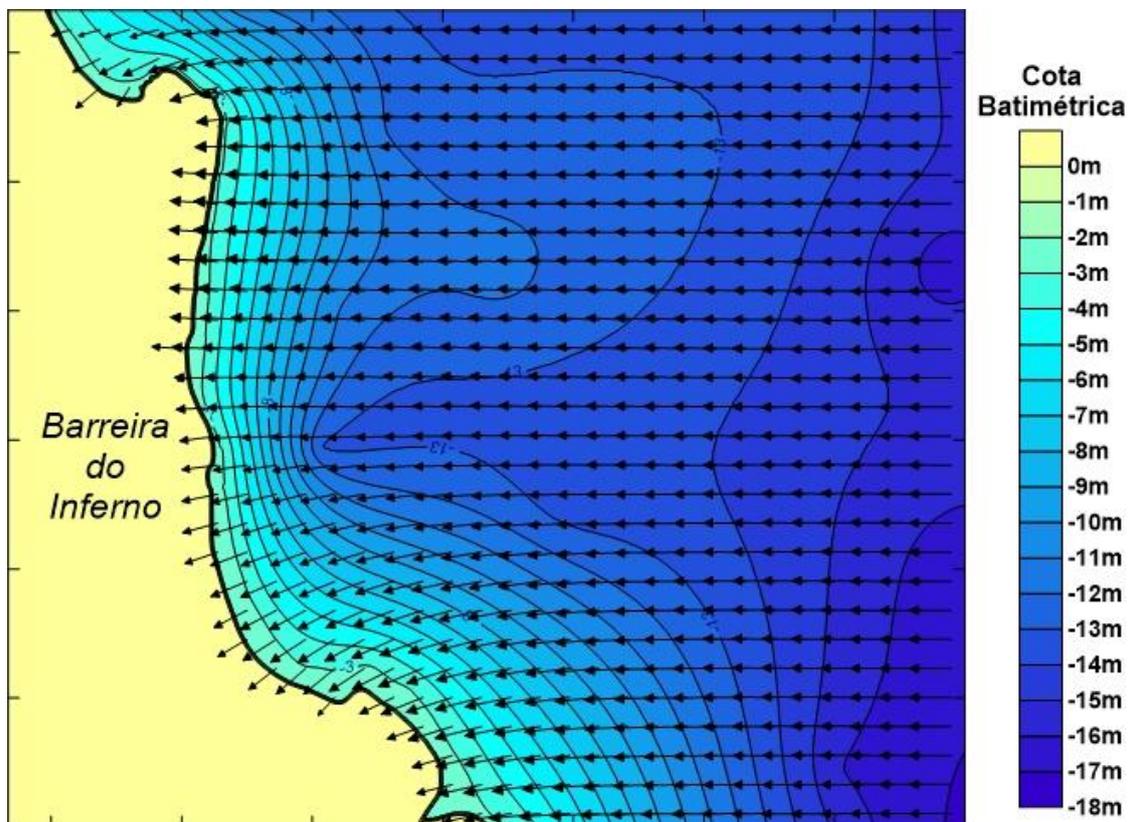


Figura 4.32 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições médias de preamar (caso 2) – Krigagem

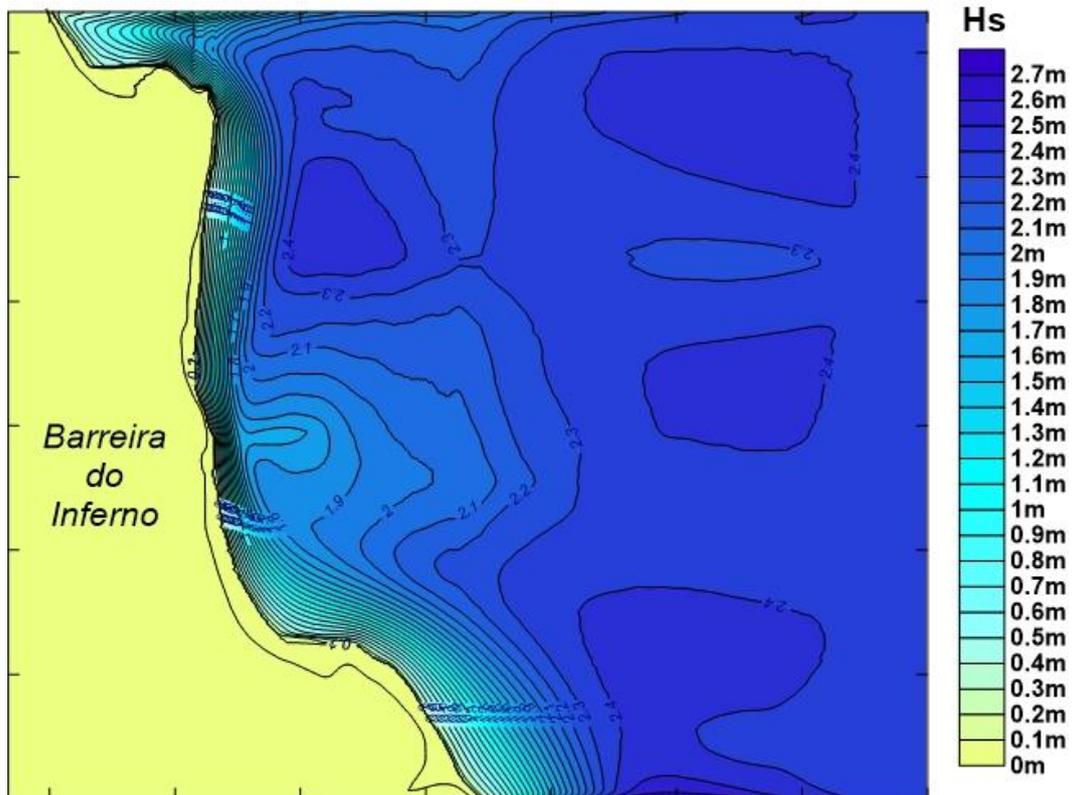


Figura 4.33 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições extremas de baixamar (Caso 3) – Krigagem

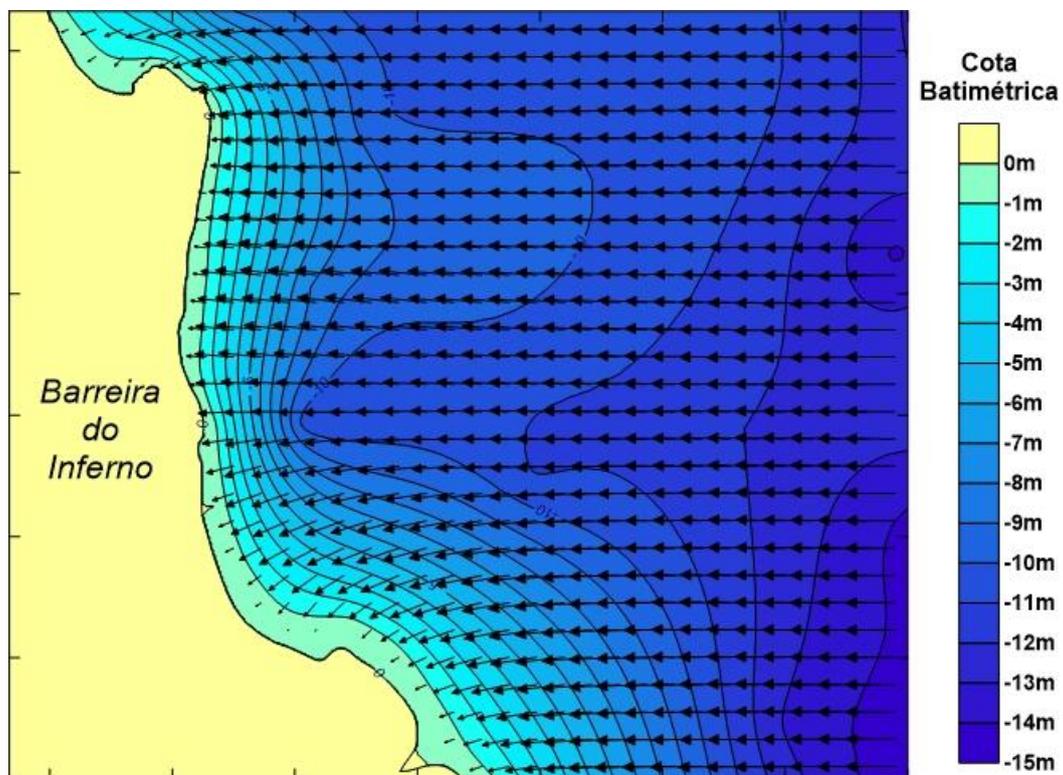


Figura 4.34 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições extremas de baixamar (caso 3) – Krigagem

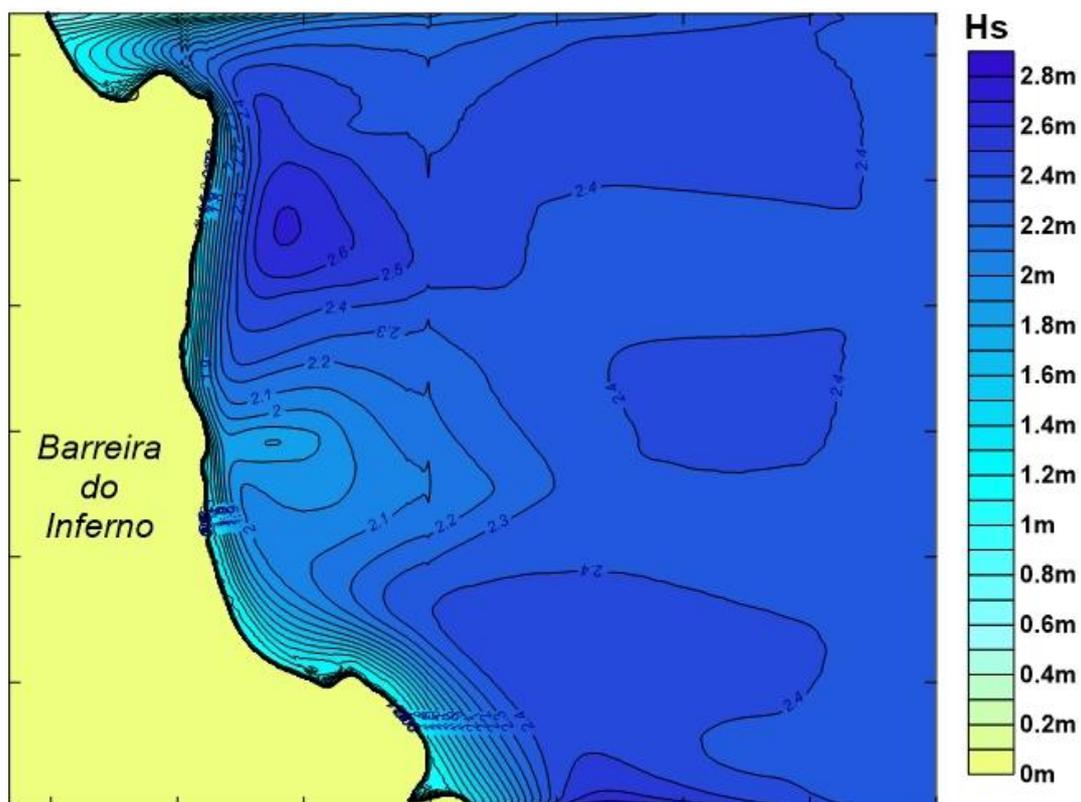


Figura 4.35 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste em condições extremas de preamar (Caso 4) – Krigagem

