

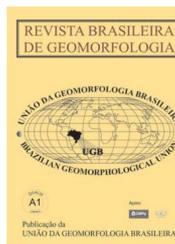


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 1 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i1.737>



# CARACTERIZAÇÃO BATIMÉTRICA E FÍSICO-OCEANOGRÁFICA DO PORTO DE CABEDELLO/PB, BRASIL: UMA ANÁLISE AMBIENTAL AO DERRAME DE ÓLEO

## BATHYMETRIC AND PHYSICAL OCEANOGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THE PORT OF CABEDELLO/PB, BRAZIL: AN ENVIRONMENTAL ANALYSIS TO OIL SPILL

**Luciana de Sousa Frazão**

*Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Av. Sen. Salgado Filho, 3000, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59078-970, Brasil  
Email: lsfrazao@yahoo.com.br*

**Venerando Eustáquio Amaro**

*Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Av. Sen. Salgado Filho, 3000, Natal, Rio Grande do Norte, CEP: 59078-970, Brasil  
Email: amaro@geologia.ufrn.br*

### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
23/05/2015  
Aceito (Accepted):  
12/01/2016

### Palavras-chave:

Batimetria; Morfologia de fundo; Porto de cabedelo.

### Keywords:

Bathymetry; Bottom morphology; Port of Cabedelo.

### Resumo:

A região estudada do Porto de Cabedelo/PB é uma área passível ao derramamento acidental de óleo por apresentar um intenso tráfego de navios de grande porte. Nesse contexto, o principal objetivo deste estudo foi a utilização dos métodos geoestatísticos para analisar dados batimétricos (profundidade), físico-oceanográficos (correntes e ondas) e meteorológicos (ventos) do canal de acesso ao Porto de Cabedelo e sua bacia de evolução. Incluindo também ferramentas do Sensoriamento Remoto (imagens LANDSAT ETM+), para que as imagens, os mapas e os resultados obtidos sejam integrados em Sistemas de Informação Geográfica e utilizados como subsídio na elaboração de medidas e planos de contingência, que visem à proteção ambiental de áreas costeiras sob influência de instalações desse porte em casos de vazamentos acidentais de óleo na região. Como principais resultados destacam-se a elaboração de cinco cartas batimétricas com a profundidade em metros na escala de 1:2.000 no padrão da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), mostrando as principais morfologias submersas, para a bacia de evolução (local onde os navios atracam) e canal de acesso ao Porto de Cabedelo. A partir do diagrama de dispersão dos vetores de correntes da bacia de evolução do Porto de Cabedelo, pode-se observar como a corrente de maré sofre uma canalização devido ao canal do rio Paraíba do Norte e com sentido bidirecional provocado pelo efeito da maré (vazante e enchente) na bacia de evolução do Porto de Cabedelo, no sentido NW-SE e que a maior velocidade das correntes ocorre na baixa-mar. A caracterização meteorológica apresentou valores dentro das médias esperadas. A integração de produtos multifontes (mapas

digitais e imagens de sensores remotos) mostrou-se eficiente para discriminar e realçar feições submersas, antes não perceptíveis nas imagens.

**Abstract:**

The studied region of the Port of Cabedelo/PB can be affected by accidental oil spills due to the intense traffic of large ships. Therefore, the main purpose of this study was the use of geostatistic methods to analyse bathymetric (depth), physical-oceanographic (currents and waves) and weather (winds) data of the access channel to the Port of Cabedelo and its evolution basin. It also includes resources as Remote Sensing (LANDSAT ETM+ images) in order that the images, the maps and the achieved results may be integrated into Geographical Information Systems and used as an aid in the elaboration of measures and contingency plans that have as purpose the environmental conservation of coastal areas under the influence of large facilities in the event of accidental oil spills in the region. As main results can be pointed out the elaboration of five bathymetric charts with meter depth on the scale of 1:2000 according to the standard of the Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), showing the main submerged morphologies for the evolution basin (place where the ships moor) and the access channel to the Port of Cabedelo. From the dispersion diagram of the currents vectors of the Port of Cabedelo evolution basin, it can be observed as the tide current suffers a canalization due to the river Paraíba do Norte channel and in a bidirectional way caused by the tide effects (low and high tide) in the Port of Cabedelo evolution basin, in the NW-SE direction and that the currents highest speed happens at low tide. The weather characterization showed values within the expected averages. The integration of multi-sources products (digital maps and remote sensors images) appeared to be efficient to describe and set submerged features off which had been not yet noticed on the images.

---

## 1. Introdução

O Estado da Paraíba é um dos estados mais dinâmicos do Brasil, estrategicamente localizado na região nordeste, se destaca pelo excelente potencial para integração dos diversos modais de transporte formado com os Estados do Rio Grande do Norte, Pernambuco e Alagoas.

A cidade de Cabedelo além de se localizar na microrregião de João Pessoa, possuindo uma população estimada de 57.944 habitantes (IBGE, 2010), concentra também o único Porto do Estado da Paraíba, área estudada neste trabalho.

Sobre o transporte marítimo na área do porto de Cabedelo, sabe-se que cumpre um papel fundamental em transportar toneladas de mercadorias no qual os fretes são reduzidos, em relação a outros meios de condução. Neste contexto, o Porto de Cabedelo funciona como ponto de apoio, embarque ou desembarque tendo fundamental importância como ponto nodal para manter o fluxo marítimo suprindo as necessidades das embarcações, agenciando trabalhadores especializados para carregamento e descarregamento das embarcações, controlando a entrada e saída de mercadorias, apoiando empreendimentos que venham a trazer maior fluxo de mercadorias, oferecendo armazenamento para

os contêineres e mercadorias avulsas e agenciando o transporte de carga. A dinâmica que ocorre com a atividade portuária provoca mudanças no espaço onde ele é instalado. E os elementos que compõem esse espaço passam então a sofrer sempre mais influências diretas ou indiretas à medida que o fluxo no porto é ampliado. Logo, essa região tornou-se passível ao derramamento acidental de hidrocarbonetos por apresentar um intenso tráfego de navios de grande porte, por abrigar 50 tanques de combustível pertencentes a diversas empresas distribuidoras de álcool e derivados de petróleo, e por desembarcar combustíveis via cabotagem, como a gasolina e o óleo diesel.

O Porto de Cabedelo, como a maioria dos portos brasileiros, também se desenvolveu em canais de navegação estuarinos que necessitam frequentemente de dragagens para mantê-los abertos. A resposta do meio estuarino às intervenções portuárias se manifesta sobre a forma de um encadeamento complexo de reações ambientais cujos elos entre os processos físicos (geológicos e geomorfológicos), químicos e biológicos são ainda um desafio ao conhecimento (GUEDES *et al.*, 2011). Além disso, essa região do porto também recebe uma intensa carga de sedimentos trazidos pelos rios que desembocam no Sistema Estuarino do Rio Paraíba

do Norte (ERPN), bem como efluentes domésticos e industriais provenientes das cidades situadas no seu entorno que não possuem sistema de coleta e tratamento de esgoto, contribuindo significativamente para o assoreamento da bacia de evolução (local onde os navios atracam) e do canal de acesso ao Porto de Cabedelo e levando a necessidade de realização de dragagens de manutenção periódicas, que visam, basicamente, a retirada de material sedimentar depositado para manter a profundidade do canal, proporcionando a movimentação de embarcações. O material sedimentar proveniente destas dragagens é geralmente conduzido para o mar e despejado. Entretanto, o material a ser dragado de regiões portuárias pode conter quantidades expressivas de metais pesados e outros contaminantes, os quais são transferidos para o local de despejo.