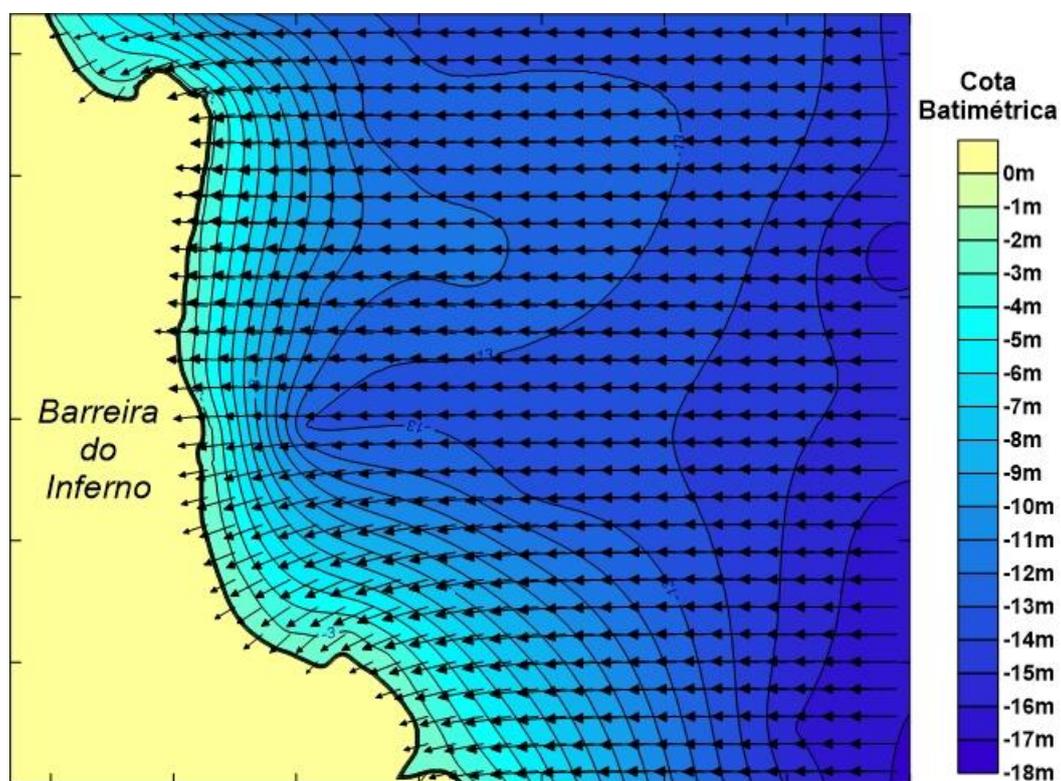


Figura 4.36 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste em condições extremas de preamar (caso 4) – Krigagem

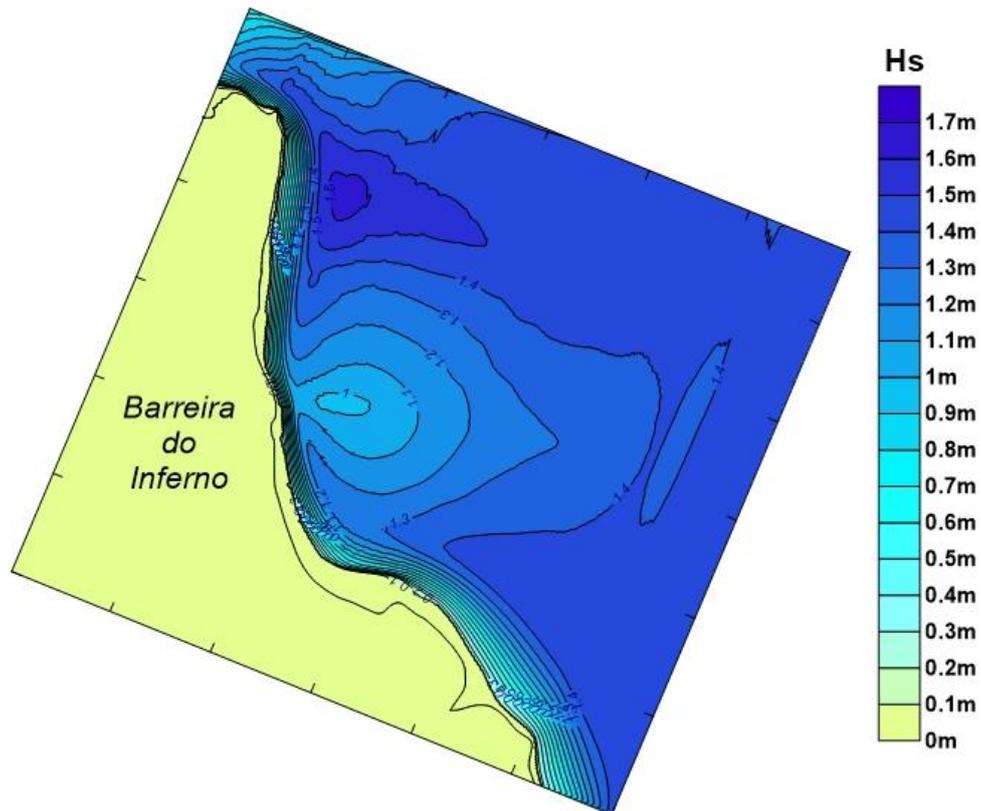


Figura 4.37 Isolinas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições médias de baixamar (Caso 5) – Krigagem

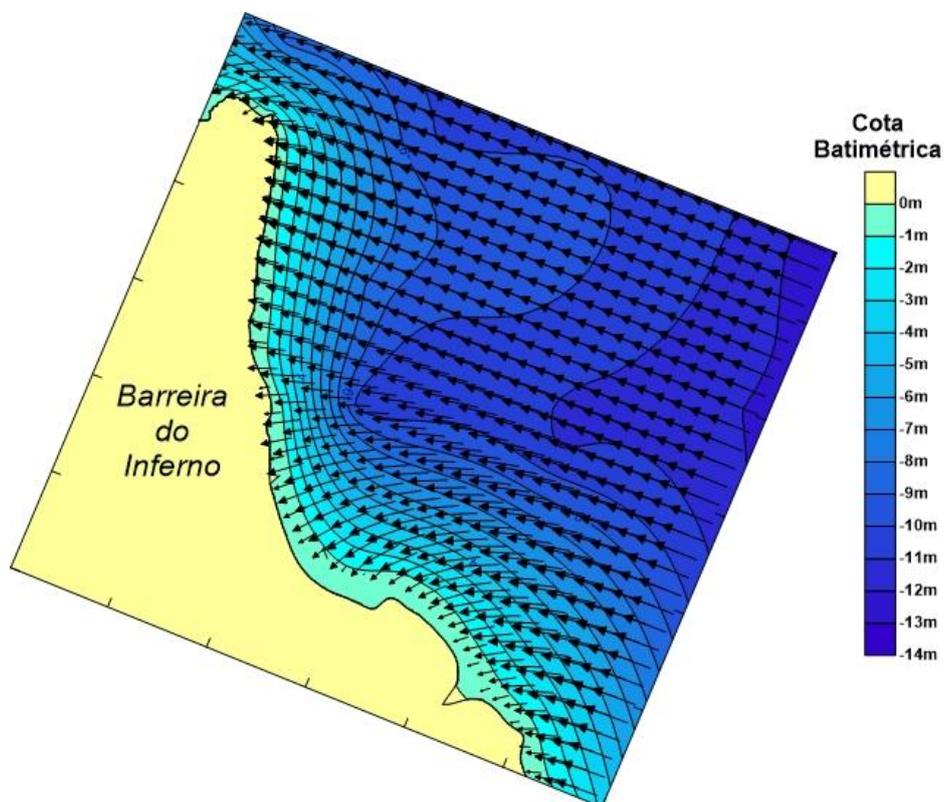


Figura 4.38 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições médias de baixamar (caso 5) – Krigagem

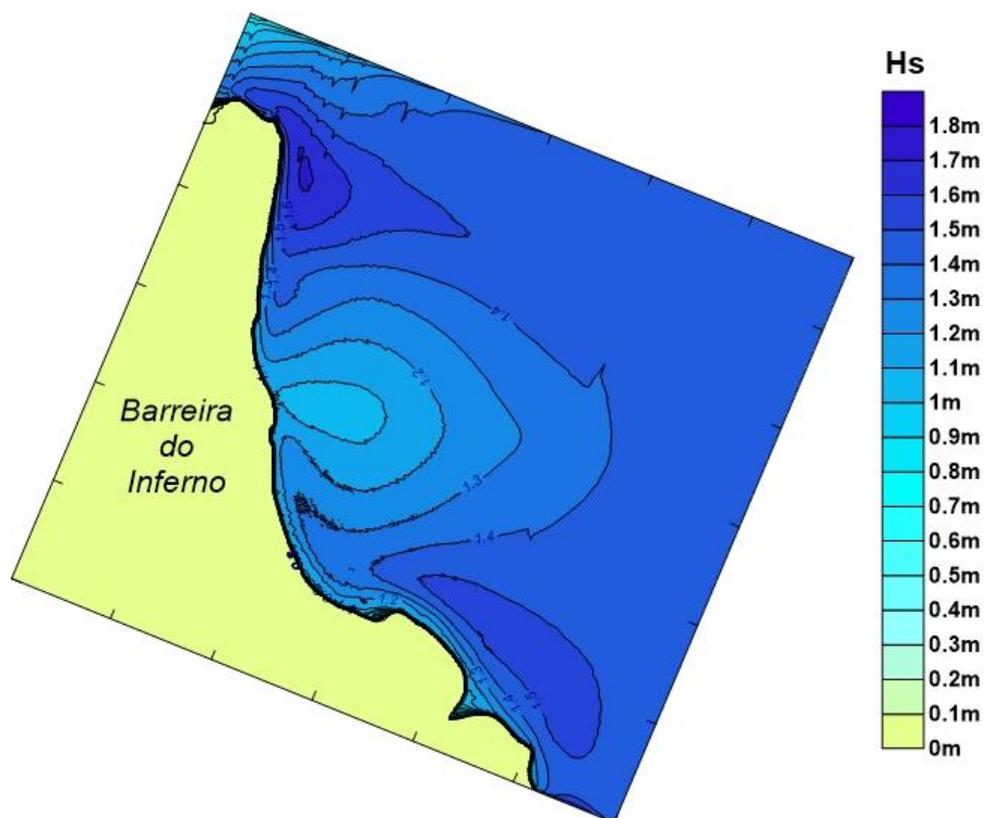


Figura 4.39 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições médias de preamar (Caso 6) – Krigagem

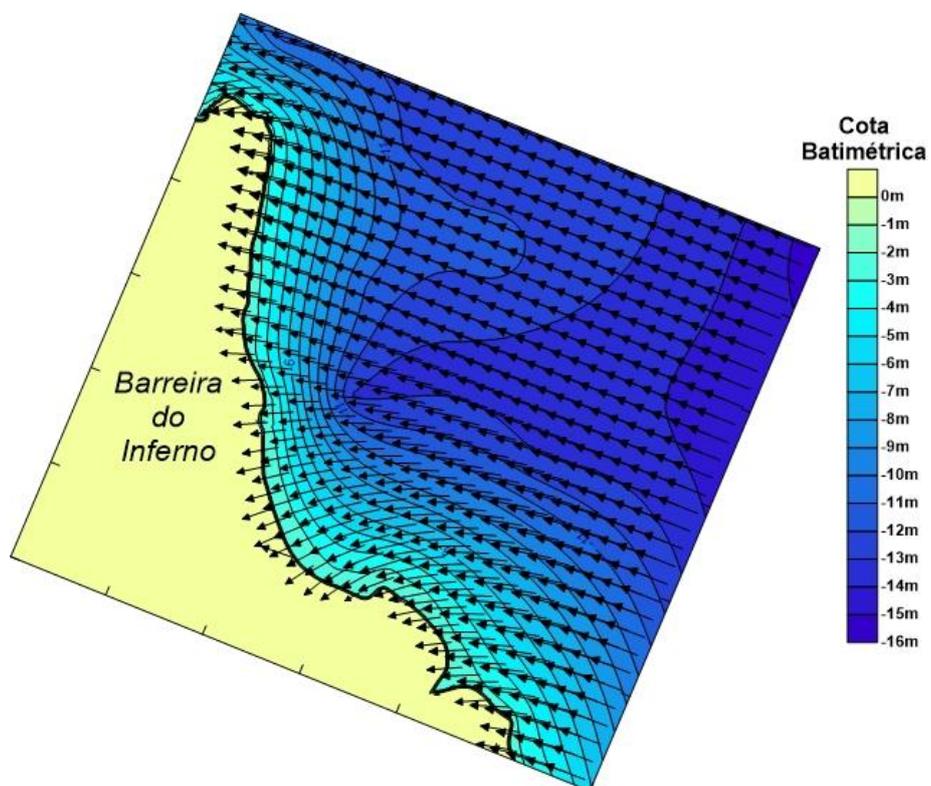


Figura 4.40 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições médias de preamar (caso 6) – Krigagem

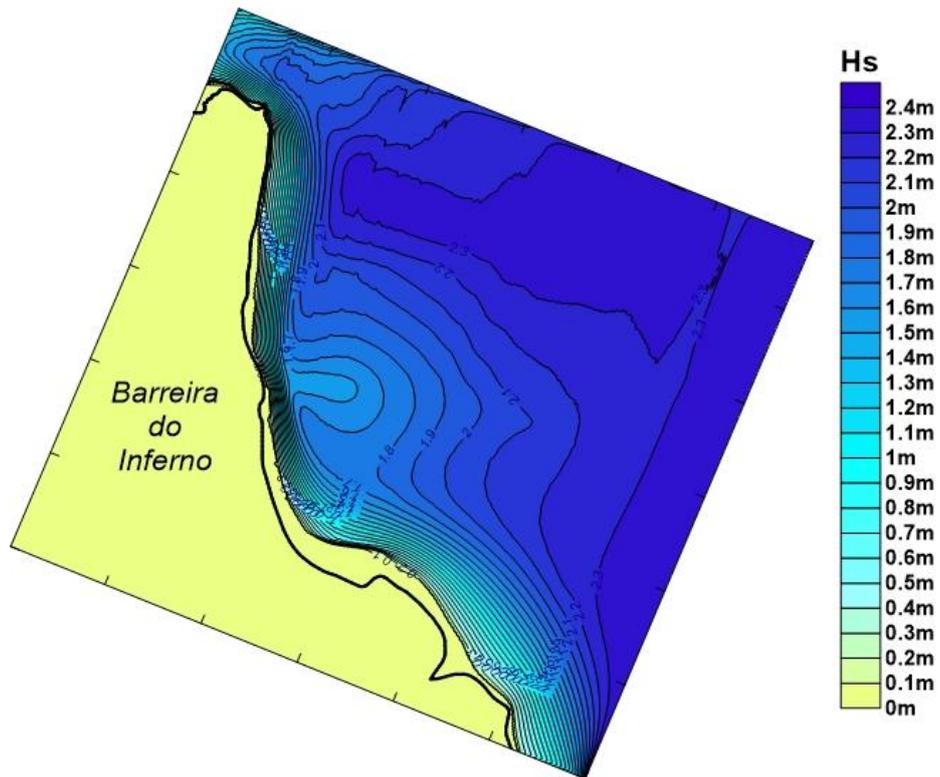


Figura 4.41 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições extremas de baixamar (Caso 7)  
– Krigagem

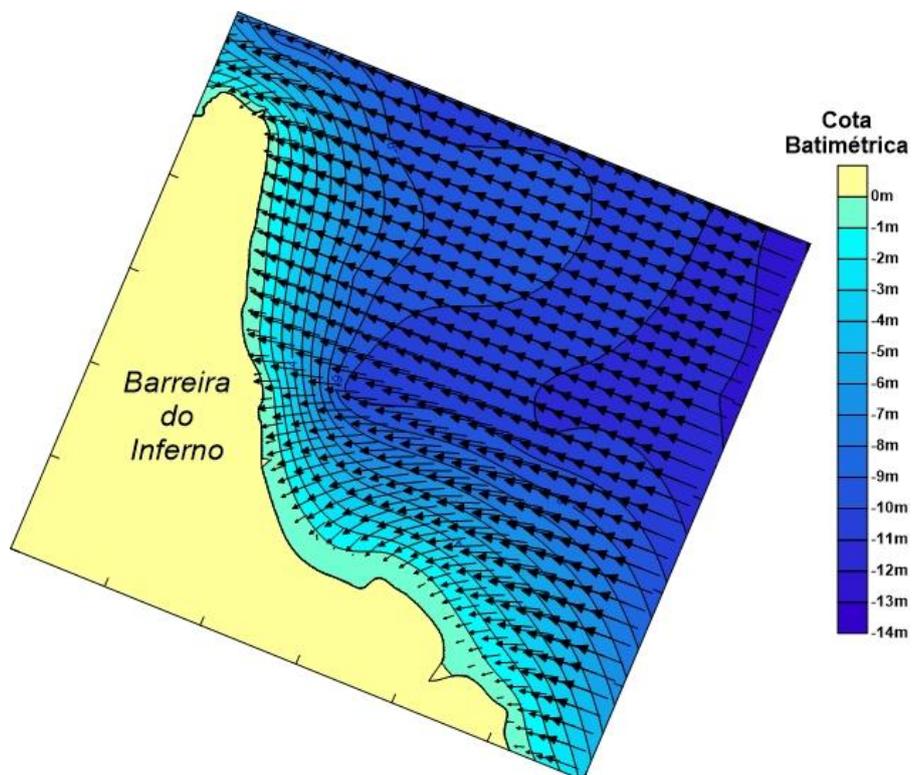


Figura 4.42 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições extremas de baixamar (caso 7) – Krigagem

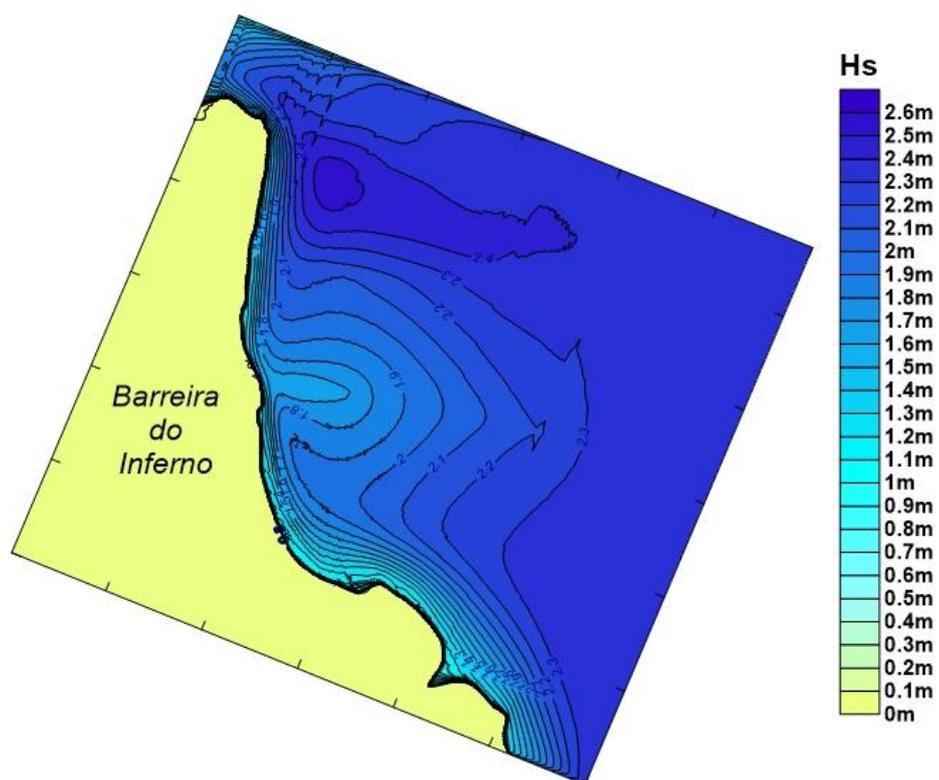


Figura 4.43 Isolinhas de altura significativa das ondas de leste-sudeste em condições extremas de preamar (Caso 8)  
– Krigagem

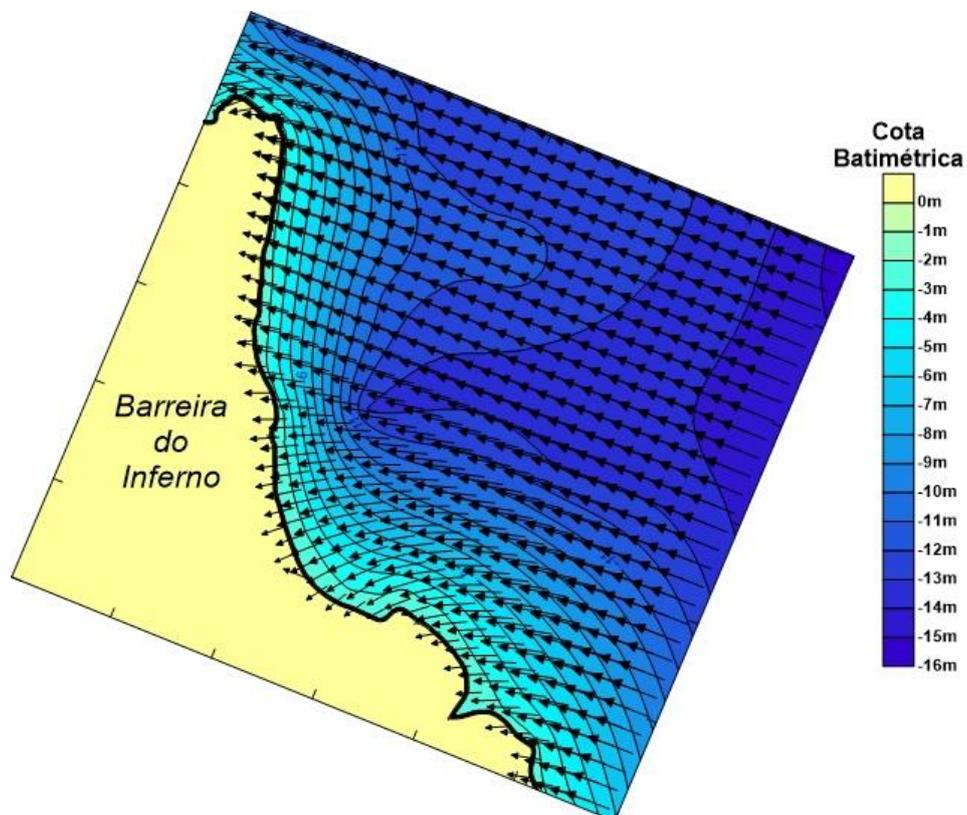


Figura 4.44 Vetores de altura significativa e topografia – Ondas de leste-sudeste em condições extremas de preamar  
(caso 8) – Krigagem

#### **4.2.1. Análise da Propagação de Ondas**

Para todos os casos, a região norte da praia da Barreira do Inferno foi a que mostrou os maiores valores de altura, de 1,7m em condições médias de baixamar chegando até valores superiores a 2,7m nos casos de condições extremas de preamar. Esse fato pode ser justificado pelas maiores profundidades da praia estarem na região norte da praia bem como uma maior declividade percebida em visita de campo. Já a região sul da praia, por ter uma conformação mais branda e rasa, apresentou os menores valores de altura de onda, variando de 1 até 2m analisando-se da mesma maneira que a região norte.

Ao se comparar as propagações obtidas no tocante ao método utilizado, pode-se perceber que existe semelhança entre os gráficos de isolinhas  $H_s$  para o largo da praia. Por exemplo, ambos os métodos mostraram que a tendência de maiores alturas de onda se dá na fração norte da praia, já o trecho sul apresenta os menores valores de altura de onda. Entretanto, a propagação advinda do método da Krigagem permitiu notar o efeito das cúspides praias sobre a altura significativa ao longo da linha de costa. A Krigagem, portanto, permitiu uma propagação de maior sensibilidade a partir da zona de arrebentação.

O fato de a Krigagem ter percebido a existência de cúspides praias, principalmente ao Sul da praia, levantou a hipótese de que esse método interpolador apresentaria melhores resultados no cálculo do transporte longitudinal de sedimentos.

#### **4.3. Correntes**

A seguir, seguem as propagações das correntes associadas à magnitude do vetor velocidade para alguns dos casos dos regimes médio e de tempestade.

Devido à semelhança entre os gráficos de corrente gerados para todos os casos, analisou-se somente dois casos de cada direção predominante (dois casos de E e dois casos de ESE). Foram selecionados, para cada método interpolador, os casos 2, 3, 6 e 7. Respectivamente, esses são os casos de condições médias de preamar e condições extremas de baixamar para a direção E e os casos de condições médias de preamar e condições extremas de baixamar para a direção ESE.