Devido a essa realidade o estudo das composições geomorfológicas e sedimentológicas do fundo oceânico tornam-se importante à medida que se conhece mais a respeito de relações entre estes parâmetros e a fauna associada, sendo possível identificar seus habitats preferenciais (CASTELLO *et al.*, 1994; CARVALHO, 1997). Além disso, o conhecimento do relevo, tipos de fundo e ocorrência ou não de feições geomorfológicas em uma determinada área são de fundamental importância para setores como engenharia oceânica, órgãos de defesa ambiental e indústria do petróleo.

O banco de dados de fundo, acusticamente coletados ao longo da área de estudo, constitui um grande acervo de informações, que foram devidamente analisadas, catalogadas e disponibilizadas em forma de mapas e imagens. Tais informações podem servir como uma importante ferramenta, proporcionando um levantamento geomorfológico e sedimentar da área estudada, e vir a subsidiar, de forma ágil, futuras tomadas de decisão.

Tendo como área de estudo Porto de Cabedelo/PB, esta pesquisa objetivou avaliar a influência das correntes de marés superficiais e de fundo na modelagem do leito marinho, incluindo a aquisição de informações sobre a localização de corpos rochosos submersos e a profundidade desses corpos que podem vir a se tornar armadilhas naturais para o aprisionamento de hidrocarbonetos em casos de vazamentos acidentais na área devido à atividade portuária de embarque e desembarque de derivados de petróleo, movimentação das embarcações que podem colidir ou encalhar, além de obter a relação entre tipos de leito e as condições hidrodinâmicas atuais na região. Nesse contexto, para este trabalho, foram coletados da-

dos batimétricos (profundidade) e físico-oceanográficos (altura da coluna d'água, velocidade e direção das correntes e das ondas de maré), meteorológicos (velocidade e direção dos ventos) do canal de acesso ao Porto de Cabedelo e sua bacia de evolução, incluindo ainda ferramentas do Sensoriamento Remoto (imagens LANDSAT7 ETM+, 2001), para que as imagens e os resultados obtidos sejam integrados em Sistemas de Informação Geográfica e utilizados como subsídio na elaboração de medidas e planos de contingência, que visem à proteção ambiental de áreas sob influência de instalações desse porte.

## **2. Área de Estudo**

O Porto de Cabedelo, apresentado na Figura 1, está situado na margem direita do estuário do rio Paraíba do Norte - ERPN, em frente à Ilha da Restinga, na porção noroeste da cidade de Cabedelo/PB, próximo ao Forte de Santa Catarina (GUEDES, 2002). Com uma área de influência que abrange os estados da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, tem a administração exercida atualmente pela Companhia Docas da Paraíba (Docas - PB). A Bacia do Rio Paraíba do Norte drena uma área de 14.397,35 km<sup>2</sup> que intercepta 37 municípios do Estado da Paraíba. Apresenta um comprimento de 380 km de extensão, dividindo-se na Bacia do Alto Paraíba com 114,5 km, Bacia do Médio Paraíba com 155,5 km e Bacia do Baixo Paraíba com 110,0 km (GUALBERTO, 1977; NEPREMAR, 1980).

## **3. Material e Métodos**

As atividades desenvolvidas para a elaboração deste trabalho foram subdivididas nas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica e cartográfica; trabalhos de campo, envolvendo levantamento batimétrico, medição dos parâmetros físico-oceanográficos, levantamento dos parâmetros meteorológicos; etapa de laboratório para processamento e análise dos dados batimétricos, físico-oceanográficos, meteorológicos e de sensoriamento remoto para processamento digital de imagens e confecção das cartas batimétricas.

A partir da base cartográfica georeferenciada digital no formato CAD na extensão \*.DWG fornecida pela Companhia Docas da Paraíba, foi mensurada a área onde se realizaria os levantamentos e o georeferenciamento da base cartográfica para o datum WGS-84 e projeção

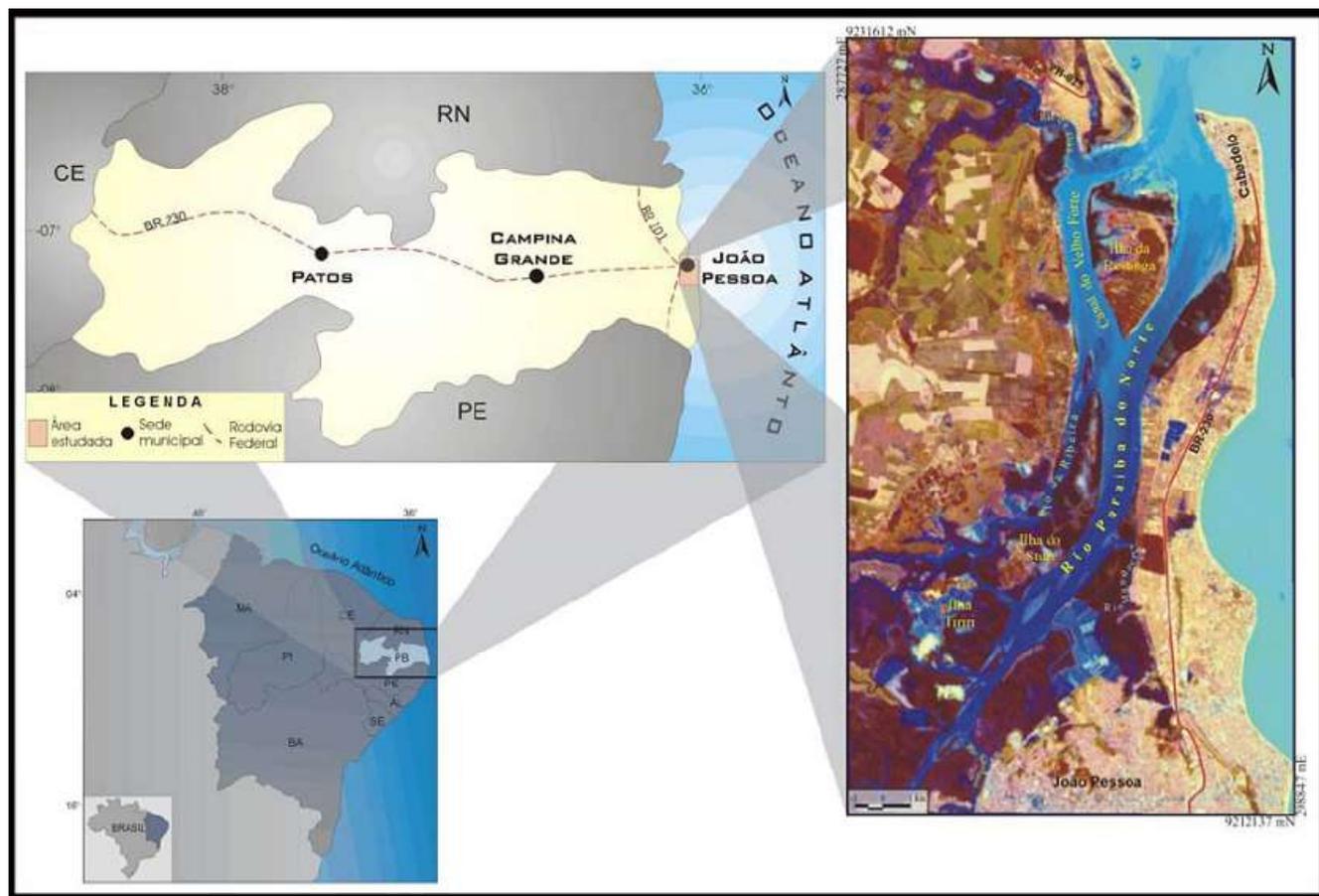


Figura 1 - Mapa de localização do Porto de Cabedelo no Estuário do Rio Paraíba do Norte Estado da Paraíba. Modificado de GUEDES (2002).