## CORRENTES - VIZINHO NATURAL

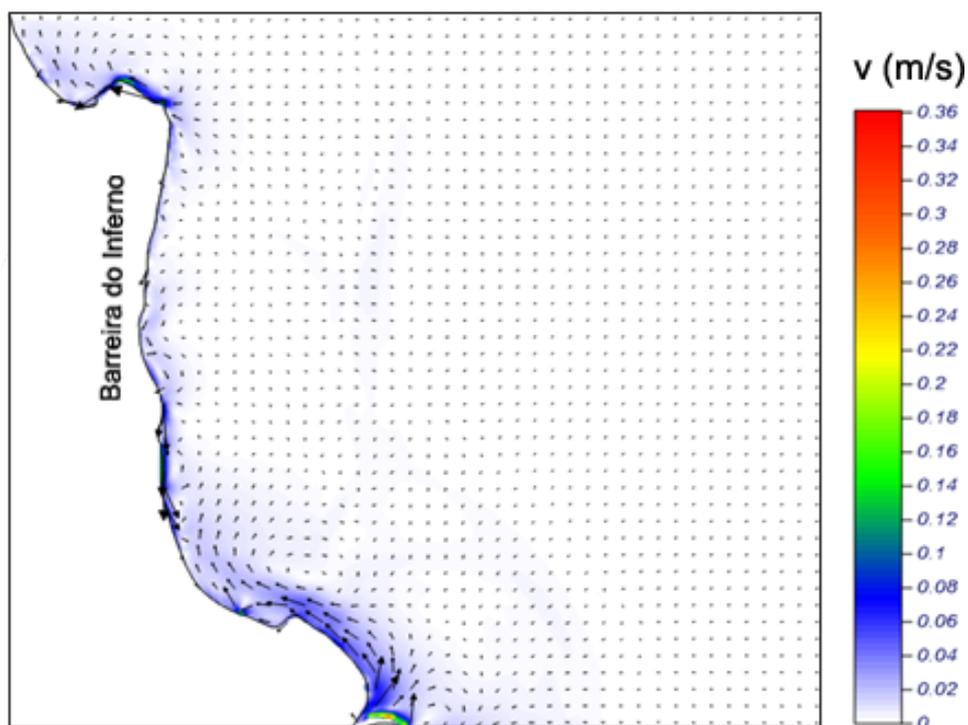


Figura 4.45 Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 2) – Vizinho Natural

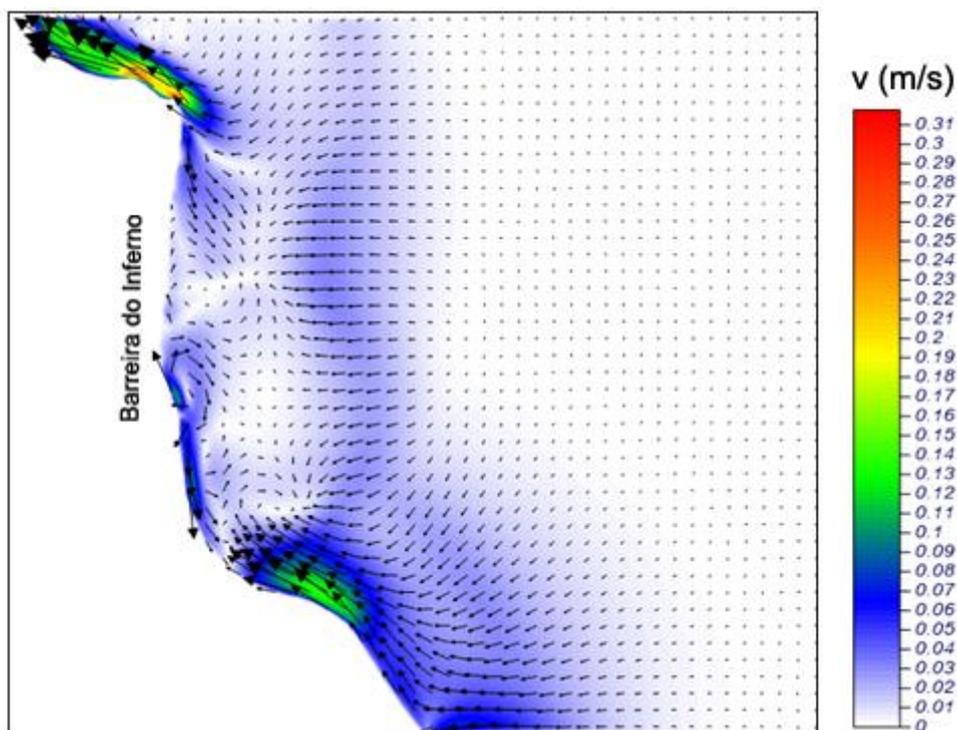


Figura 4.46 Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 3) – Vizinho Natural

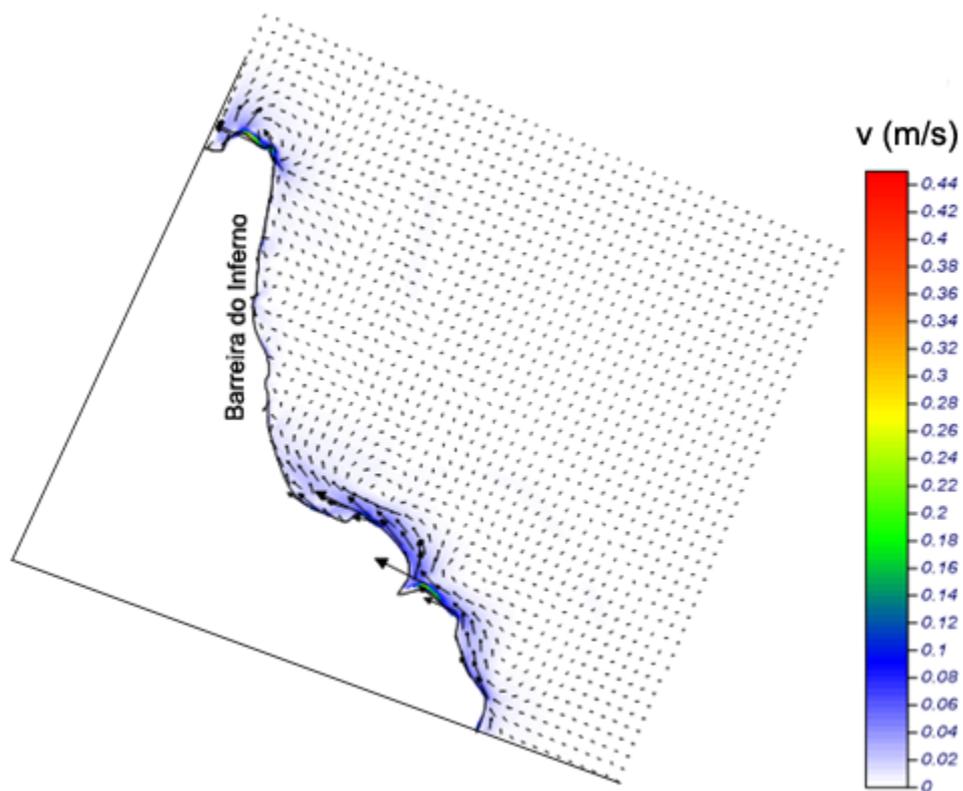


Figura 4.47 Correntes em condições médias de preamar – Direção ESE (caso 6) – Vizinho Natural

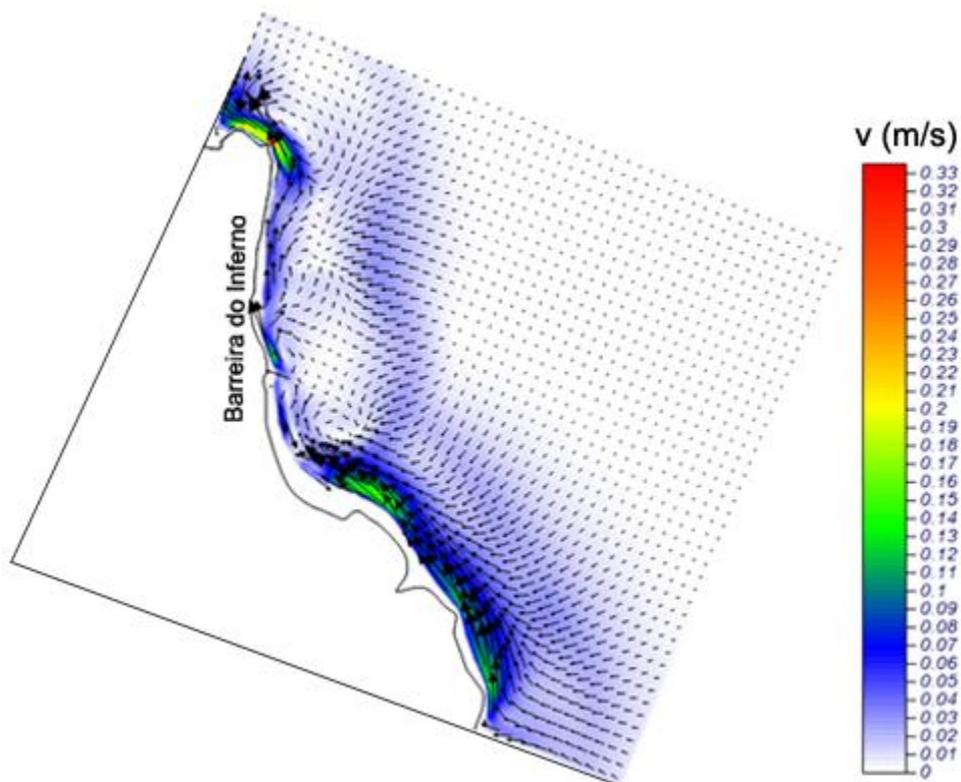


Figura 4.48 Correntes em condições de tempestade de baixamar – Direção ESE (caso 7) – Vizinho Natural

## CORRENTES - KRIGAGEM

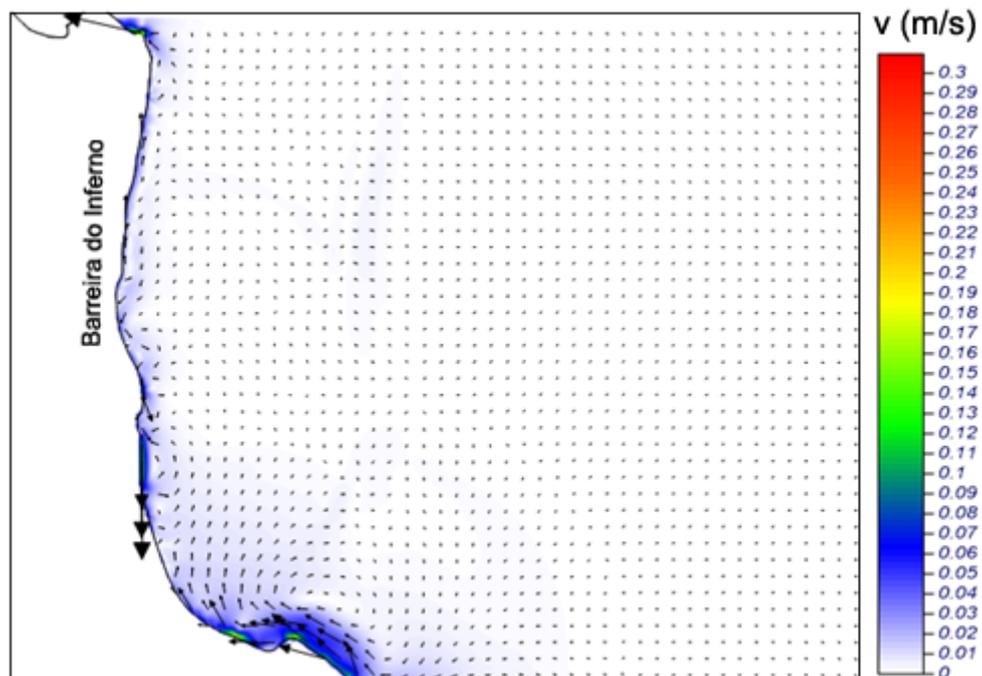


Figura 4.49 Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 2) – Krigagem

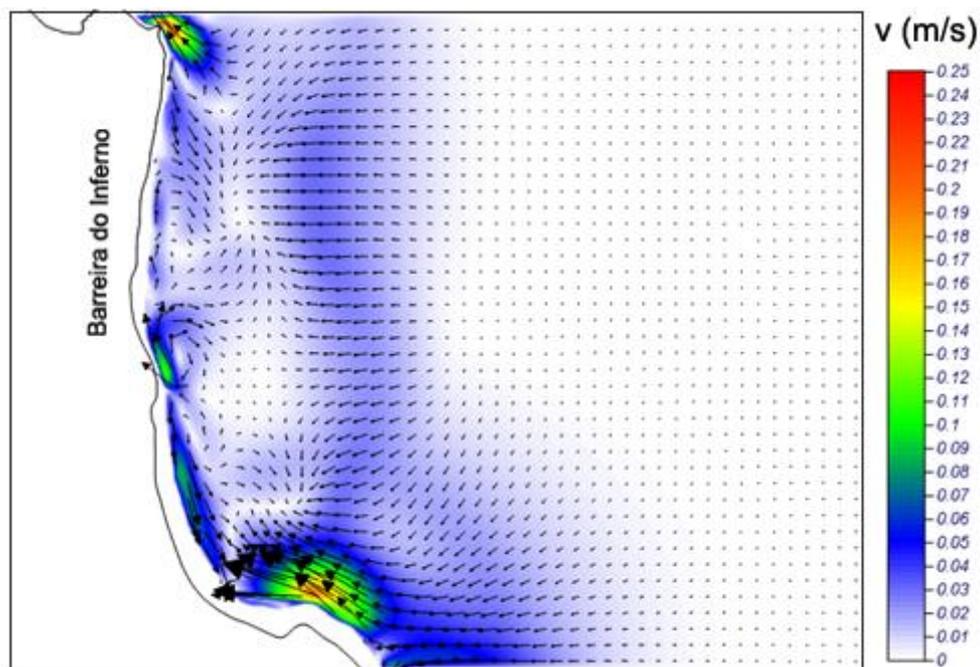


Figura 4.50 Correntes em condições médias de preamar – Direção E (caso 3) – Krigagem