UTM, utilizando-se o *software* ENVI 4.0. Em seguida, essa base cartográfica foi inserida no *software* HYPACK 2011, onde foram definidas as seções batimétricas na área da Bacia de Evolução e do Canal de Acesso ao Porto de Cabedelo.

O levantamento batimétrico com multifeixe ao longo do canal de acesso e bacia de evolução do Porto de Cabedelo foi realizado em 16 de junho 2010, utilizando-se como meio flutuante a embarcação Carapitanga, com 6 metros de comprimento. Esta embarcação foi excelente para o levantamento batimétrico visto que a mesma possui apenas 20 cm de calado, permitindo a sondagem em áreas bastante rasas.

Os equipamentos utilizados no levantamento batimétrico foram: i) ecobatímetro da Syqwest modelo Bathy-500 DF operando na frequência de 33 / 210 kHz, com resolução do feixe vertical de 0.01m; ii) Sistema de Posicionamento DGPS da TRIMBLE modelo DSM-232 com receptor Beacon - Rádio Farol, OmniSTAR XP/HP e Banda L1/L2; iii) Nettop da HP com processador Atom com 4Gb de RAM com o *software* HYPACK

2011 e v) um monitor LCD 17” widescreen da LG como repetidora de sinal, todos eles instalados e em perfeito funcionamento a bordo da embarcação.

A interpolação dos dados batimétricos foi realizada pelo método da *Krigagem* Ordinária. De acordo com o manual do Surfer (2008) e (SOARES, 2000) a krigagem é um dos métodos mais flexíveis e é útil para quase toda distribuição de dados, produzindo mapas com boa coerência visual a partir de dados irregularmente espaçados, e permite estimar dados em locais não amostrados levando em conta o comportamento espacial do fenômeno e minimizando o erro da estimativa. Neste trabalho foi aplicado o *default* do *software* Surfer 8.0, sendo a *Krigagem* representada pela equação ( $Z_A = \sum_{i=1}^n W_i Z_i$ ), onde o valor a ser estimado ( $Z_A$ ) é o somatório dos produtos entre os valores da variável obtidos nos pontos conhecidos ( $Z_i$ ) e os respectivos pesos calculados ( $W_i$ ) para os pontos  $i$ , com  $i$  variando de 1 até  $N$ .

A partir do tratamento de interpolação e da correção maregráfica dos dados batimétricos, foram elaboradas com auxílio do *software* HYPACK 2011, cinco

cartas batimétricas no padrão DHN, apresentando a profundidade em metros, na escala de 1:2.000 para a bacia de evolução e canal de acesso ao Porto de Cabedelo. No processamento e pós-processamento dos dados foram utilizados os *softwares* HYPACK 2011 e AutoCad 2011, respectivamente. Para a confecção dos 05 (cinco) mapas em 3D com a morfologia de fundo para a área de estudo foi utilizado o *software* Surfer 8.0.

Na região da área costeira (aqui nominada para indicar a área externa do porto) e da bacia de evolução (referindo-se ao local onde os navios atracam, na área interna do porto) do Porto de Cabedelo foram moni-

toradas no verão no período de 15 a 18 de junho de 2010, os seguintes parâmetros físicos: altura de coluna d'água, velocidade e direção das correntes, e das ondas. Estas medições ocorreram em duas estações, localizadas na bacia de evolução do Porto de Cabedelo ( $06^{\circ} 58' 25.441''$  S /  $34^{\circ} 50' 22.355''$  W) e a estação da área costeira ( $06^{\circ} 55' 22.0189''$  S /  $34^{\circ} 48' 25.0655''$  W).

Os dados sinóticos de direção e altura significativa (Hs) das ondas foram analisados para a área costeira e bacia de evolução do Porto de Cabedelo e medidas a cada 0,5 s com ADCP da NORTEK fundeado nas duas estações fixas de medição (Figura 2-A e 2-B).

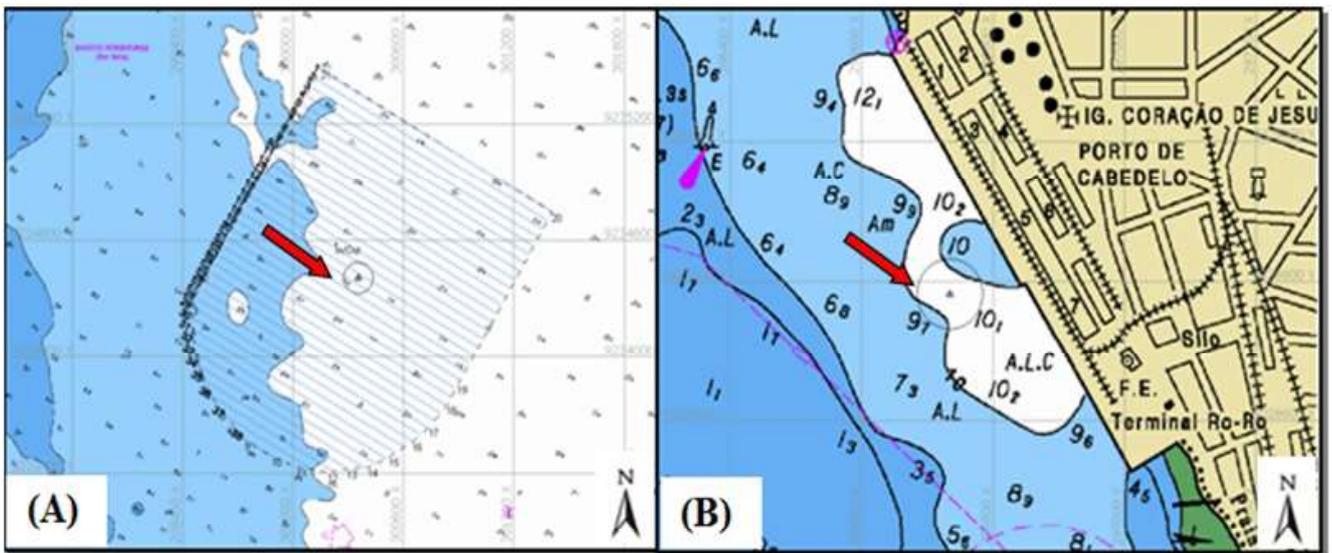


Figura 2 - Localização das duas estações fixas de medição dos parâmetros físico-oceanográficas indicadas pelas setas vermelhas: (A) estação de medição na área costeira, que se refere a parte externa do Porto de Cabedelo/PB. (B) estação de medição na bacia de evolução (local onde os navios atracam), que se refere a parte interna do Porto de Cabedelo/PB.

Os dados climáticos (direção e velocidade dos ventos) analisados neste trabalho foram obtidos no banco de dados do Departamento Nacional de Meteorologia, atual Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, referente à Estação Climatológica de João Pessoa de n.º A-320. As medições foram iniciadas às 00:00 hs do dia 28/02/2010 e terminadas às 23:00 hs do dia 04/07/2010, onde foram medidos a intensidade e direção dos ventos.

Os dados físico-oceanográficos e meteorológicos foram analisados em duas etapas: a) resumo com estatísticas descritivas (média, mediana e moda), dispersão (amplitude total, desvio padrão, coeficiente de variação e curtose) e verificação da normalidade da distribuição, b) análise exploratória e verificação da presença de *outliers* e foram processados utilizando-se os *softwares*

Grapher 4.0 e o Statistica 7.0

O processamento digital de imagens (PDI) de sensoriamento remoto consistiu de maneira simplificada, na aplicação e combinação de três bandas espectrais no sistema de cores RGB (*red, green, blue*). Várias composições coloridas em RGB foram testadas para as imagens LANDSAT 7 ETM+ (do ano de 2001). As imagens foram submetidas às modificações de contraste de histograma, de forma a melhorar a distinção visual de diferentes aspectos na imagem resultante. As técnicas empregadas envolveram transformações lineares (Aumento Linear de Contraste) e não-lineares (Gaussiana, Logarítmica, Equalização) correntes no *ER-Mapper* v7.1, aplicadas para o realce da dinâmica visual de cada banda individualmente, que serviram como fonte de

informações para uma análise do quadro geoambiental regional da foz do ERP. N.

Neste trabalho foi aplicada a combinação de pares de razões 4/2, no sistema RGB, obtendo-se um bom resultado realçando as áreas submersas e arenitos praias presentes no ERP. Utilizou-se também o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) com a composição coloria 4-2-NDWI. O NDWI (B2-B4/B2+B4), que aumentou o contraste entre água e terra, na delimitação dos canais fluviais e da linha de costa. Este índice maximiza a reflectância típica de feições na água nos comprimentos de onda verde, como plumas de sedimentos em suspensão, minimizando a baixa reflectância no infravermelho próximo na água utilizando-se da alta reflectância do infravermelho próximo em feições de vegetação terrestre e solo (MCFEETERS, 1996).

Para a banda pancromática do Landsat 7 ETM+ foi utilizada composições em RGBI, que consiste na fusão de múltiplos dados, acrescentando-se a camada *Intensity*, com a adoção da composição 543 em RGB e obtendo-se, com isso, uma variedade de imagens utilizadas como fonte de extração de informações que permitiram a diferenciação das áreas submersas e identificação de arenitos praias que caracterizam a área do porto de Cabedelo/PB. Utilizou-se também a PC1 (primeira componente principal que pode assimilar a informação pancromática) no canal *Intensity* em conjunto com um filtro direcional E-W de matriz 5x5 com o intuito de discriminar e realçar estruturas, antes não perceptíveis na imagem, como também classificar o tipo de água existente na mesma.

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1 Processamento da Batimetria Multifixe

Na Figura 3, verifica-se que as zonas de maiores profundidades se encontram junto às margens côncavas (setas vermelhas) do estuário do Rio Paraíba do Norte, enquanto nas margens convexas (setas pretas) um avançado preenchimento sedimentar contribui para o crescimento lateral, em direção ao canal estuarino. Este preenchimento está relacionado às intensas correntes de maré na zona do canal principal, que remobilizam os sedimentos erodidos nas margens opostas e formam os bancos arenosos. Ao longo do estuário, o comportamento morfológico se modifica caracterizando zonas distintas. A profundidade, largura e a forma dos canais

mostram diferentes níveis de atuação dos mecanismos dinâmicos do ambiente. A largura do canal principal de navegação de acesso ao Porto de Cabedelo varia de 158 metros a 163 metros em frente ao Forte Santa Catarina e com 290 metros na bacia de evolução do Porto de Cabedelo (Figura 3).

O processamento e a análise dos dados batimétricos, obtidos na bacia de evolução e no canal de acesso ao Porto de Cabedelo, teve como resultado a elaboração de 05 (cinco) cartas batimétricas no padrão DHN, como delineado em vermelho na Figura 3, apresentando profundidades em metros, na escala de 1:2.000.

As Figuras a seguir mostram a morfologia do fundo da bacia de evolução (local onde os navios atracam) e do canal de acesso ao Porto de Cabedelo (área externa do porto) no período de 16 de junho de 2010, possibilitando a visualização e interpretação em 3D das principais feições de fundo.

#### Subárea 01:

Para a Subárea 01, ilustrada pela Figura 4 (A), verifica-se que pequenas depressões marcam o fundo do canal. Estas depressões seguem continuamente o eixo do canal, mantendo-se numa distância que diminui progressivamente em direção à sua foz, estando provavelmente associadas a zonas de interferência de correntes inerentes a hidrodinâmica da região.

A Figura 4 (B) apresenta o bloco diagrama da Subárea 01 localizada na bacia de evolução do Porto de Cabedelo, onde se observa locais com grande assoreamento na porção oposta ao porto, com profundidades variando entre 1,80 a 13 metros. Este banco de areia lamoso que está formado próximo à bacia de evolução limita o giro das embarcações para atracação no porto. Na Bacia de Evolução, observa-se um assoreamento de sedimentos acentuado do lado oeste da bacia, com cotas bastante elevadas, impossibilitando a remoção com draga Hopper de médio porte. Tal situação, porém, com gravidade menor, ocorre no canal de transição onde as profundidades mínimas atingem menos 5,60m. Nesta Subárea as profundidades ao longo do canal de acesso ao porto variam de 06 a 11 metros, constituindo-se claramente na continuação da linha de talvegue do Rio Paraíba do Norte que acompanha sua margem.

Por fim, para a Figura 4 (B), um vale amplo limitado por taludes abruptos junto às margens pode ser observado próximo à foz, onde a influência marinha é