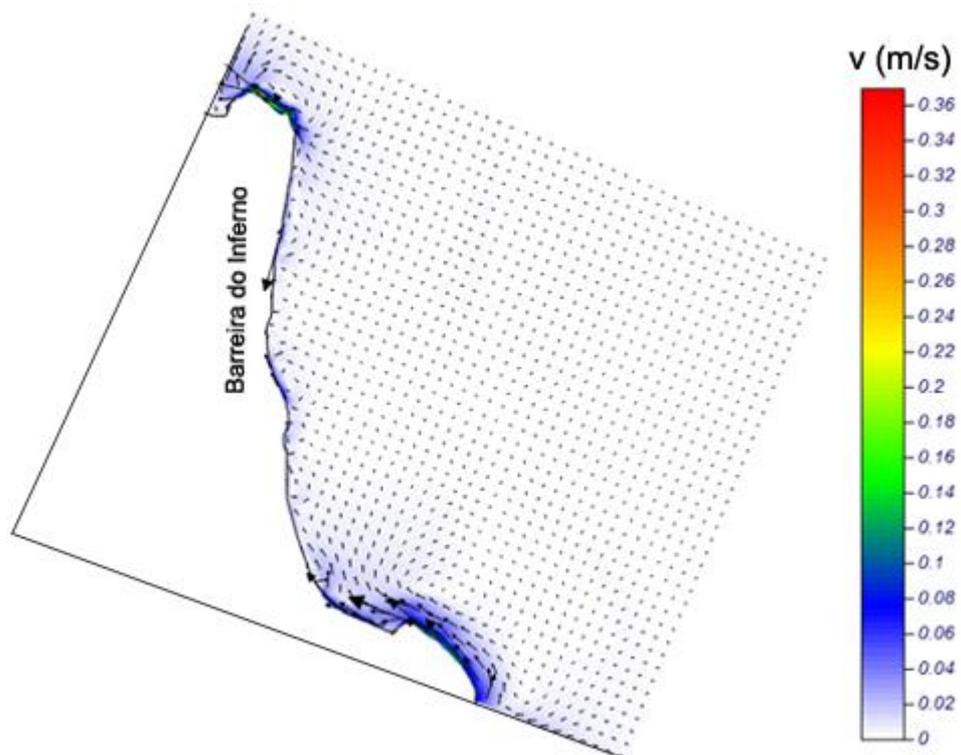


Figura 4.51 Correntes em condições médias de preamar–Direção ESE (caso6) – Krigagem

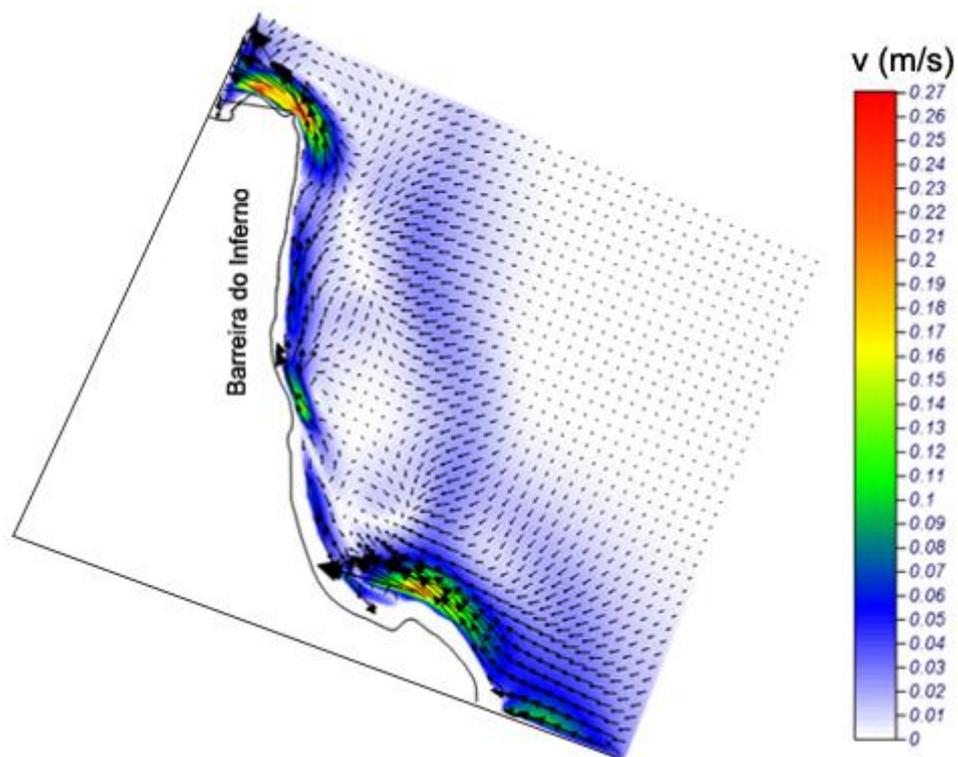


Figura 4.52 Correntes em condições de tempestade de baixamar – Direção ESE (caso 7) – Krigagem

#### 4.3.1. Análise das Correntes

Embora no trecho ao sul do afloramento das falésias apresente uma corrente de sentido N-S em todos os casos simulados, os casos mostraram a predominância de correntes longitudinais de sentido S-N. Essa maior tendência de correntes de sentido S-N se mostra tanto pela extensão desse sentido ao longo da praia quanto pela magnitude, que é superior às correntes de sentido N-S.

As correntes de maior magnitude se concentraram no sul da praia, que podem se justificar pelo fato de, na região sul, existirem cúspides praias. Também há um registro de aumento de velocidade das correntes na divisa entre a praia da Barreira do Inferno e a praia de Ponta Negra (limite norte da praia da Barreira do Inferno). Esta região é marcada pela presença de *arenitos de praia*, os quais não são representados pela batimetria apresentada pela carta náutica 22100. Portanto, embora se saiba que a região possui menores profundidades, não se pode afirmar que as correntes ganham velocidade significativamente pois a grande quantidade de *arenitos de praia* pode fornecer grande perda de energia ao escoamento.

Todos os casos mostraram que as correntes tem um ponto de convergência no sul da praia. Há um indicativo de tendência erosiva nesse ponto a partir de correntes resultantes desse trecho de convergência. Tal fato, se confirmado, corroboraria com a ideia de que a praia tenderia a ter forma desenvolvida de zeta a longo prazo. As características batimétricas da parte Sul da praia (menor profundidade, maior participação hidrodinâmica do leito, maior ocorrência de suspensão de sedimentos), atrelada à existência de correntes convergentes nessa região, reforçam a hipótese de que a erosão é o processo sedimentar predominante nessa região. O monitoramento da região é indicado.

No que diz respeito às diferenças apresentadas entre os métodos interpoladores utilizados, as velocidades obtidas através da Krigagem foram as de maior magnitude, chegando até 0,27 m/s, principalmente na região Sul da praia. Já o Vizinho Natural apresentou valores de até 0,18 m/s para a mesma região. Este fato pode estar relacionado com a maior identificação das cúspides praias por parte da Krigagem bem como por esta interpolação ter

retornado uma batimetria ligeiramente mais rasa que a advinda do Vizinho Natural. Dessa forma, em acordo com a análise da propagação de ondas, surge mais um indicativo de que a Krigagem pode ter potencial para retornar valores mais expressivos na análise do transporte longitudinal de sedimentos. Este fato foi analisado no tópico seguinte, que tratou do Transporte Longitudinal de Sedimentos.

#### **4.4. Transporte Longitudinal de Sedimentos**

Através da metodologia descrita anteriormente para o cálculo do transporte longitudinal de sedimentos, apresenta-se, nesta seção, os resultados obtidos de cada método interpolador para o transporte médio de sedimentos anual e sazonal.

Nas simulações propagadas para os casos de ondas e correntes predominantemente de ESE e E, houve variações no campo de propagação da incidência das ondas e da magnitude das correntes em detrimento do interpolador utilizado. Verificou-se que as simulações com a Krigagem foram mais evidentes quando propagadas em condições de ESE, por identificar que as feições morfológicas de cúspides influenciaram no campo direcional das ondas e na velocidade das correntes costeiras, reduzindo-as em relação as simulações pelo Vizinho Natural.

Mais adiante, encontra-se a discussão sobre o efeito dessas diferenças fornecidas por cada método no que concerne à análise do transporte de sedimentos.

Foram, então, gerados automaticamente pelo SMC os mapas com os valores para a taxa de transporte de sedimentos médio anual bem como para os períodos chuvosos e sem chuva levando em consideração toda a série histórica de 60 anos (1949-2008). Também foram gerados os gráficos da evolução do transporte anual ao longo da série histórica para cada perfil.

É válido destacar que, para diferenciar os dois sentidos do transporte ao longo da costa, o SMC utiliza a convenção adotada por Dean e Dalrymple (2004), em que, considerando um observador olhando na direção do mar, o transporte

litorâneo assume valor positivo quando o sedimento é transportado para a sua direita, e negativo quando o transporte se dá para a sua esquerda.

Ou seja, para a praia estudada, os valores negativos representam o volume de sedimento que é transportado para o norte, e os positivos representam o volume de sedimento que é transportado para o Sul.

Nas tabelas 4.2 e 4.3, estão os valores de Fluxo Médio de Energia (J/m.s) e o Transporte Longitudinal Médio Anual de Sedimentos subdividido em suas parcelas negativas e positivas, para as duas interpolações utilizadas.

Tabela 4.2 Transporte Médio Anual de Sedimentos obtido para cada perfil por meio da formulação de Bayram (2007) – Vizinho Natural.

<b>Transporte Médio Anual de Sedimentos – Vizinho Natural</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q+ (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q líquido (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	3318.08	-88489.1	0	-88489.12
<b>Perfil 2</b>	710.7	-16769.9	0.01	-16769.93
<b>Perfil 3</b>	680.38	-51204.2	16.51	-51187.7
<b>Perfil 4</b>	1289.66	-46491.6	3.14	-46488.45
<b>Perfil 5</b>	688.99	-39027.6	0	-39027.59

Tabela 4.3 Transporte Médio Anual de Sedimentos obtido para cada perfil por meio da formulação de Bayram (2007) – Krigagem.