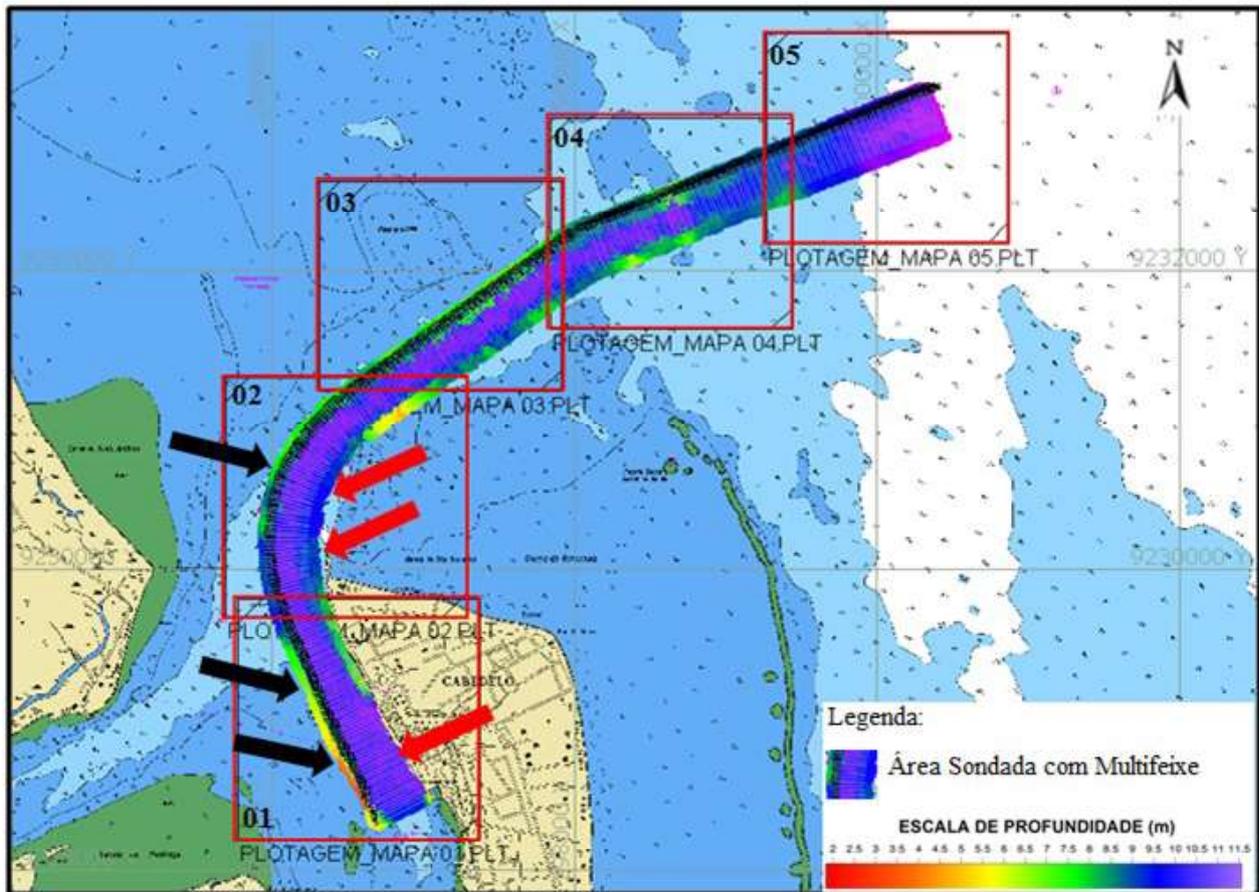


Figura 3 - Área sondada com multifixe na bacia de evolução e área costeira do Porto de Cabedelo (faixa em azul escuro) e as cinco Subáreas destacadas em vermelho para as quais foram elaborados os blocos diagramas em 3D, apresentadas sobre a base da Carta Batimétrica n.º 830 da DHN/CHM. As setas pretas marcam as margens convexas e as vermelhas as margens côncavas do canal submerso do estuário do Rio Paraíba do Norte.

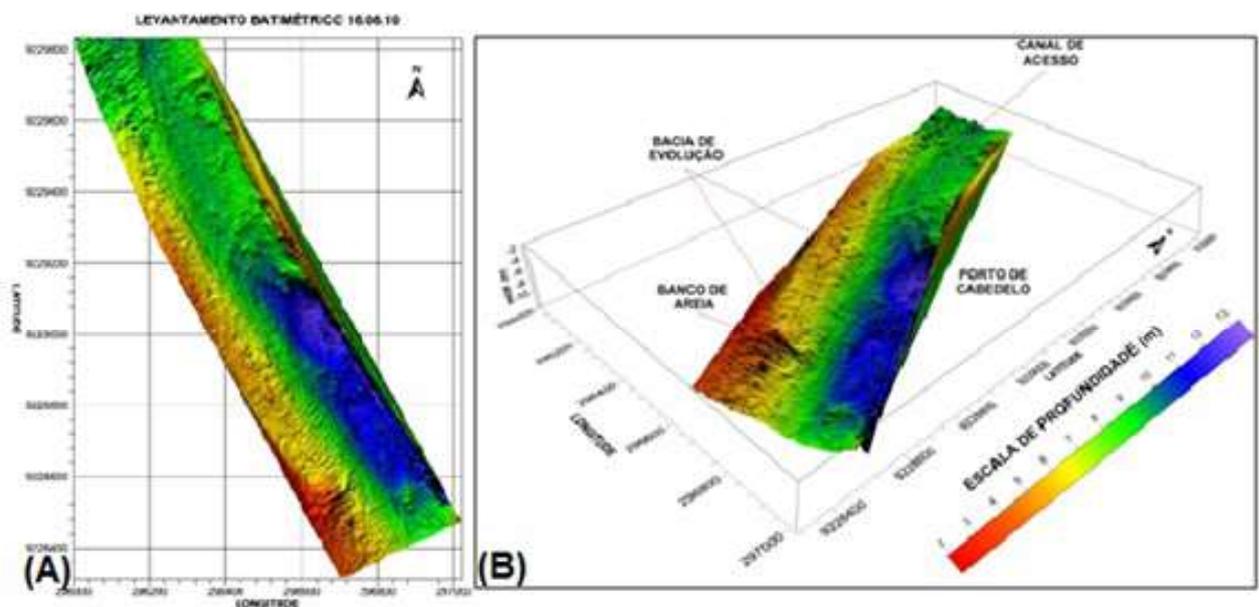


Figura 4 - (A) Mapa batimétrico mostrando a morfologia de fundo e (B) Mapa em 3D com efeito sombreamento, elevação de 33° e AZ° 315° da bacia de evolução do Porto de Cabedelo/PB, Subárea 01 sondada com multifixe, (Carta Batimétrica n.º 830 da DHN/CHM).

mais acentuada. Em direção ao interior do estuário, a região do canal principal de navegação vai diminuindo sua largura e adquirindo formas mais estáveis, em resposta tanto a um maior aporte sedimentar proveniente do Rio Paraíba do Norte, quanto à menor influência das correntes de maré.

*Subárea 02:*

A Figura 5 (A) apresenta a parte curva do canal de acesso ao Porto de Cabedelo, Subárea 02, mostrando a morfologia de fundo. Nas porções nordeste e sudoeste da área é possível verificar a presença de bancos de

areia carbonática que podem se tornar armadilhas naturais para a colisão e encalhe dos navios, ocasionando vazamentos acidentais de hidrocarbonetos neste trecho do canal.

A Figura 5 (B) apresenta o bloco diagrama da Subárea 02 com um giro de 180° AZ para melhor visualização das feições submersas. Esta área sondada possui 155 metros de largura, e profundidades variando entre 1,74 a 11,5 metros. Nas porções nordeste e sudoeste da área ocorrem profundidades variando entre 1,74 a 4,0 metros, provavelmente ocasionadas por possíveis bancos de areia carbonática.

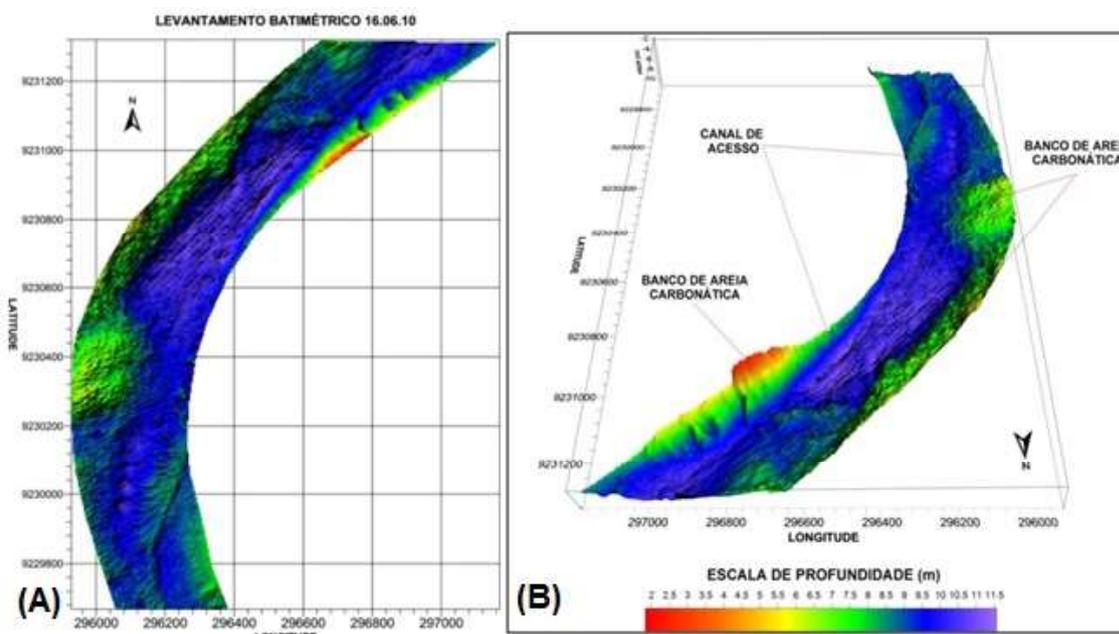


Figura 5 - (A) Mapa batimétrico com a morfologia de fundo e (B) Mapa em 3D com efeito sombreado, elevação de 48° e AZ 180° do canal de acesso do Porto de Cabedelo/PB, Subárea 02 sondada com multifeixe, (Carta Batimétrica n.º. 830 da DHN/CHM).

*Subárea 03:*

Neste trecho do canal observam-se grandes formas de leito, provavelmente provocadas pelo deslocamento de material arenoso devido ao acentuado fluxo de correntes nessa porção do canal, Figura 6 (A).

O bloco diagrama em 3D da Subárea 03, ilustrada na Figura 6 (B), é uma porção retilínea e externa do canal de acesso ao Porto de Cabedelo com uma largura de aproximadamente 152 metros, com profundidades variando entre 3,71 a 11,5 metros. Neste trecho do canal observam-se grandes formas de leito, provavelmente provocadas pelo fluxo turbilhonar e intenso fluxo de corrente de fundo.

*Subárea 04:*

A subárea 04 é uma das regiões mais críticas do canal de acesso ao Porto de Cabedelo por apresentar baixas profundidades, Figura 7 (A). Observando-se o bloco diagrama em 3D a seguir, Figura 7 (B), verifica-se que nesta área ocorrem profundidades atingindo 4 metros, ocasionadas por possíveis arenitos praias denominados “beachrocks”, que são antigas linhas de costa submersas. Portanto, este trecho se torna perigoso à navegação local devido as fortes rajadas de ventos e correntes que esta região é submetida, transformando os “beachrocks” em armadilhas naturais para colisão das embarcações.

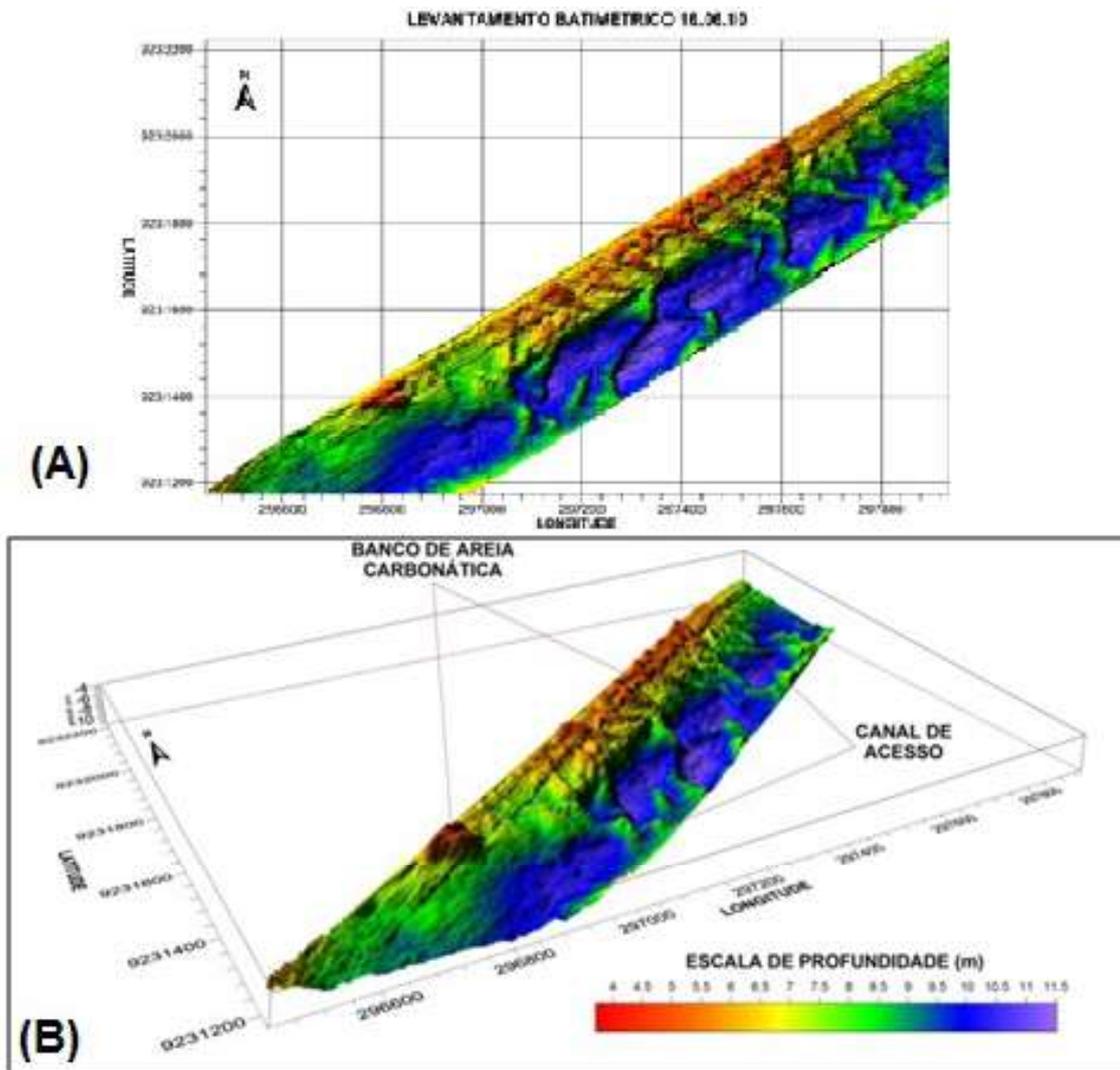


Figura 6 - (A) Mapa batimétrico com a morfologia de fundo da porção retilínea e externa do canal e (B) Mapa em 3D com efeito sombreado, elevação de 26° e AZ° 29° do canal de acesso do Porto de Cabedelo/PB, Subárea 03 sondada com multifeixe, (Carta Batimétrica n°. 830 da DHN/CHM).