<b>Transporte Médio Anual de Sedimentos - Krigagem</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q+ (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q líquido (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	3331.21	-111955.23	3829.98	-108125.24
<b>Perfil 2</b>	499.96	-12993.7	1928.94	-11064.76
<b>Perfil 3</b>	559.75	-18025.93	119.2	-17906.73
<b>Perfil 4</b>	3215.24	-25836.43	3755.78	-22080.65
<b>Perfil 5</b>	783.35	-85125.02	0	-85125.02

O perfil que apresentou maior fluxo médio de energia anual foi o Perfil 1, localizado ao norte da praia, com 3318,08 J/m.s (Vizinho Natural) e 3331,21

J/m.s (Krigagem), valores medianos se comparados com os valores encontrados por Araújo (2015) para a praia de Ponta Negra, que apresentou localizações com um fluxo médio de energia da ordem de 8000 J/m.s.

Ao se analisar o Transporte Médio Sazonal, o Perfil 1 apresentou os maiores valores para o fluxo médio de energia somente para o método interpolador Vizinho Natural. Para os meses de Junho, Julho e Agosto, que são os meses onde se registram as maiores ocorrências de chuva e ventos fortes, o perfil 1 apresentou 4576,75 J/m.s. (Vizinho Natural). Já para o método da Krigagem, o perfil 4 foi o que expressou o maior fluxo médio de energia, que foi de 4080,89 J/m.s. Porém, é válido destacar que o perfil 1 para o método da Krigagem apresentou o segundo maior valor de fluxo médio de energia, 3705,07 J/m.s (ver tabelas 4.4 e 4.5).

Tabela 4.4 Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) – Vizinho Natural.

<b>Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) – Vizinho Natural</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q+ (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q Líquido (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	4576.75	-33858.8	0	-33858.78
<b>Perfil 2</b>	939.12	-6087.81	0	-6087.81
<b>Perfil 3</b>	927.63	-18987.9	0.24	-18987.66
<b>Perfil 4</b>	1814.57	-16432.7	1.07	-16431.65
<b>Perfil 5</b>	929.18	-13760.5	0	-13760.49

Tabela 4.5 Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) - Krigagem.

<b>Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago) - Krigagem</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q+ (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q líquido (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	3705.07	-39398.21	9.06	-39389.15
<b>Perfil 2</b>	544	-5107.37	6.97	-5100.4
<b>Perfil 3</b>	607.69	-6078.18	0.11	-6078.07
<b>Perfil 4</b>	4080.89	-9823.75	412.74	-9411.02
<b>Perfil 5</b>	831.26	-23184.65	0	-23184.65

Já para os meses com pouca chuva (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), o método da Krigagem, comparado ao método do Vizinho Natural, apresentou os maiores valores de fluxo médio de energia para todos os perfis, principalmente para os perfis 1 e 4, que atingiram, respectivamente, 2911,88 J/m.s e 2372,66 J/m.s. Para o método Vizinho Natural, o Perfil 1 registrou um valor máximo de 1872,19 J/m.s e o Perfil 4 registrou 701,71 J/m.s, um valor bem inferior ao da Krigagem (ver tabelas 4.6 e 4.7).

Tabela 4.6 Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) – Vizinho Natural.

<b>Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) – Vizinho Natural</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q+ (m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Q líquido (m<sup>3</sup>/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	1872.19	-9875.86	0	-9875.85
<b>Perfil 2</b>	449.6	-2259.55	0	-2259.55
<b>Perfil 3</b>	405.69	-6554.28	1.23	-6553.05
<b>Perfil 4</b>	701.71	-5348.75	0.34	-5348.41
<b>Perfil 5</b>	419.35	-5357.84	0	-5357.84

Tabela 4.7 Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) - Krigagem.

<b>Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Dez, Jan e Fev) - Krigagem</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Fluxo médio de energia (J/m.s)</b>	<b>Q- (m3/ano)</b>	<b>Q+ (m3/ano)</b>	<b>Q líquido (m3/ano)</b>
<b>Perfil 1</b>	2911.88	-16796.96	2532.66	-14264.29
<b>Perfil 2</b>	468.11	-1556.71	1241.44	-315.27
<b>Perfil 3</b>	533.67	-3072.35	79.1	-2993.25
<b>Perfil 4</b>	2372.66	-3410.75	1605.32	-1805.43
<b>Perfil 5</b>	732.34	-19365.37	0	-19365.37

A seguir, as figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram, respectivamente, os mapas do transporte médio anual, Transporte Médio Sazonal – Período Chuvoso (Junho, Julho e Agosto) e Transporte Médio Sazonal – Período Seco (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) gerados pelo SMC Brasil utilizando a batimetria interpolada pelo método do Vizinho Natural. Seguindo a mesma ordem, as figuras 4.41, 4.42 e 4.43 ilustram, respectivamente, os mapas do transporte médio anual, Transporte Médio Sazonal (Junho, Julho e Agosto) e Transporte Médio Sazonal (Dezembro, Janeiro e Fevereiro) gerados pelo SMC Brasil utilizando a batimetria interpolada pelo método da Krigagem.

### Mapa do Transporte Médio Anual de Sedimentos

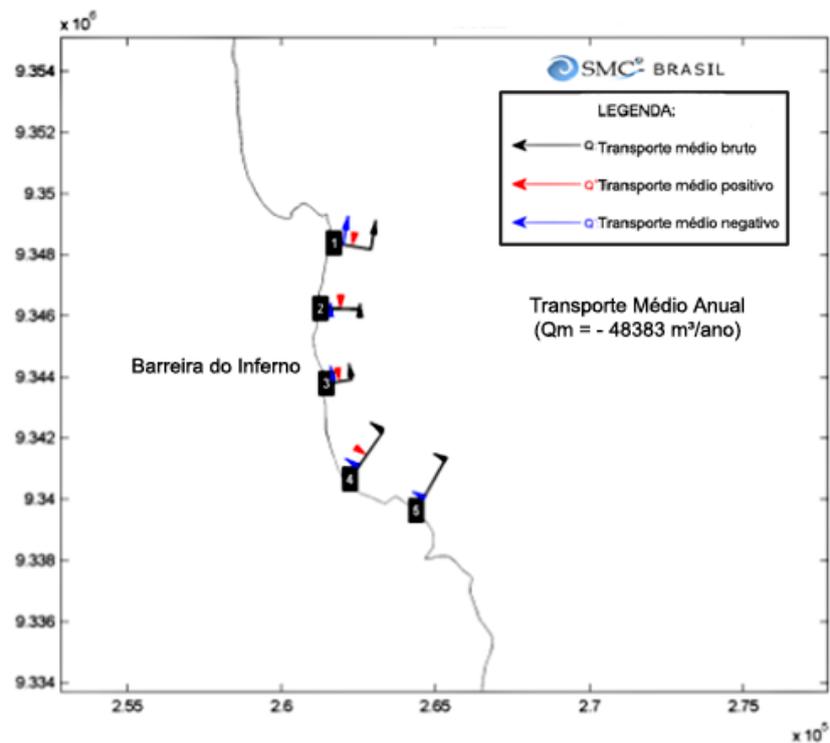


Figura 4.53 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio anual – Vizinho Natural.

### Mapa do Transporte Médio Sazonal de Sedimentos (Jun, Jul e Ago)

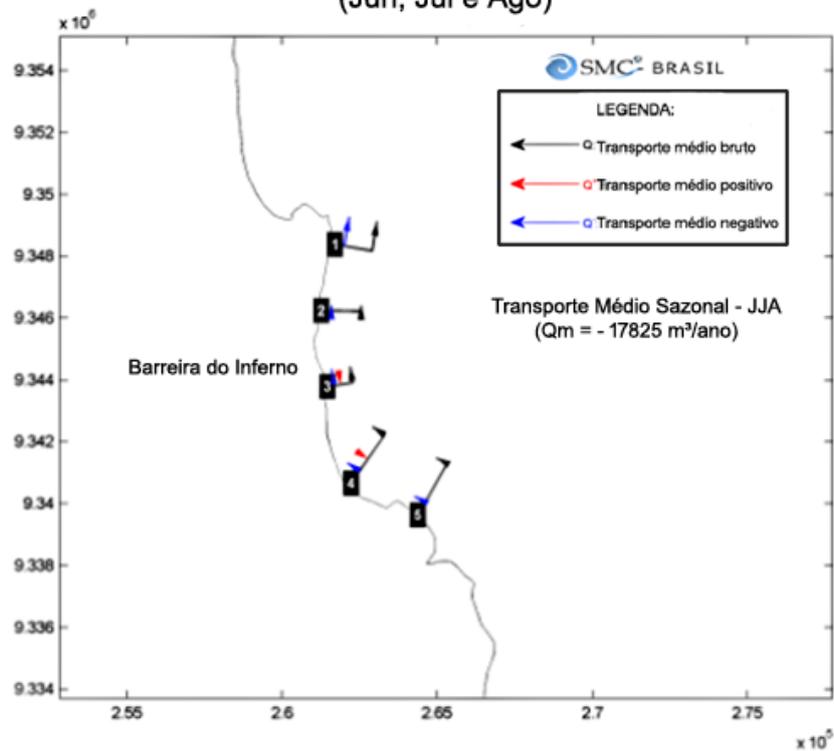


Figura 4.54 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Julho, Junho e Agosto – Vizinho Natural.

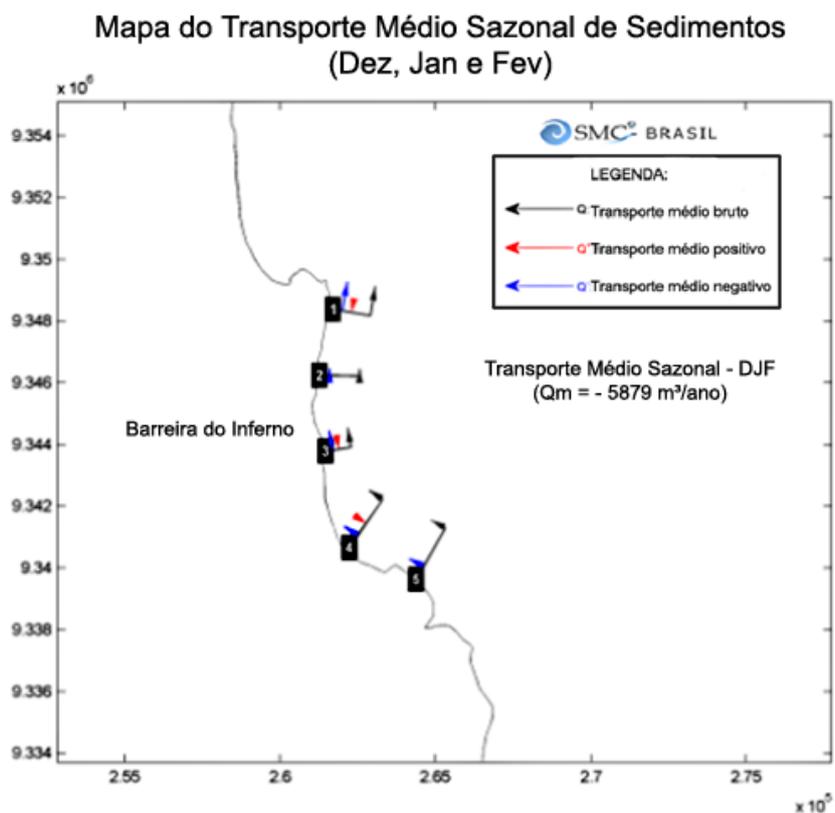


Figura 4.55 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro – Vizinho Natural.