Devido a esta situação a largura do canal principal de navegação de acesso ao Porto de Cabedelo fica restrita neste setor devido a esses afloramentos rochosos submersos.

#### Subárea 05:

A Subárea 05, Figura 8 (A) é a porção externa do canal principal de acesso ao Porto de Cabedelo, que possui as maiores profundidades, variando neste setor entre 7 e 13,5 metros. Comparando-se os blocos diagramas das Figuras 4 a 8, observa-se que ocorreu uma considerável mudança das feições submersas da bacia de evolução e do canal de acesso ao Porto de Cabedelo. A Figura 7, Subárea 04, mostra claramente a área

que está sofrendo derrocagem e algumas regiões que precisam ser dragadas ao longo do canal de acesso com profundidades variando entre 8,0 a 8,5 metros.

### 3.2 Processamento Físico-Oceanográfico

O planejamento e monitoramento geoambiental demandam o conhecimento da dinâmica dos ambientes costeiros. A circulação desta plataforma continental é governada principalmente pelas correntes de deriva, correntes de maré e ação das ondas. Desta forma, o presente estudo enfatizou caracterizar a hidrodinâmica interna da bacia de evolução do Porto de Cabedelo e a região da área costeira.

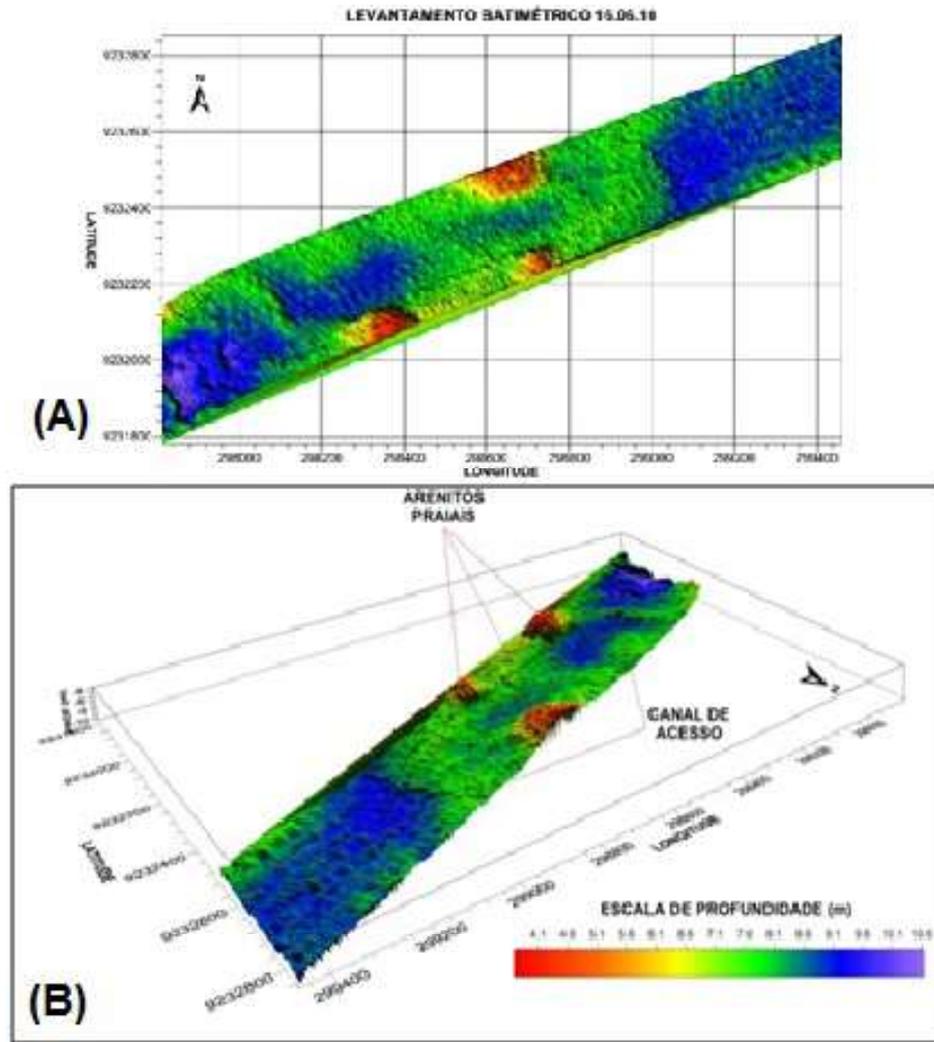


Figura 7 - (A) Mapa batimétrico mostrando os afloramentos rochosos submersos “beachrocks” próximo ao canal de acesso e (B) Mapa em 3D com efeito sombreamento, elevação de 28° e AZ 216° do canal de acesso do Porto de Cabedelo/PB, Subárea 04 sondada com multifeixe, (Carta Batimétrica n°. 830 da DHN/CHM).

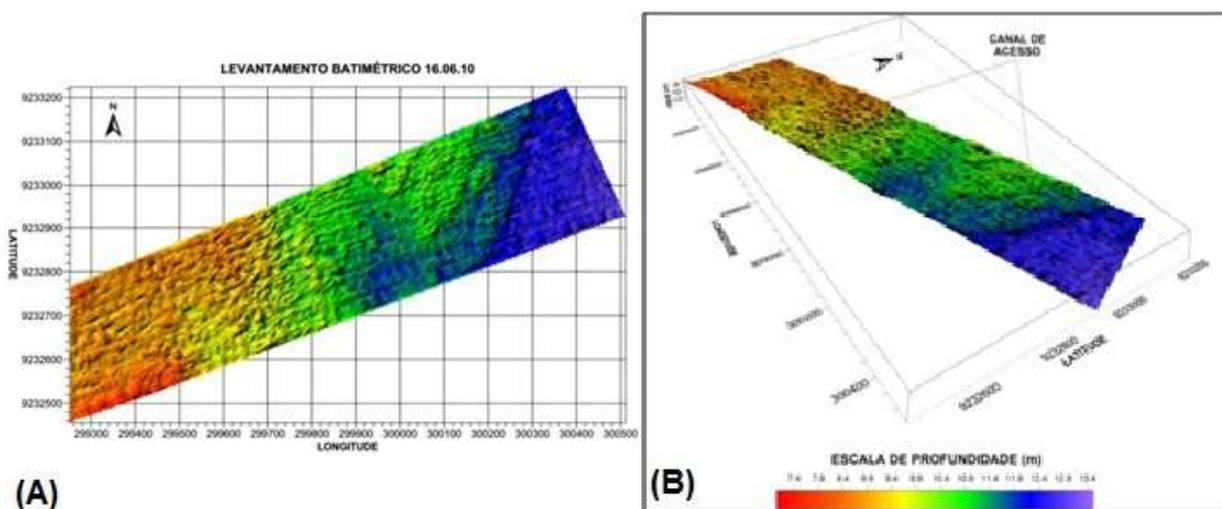


Figura 8 - (A) Mapa batimétrico mostrando da parte externa do canal de acesso e (B) Mapa em 3D com efeito sombreamento, elevação de 28° e AZ 216° do canal de acesso do Porto de Cabedelo/PB, Subárea 04 sondada com multifeixe, (Carta Batimétrica n°. 830 da DHN/CHM).