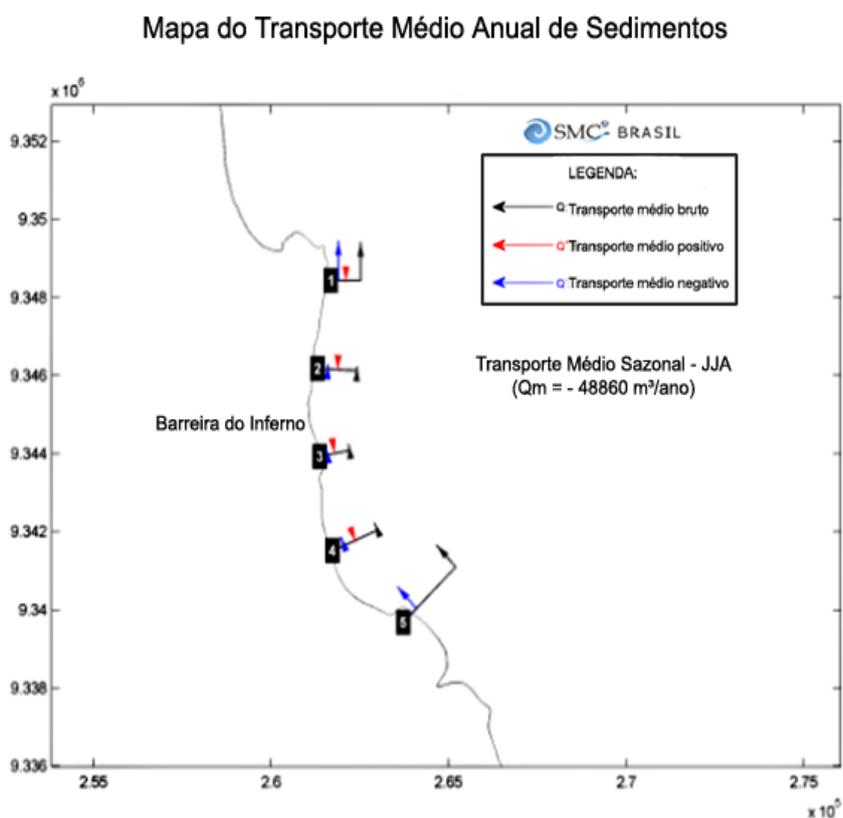


Figura 4.56 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio anual – Krigagem.

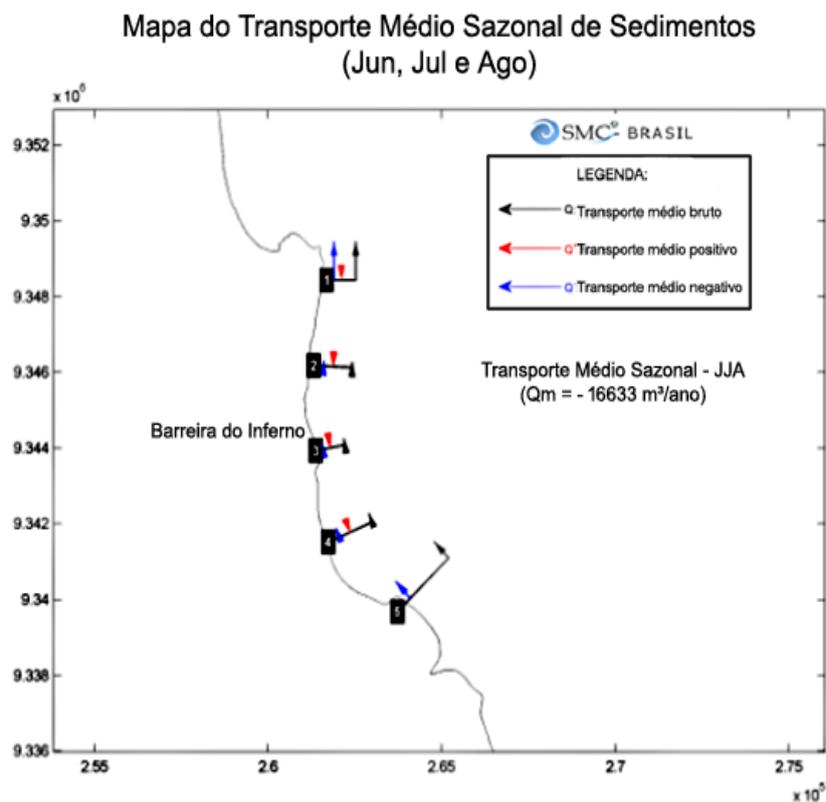


Figura 4.57 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Julho, Junho e Agosto – Krigagem.

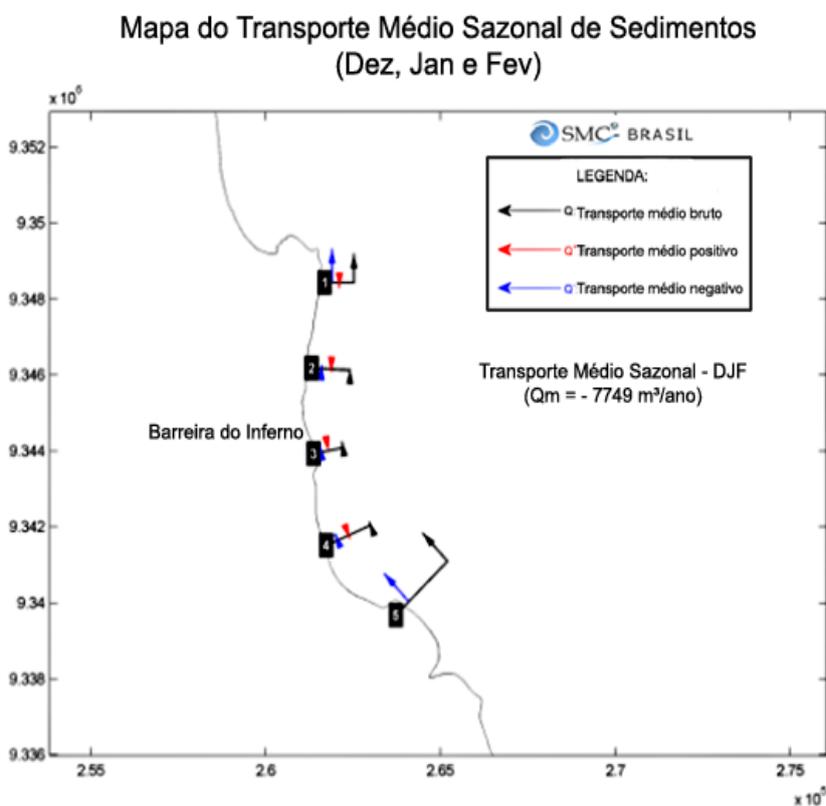


Figura 4.58 Mapa do transporte longitudinal de sedimentos médio sazonal (estacional) para o período compreendido entre os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro – Krigagem.

#### **4.4.1. Transporte Longitudinal de Sedimentos – Comparação entre Krigagem e Vizinho Natural**

As taxas brutas de transporte longitudinal médio obtidas para cada método interpolador apresentaram grande semelhança não somente no sentido do transporte, mas também na magnitude do volume transportado. Para o método do Vizinho Natural, o transporte longitudinal médio anual encontrado foi -48394 m<sup>3</sup>/ano. Para a Krigagem, obteve-se um valor de -48860 m<sup>3</sup>/ano.

Para o período de Junho, Julho e Agosto, o transporte longitudinal atingiu os valores médio de -17825 m<sup>3</sup>/ano e -16633 m<sup>3</sup>/ano para os métodos Vizinho Natural e Krigagem respectivamente.

Os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro compreendem, juntos, os valores médios para o transporte longitudinal de -5879 m<sup>3</sup>/ano e -7749 m<sup>3</sup>/ano para os métodos Vizinho Natural e Krigagem respectivamente.

Levando em consideração que valores obtidos por modelos computacionais para o transporte longitudinal de sedimentos não devem ser interpretados como valores precisos mas, sim, como tendência, as diferenças relativas apresentadas pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem, não superiores a 30% (1870 m<sup>3</sup>/ano), se mostram insignificantes.

Apesar de terem havido diferenças no transporte longitudinal de sedimentos entre os métodos analisando-se cada perfil isoladamente, percebeu-se que o modelo utilizado não mostrou sensibilidade às batimetrias inseridas interpoladas previamente pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem acerca do valor bruto do transporte longitudinal de sedimentos. A partir do trabalho de Araújo (2015) e dos resultados para o transporte longitudinal de sedimentos obtidos neste trabalho, entende-se que o modelo utilizado apresenta baixa sensibilidade para diferenciar batimetrias interpoladas pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem no cálculo do transporte longitudinal de sedimento.

Diante dessa percepção, as diferenças encontradas para o transporte longitudinal de sedimentos entre os métodos utilizados foram negligenciadas e

prosseguiu-se com a análise da tendência de sentido e de volume de sedimento transportado com base nos resultados.

#### **4.4.2. Transporte Longitudinal Médio Anual**

O valor encontrado, por meio da formulação de Bayram (2007), para a taxa de transporte longitudinal média anual bruta para toda a praia foi da ordem de 50.000 m<sup>3</sup>/ano no sentido de sul para norte (S-N). Araújo (2015) encontrou para a praia de Ponta Negra (praia vizinha ao norte da praia da Barreira do Inferno), um valor da ordem de 500.000m<sup>3</sup>/ano no sentido S-N, isto é, um valor dez vezes superior ao encontrado para a praia da Barreira do Inferno.

Esse resultado pode servir para um melhor entendimento do quadro erosivo que a praia de Ponta Negra tem apresentado. Como a praia de Ponta Negra consiste em uma costa urbanizada, o aporte de sedimentos proveniente do continente é menos intenso que em praias protegidas como a Barreira do Inferno. Nesse contexto, a Praia da Barreira do Inferno se apresenta como principal fonte sedimentos para abastecer a praia de Ponta Negra.

Entretanto, um estudo comparativo mais abrangente é recomendado para analisar a hipótese de que a praia da Barreira do Inferno estaria abastecendo a Praia de Ponta Negra com um volume de sedimentos insuficiente para suprir a perda de sedimentos da praia de Ponta Negra.

Para uma comparação mais adequada entre essas praias vizinhas, recomenda-se um estudo de caracterização sedimentológica com coletas de amostras de campo para uma determinação mais apurada do diâmetro médio dos grãos D<sub>50</sub>.

Não houve diferença significativa na direção nem nos valores do transporte longitudinal bruto entre os cinco perfis analisados. Isso indica uma tendência unidirecional do transporte longitudinal de sedimentos bruta definida para toda a praia, que é da ordem de 50.000 m<sup>3</sup>/ano no sentido S-N.

#### **4.4.3. Transporte Longitudinal Médio Sazonal**

Os mapas do transporte longitudinal estacional (sazonal) mostram um comportamento esperado acerca da diferença da taxa de transporte longitudinal entre os períodos chuvoso e seco.

Para os meses não chuvosos, isto é, Dezembro, Janeiro e Fevereiro, o valor bruto para o transporte longitudinal de sedimentos médio calculado foi da ordem de 6.000m<sup>3</sup>/ano. Já para a temporada de chuvas, Junho, Julho e Agosto, o valor médio para o transporte bruto atingiu a ordem de 18.000 m<sup>3</sup>/ano.

O aumento do volume transportado no período chuvoso é coerente, pois corrobora com o fato de o período de chuvas ser o que há maior probabilidade de ocorrência de tempestades, isto é, estado de mar mais energético, o que favorece o transporte de sedimentos.

# **Conclusões**

**Capítulo 5**

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi definido o clima de onda do entorno da praia da barreira do inferno, que mostrou uma maior tendência de ondas vindas das direções E e ESE. Ao se analisar a série temporal de Hs ao longo do período fornecido pelo banco de dados do SMC (60 anos), foi possível perceber que não houve alteração do regime de alturas significativas. As alturas de onda na preamar e baixamar sempre estiveram, respectivamente, em torno de 2,4m e 0,7m, assim, a amplitude de onda estaria em torno de 1,7m. O valor médio de altura significativa mostrou-se em torno de 1,5m.

Para todos os casos, a região norte da praia da Barreira do Inferno foi a que mostrou os maiores valores de altura, de 1,7m em condições médias de baixamar chegando até valores superiores a 2,7m nos casos de condições extremas de preamar. Já a região sul da praia, por ter uma conformação mais branda e rasa, apresentou os menores valores de altura de onda, variando de 1 até 2m analisando-se da mesma maneira que a região norte.

A modelagem das correntes permitiu identificar que o campo direcional apresenta maior tendência no sentido S-N, com as maiores velocidades encontradas na região sul da praia, devido às baixas profundidades desse trecho.

Diante dos resultados das propagações de ondas e correntes obtidos com as batimetrias interpoladas pelo Vizinho Natural e Krigagem, a Krigagem apresentou maior capacidade de identificação da existência das cúspides praias. Entretanto, as modelagens feitas por ambos os métodos interpoladores retornaram resultados muito semelhantes ao término do cálculo do transporte longitudinal de sedimentos. As taxas brutas de transporte longitudinal médio obtidas para cada método interpolador apresentaram semelhanças não somente no sentido do transporte, mas também na magnitude do volume transportado.

Levando em consideração que valores obtidos por modelos computacionais para o transporte longitudinal de sedimentos não devem ser interpretados

como valores precisos mas, sim, como tendência, as diferenças apresentadas pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem se mostram negligenciáveis.

Percebeu-se que o modelo utilizado não mostrou sensibilidade às batimetrias inseridas interpoladas previamente pelos métodos Vizinho Natural e Krigagem. Portanto, este trabalho contribui para o entendimento de que o cálculo do SMC para o transporte de sedimentos na região próxima da costa oriental do Rio Grande do Norte, por meio da Carta Náutica 22100, não apresenta diferenças significativas de acordo com o método interpolador utilizado para a carta náutica.

O transporte longitudinal de sedimentos anual é da ordem de, aproximadamente,  $50.000\text{m}^3/\text{ano}$  no sentido Sul-Norte. A análise do transporte longitudinal de sedimentos nos meses mais e menos chuvosos mostrou uma tendência coerente para cada período. Isto é, o período mais chuvoso (Junho, Julho e Agosto) apresentou-se como o período de maior contribuição para o transporte médio anual, pois é quando ocorre um maior aporte de sedimentos do continente em direção a costa. Também é nesse período em que ocorrem os ventos mais energéticos do ano, contribuindo ainda mais para o aumento do transporte longitudinal de sedimentos. Para o período menos chuvoso e de ventos mais brandos (Dezembro, Janeiro e Fevereiro), os valores de transporte longitudinal de sedimentos foram os menos expressivos.

Em comparação com os valores encontrados para Ponta Negra, pode-se dizer que o Transporte Longitudinal de Sedimentos na praia da Barreira do Inferno é pouco expressivo. É válido destacar que a presença de arenitos de praia, embora não tenha sido considerada neste estudo, contribui para a defesa contra a erosão da costa, corroborando, assim, com os baixos valores obtidos para o transporte.

Embora as praias da Barreira do Inferno e de Ponta Negra sejam vizinhas entre si e apresentem a mesma tendência direcional do transporte longitudinal de sedimentos, a magnitude do transporte longitudinal do transporte de sedimentos médio anual para a praia da Barreira do Inferno se mostrou dez vezes inferior. Recomenda-se, com base neste fato, um estudo mais detalhado que abranja as duas praias para que se analise o transporte sedimentar entre

essas praias que, embora vizinhas entre si, possuem características contrastantes quanto ao uso e ocupação da costa.

Diante das considerações que tiveram de ser feitas acerca do diâmetro médio dos grãos de areia neste trabalho devido à inexistência de dados granulométricos, recomenda-se estudo prévio com coletas de campo para caracterização granulométrica das duas praias com o objetivo de se obter maior precisão nos dados de entrada do modelo. Entretanto, a limitação do próprio modelo para este dado de entrada é um detalhe que merece atenção da equipe desenvolvedora do SMC-Brasil.

Também é recomendado um estudo para melhor definição da profundidade de fechamento, pois, embora a equação de Harllermeier seja amplamente utilizada, a formulação de Birkemeier (1985) apresentou maior semelhança com os dados coletados em campo no estudo de Wang (2008).

A realização de estudos de modelagem costeira nas demais praias do estado do Rio Grande do Norte é de grande importância para o entendimento geral acerca da dinâmica sedimentar costeira. Afinal, as informações geradas por estudos de modelagem, além da contribuição científica, contribuem para uma gestão da costa mais eficaz.

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA JÚNIOR, J. E. de. **Avaliação da Retração no Curto Prazo da Falésia Costeira da Barreira do Inferno com uso do Laser Escâner Terrestre**. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ALMEIDA, L. R.; SCUDELARI, A.C.; AMARO,V.E.; ARAÚJO,D.J.C. **Clima Marítimo da Praia Ponta Negra, Baseado em Dados de Reanálise do SMC-Brasil**. In: XXVI Congresso Latino-americano de Hidráulica Santiago, Chile, agosto, 2014.

ALMEIDA, L.R.; SCUDELARI, A.C.; AMARO, V.E.; MARCELIMO, A.M.T.; **Estudo de Caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileiro (SMC-Brasil) no Rio Grande do Norte**, IDEMA-UFRN, 2013.

ALMEIDA, L.R. - **Estudio de dinámica litoral y evolución de la zona sur de la Playa de Piçarras (Santa Catarina/Brasil)**. 263p., Dissertação de Mestrado, Universidad de Cantabria, Santander, Espanha. 2013.

AMARAL, R. F. **A Dinâmica Ambiental e o Problema da Erosão na Zona Costeira do Município de Tibau do Sul**. IDEMA. Relatório interno. 45 p. 2001.

ARAÚJO, D. J. C. **Transporte longitudinal de sedimento na zona costeira de Natal/RN**. 2015. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

ARAÚJO, V. D.; REYES-PERES, Y.; LIMA, R.O.; PELOSI, A.P.M.R; MENEZES, L.; CÓRDOBA.V.C; LIMA. F.P. **Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte**. In: Geologia USP Série Científica São Paulo, v. 6, n. 2, p. 43-49, outubro, 2006.

BARBOSA, N. M. **Estabilidade das falésias da Barreira do Inferno - RN**. 2017. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

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

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

BIRKEMEIER, W.A. **Field data on seaward limit of profile change.** J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE Press, 111(3), p.598-602. 1985.

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

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

CÂMARA, M. R., **Análise de recuo de falésias no litoral do estado do Rio Grande do Norte.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

CHAWLA, A., H.T. ÖZKAN e J.T. KIRBY. **“Spectral model for wave transformation e breaking over irregular bathymetry”**, Journal of Water., Port, Coastal e Ocean Eng., 189-198. 1998.

COWELL, P. J., & THOM, B. G. (1994). **Morphodynamics of coastal evolution.** In: R. W. G. Carter, & C. D. Woodroffe, (Eds), Coastal evolution, late quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge: Cambridge University Press. 1994.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Coastal Processes with engineering applications.** 2004.

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

DOMINGUEZ J. M. L.; BITTENCOURT A. C. S. P.; SANTOS A. N.; ANDRADE A. C. S.; LAVENERE-WANDERLEY A. A. O.; SILVA I. R.; QUEIROZ I. G.; FREITAS L. M. B.; NASCIMENTO L.; SILVA R. P. Bahia. In: Muehe D. (ed.) **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, p. 220-225, 2006.

BROSSARD. J., DUPERRET. A. **Coastal chalk cliff erosion: experimental investigation on the role of marine factors**. Geological Society of London. Coastal Chalk Cliff Instability, Geological Society of London, pp.109-120, 2004, Engineering Geology Special Publications 20. 2004.

GOMES, G.; SILVA, A. C., **Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil)**. Special Issue 71 - Coastal Erosion and Management along Developing Coasts (Fall 2014) pp. 30-40. 2014.

GURGEL, D., MATOS, M. F. A., SCUDELARI. A.C., OLIVEIRA, D. S. **Avaliação de interpoladores espaciais e sua influência na modelagem de ondas e correntes, RN-Brasil**. XXII Simpósio Brasileiro de Recurso Hídricos. 2017.

HEMYARI, P.; NOFZIGER, D. L., **Analytical solution for punctual kriging in one dimension**: Soil Sci. Soc. Am. J., 51, p. 268–269. 1987

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

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

INMET. **Dados da Estação Automática A304. 2016**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 30 de dezembro de 2016.

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

KRIGE, D. G. (1951). "A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand". J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa. **52** (6): 119–139. 1951.

LUCA, C.B. (2011) - **Implementação de ferramentas numéricas e bases de dados no SMC-Brasil e sua aplicação no estudo piloto da praia de Massaguaçu-Brasil**. 213p., Dissertação de Mestrado, Universidade de Cantabria, Santander, Espanha. Não publicado.

MARINHA DO BRASIL. **Carta Náutica 22100**. Disponível em: [https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster\\_disponiveis.html](https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html). Acesso em: 20/05/2016.

MATHERON, G. (1962). *Traité de géostatistique appliquée*. Editions Technip. 1962.

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

MMA, **DOCUMENTO SÍNTESE DO SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-ESPANHA: APOIO À GESTÃO DA COSTA BRASILEIRA**. Seminário Internacional Brasil-Espanha. Brasília, DF. 2011.

MOURA, J. E.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; AMARO, V. E. **Evaluation of the Influence of Digital Elevation Models on a Hydrodynamic Circulation Model**. Journal of Coastal Research. P 1140 – 1144. 2011.

NASCIMENTO, K.C. **“Monitoramento por DGPS e Análise de Processos Erosivos na Linha de Costa da Praia de Pirangi do Norte – Parnamirim / RN”**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, p. 97. 2009.

OLIVEIRA, D. S., **Análise de índices de vulnerabilidade física com uso de geotecnologias na região da Barreira do Inferno**. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

OLIVEIRA, J. F., BARBOZA, E. G.; BENAVENTE, J. (2016) **Nearshore Dynamics and Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil**. Journal of Coastal Research: Special Issue 75 - Proceedings of the 14th International Coastal Symposium, Sydney, 6-11 March 2016: pp. 437 – 441. 2016.

PAE, W., H. Mase e T. Sakai. “**Probabilistic calculation model of directional random waves**”, Proc. 23rd Int. Conf. On Coastal Engrg., Orlando, 540-550. 1992.

PANCHANG, V. G.; WEI G., PEARCE, B. R.; BRIGGS, M.J. “**Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal**”. J. Wtrwy. Port, Coast., e Oc. Engrg., ASCE, 116(3), 324-340. 1990.

RIBEIRO, J. R. C. **Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRN, Natal. 2015.

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, 2014 . Disponível em: <<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/seplan/DOC/DOC000000000129527.PDF>> Acesso em: 02/01/2017.

SEVERO, R. N. F. **Análise da Estabilidade das Falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN**. 2005. Dissertação (mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal.

SIBSON R. *A brief description of natural neighbour interpolation*. In V Barnett, editor, *Interpreting Multivariate Data*, pages 21–36. Wiley, New York, USA. 1981.

SILVA, W. de S. **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal. 2003.

SOUZA JUNIOR, C. **Análise da Estabilidade de Falésias na Zona Costeira de Baía Formosa/RN**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, p. 141. 2013.

SOUZA RIBEIRO, R.; BONETTI, J.; DA FONTOURA KLEIN, A. H. **Caracterização Morfológica e Hidrodinâmica de Praias do Estado de Santa Catarina com Vista à Avaliação de Perigo ao Banhista**. Geosul, Issue 60, pp.49-68, 2015.

TAQUEZ, D. E. D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: estudo de caso no centro de lançamentos da barreira do inferno - Brasil**. 2017. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

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

VINCENT, C.L.; BRIGGS, M.J. "**Refraction-diffraction of irregular waves over a mound**". J. Wtrwy. Port, Coast., e Oc. Engrg., ASCE, 115(2), 269-284. 1989.

VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; AMARO, V.E.; MELO, F.T.L.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; LIMA, Z.M.C.; FRAZÃO, E.P.; TABOSA, W.F.; ARAÚJO, A.B.; SOUTO, M.V.S..**Erosão e progradação no litoral brasileiro.Rio Grande do Norte**. In: Dieter Muehe (org.). pp. 155-172, MMA, Brasília, Brasil. 2006

VITAL, H. Erosão e Progradação Costeira no Estado do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife.**Anais eletrônicos...** Recife: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 2003. Disponível em: <[http://www.abequa.org.br/trabalhos/ quatmar\\_186.pdf](http://www.abequa.org.br/trabalhos/quatmar_186.pdf)> Acesso em: 21 fev. 2016.

VITAL, H.; STATTEGGER, K.; AMARO, V. E.; SCHWARZER, K.; FRAZÃO, E. P.; TABOSA, W.F. A. **Modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: Continental shelf adjacent to Northern Rio Grande do Norte State, NE Brazil**. In: HAMPSON, G., STEEL, R., BURGUESS, P.DALRYMPLE, R. (Ed.). Recent advances in models of siliciclastic shallow-marine Stratigraphy. SEPM Special Issue, 90:177-190, 2008.

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

WILLMOTT, C. J. *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WANG, P.; DAVIS Jr., R.. **Profundidade de fechamento e perfil de equilíbrio de praia um estudo de caso em Sand Key, Florida** (depth of closure and the equilibrium beach profile - a case study from Sand Key, West-Central Florida). Revista Mercator, América do Norte, 614 11 2008.