### Correntes

Os vetores de correntes na área costeira ocuparam predominantemente o quadrante N-NW (Figura 9), indicando claramente o sentido da corrente principal. A intensidade absoluta de corrente variou entre 0,01 e 2,33 m/s nesta região. Observa-se também que as correntes de enchente e vazante foram relativamente mais simétricas.

Figura 10 (A) mostra o perfil acústico da intensidade e a Figura 10 (B) a direção da corrente de maré ao longo da coluna d'água. Analisando-se a Figura 10 (A), podemos observar que na área costeira não existe estratificação ao longo da coluna d'água e sim uma grande camada de mistura (seta vermelha). Durante a medição dos dados de correntes com o ADCP fundeado na região da área costeira também foi possível observar a correlação da direção da corrente com os 04 estágios de maré (preamar, baixa-mar, vazante e enchente) na Figura 10 (B). Estes dados de correntes na região da zona costeira foram medidos no período de 16/06/2010 às 09:04hs até 17/06/2010 às 17:04 hs, fundeado em uma lâmina d'água de aproximadamente 14 metros na porção central da área costeira.

A partir do diagrama de dispersão dos vetores de correntes da bacia de evolução do Porto de Cabedelo, Figura 11, pode-se observar como a corrente de maré sofre uma canalização com sentido bidirecional provocado pelo efeito da maré (vazante e enchente) na bacia de evolução Porto de Cabedelo, no sentido NW-SE (seta vermelha), indicando claramente que no caso de um vazamento acidental, a mancha de hidrocarbonetos se deslocaria tanto para área costeira, quanto para o interior do canal atingindo o interior do estuário devido à dinâmica do canal do Rio Paraíba do Norte.

A Figura 12 (A) e 12 (B) apresenta a série temporal das componentes N-S e E-W do vetor de corrente na estação localizada na bacia de evolução do Porto de Cabedelo, no período de 15/06/2010 às 11:01hs até 16/06/2010 às 08:31 hs.

Analisando-se conjuntamente as Figuras 11, 12 (A e B), observa-se que ocorre uma refração da propagação da onda para o interior da bacia de evolução, com direções preferenciais provenientes dos quadrantes SE (enchente) e NW (vazante), e que a maior velocidade das correntes ocorre na baixa-mar, seta vermelha na Figura 12 (A).

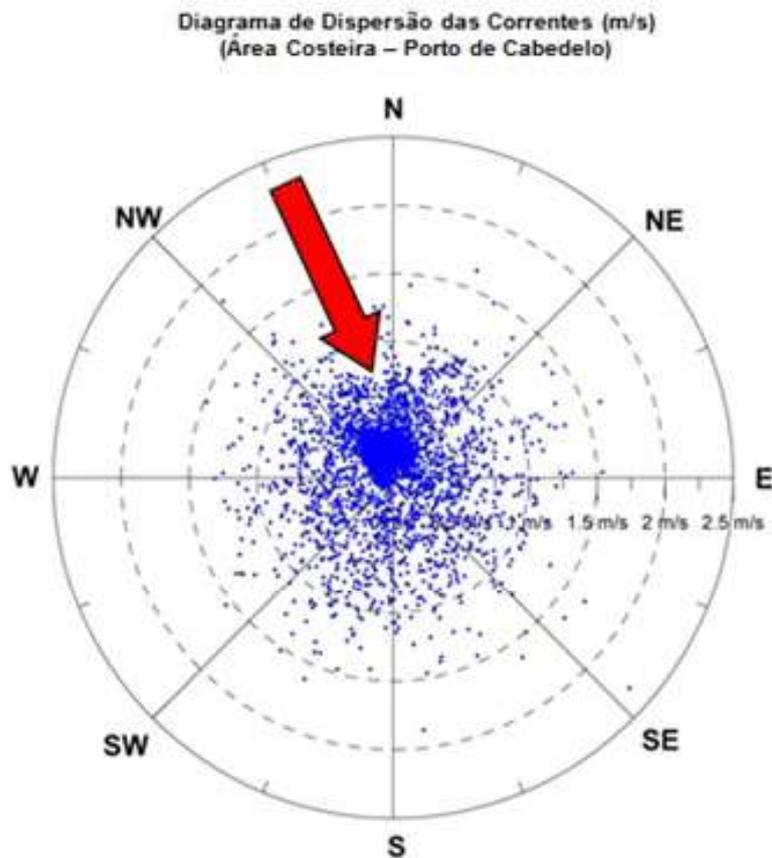


Figura 9 - Diagrama de dispersão das correntes (m/s) para a região da área costeira do Porto de Cabedelo/PB.

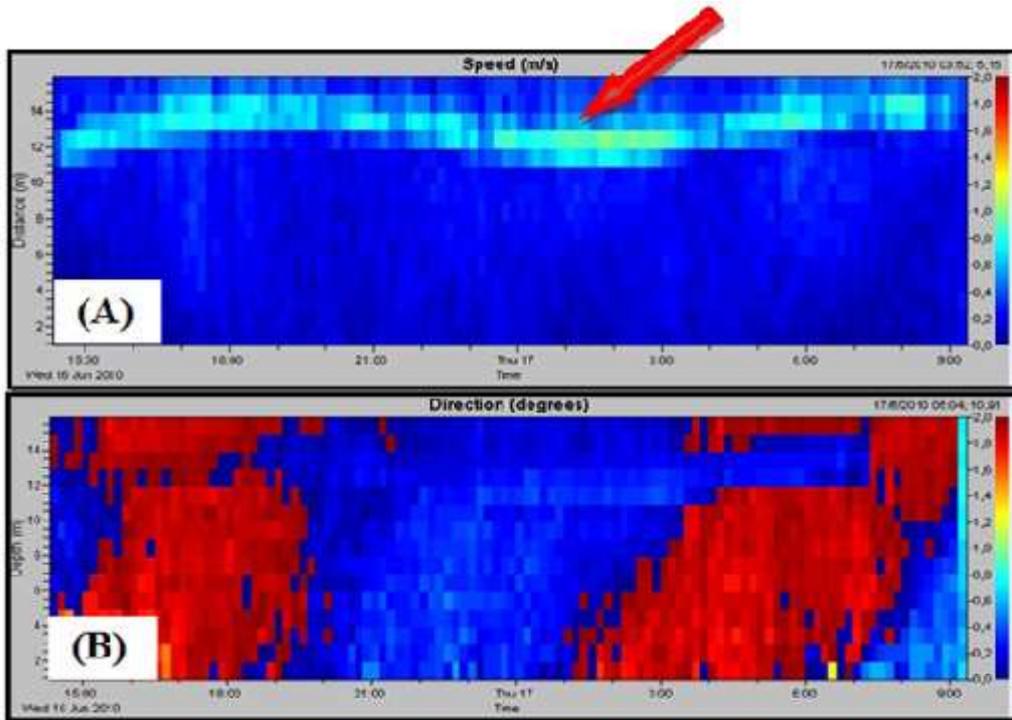


Figura 10 - Perfil acústico: (A) da intensidade das correntes e (B) direção das correntes medidas com ADCP da NORTEK na área costeira do Porto de Cabedelo, no período de 16/06/10 às 09:04hs até 17/06/10 às 17:04 hs.

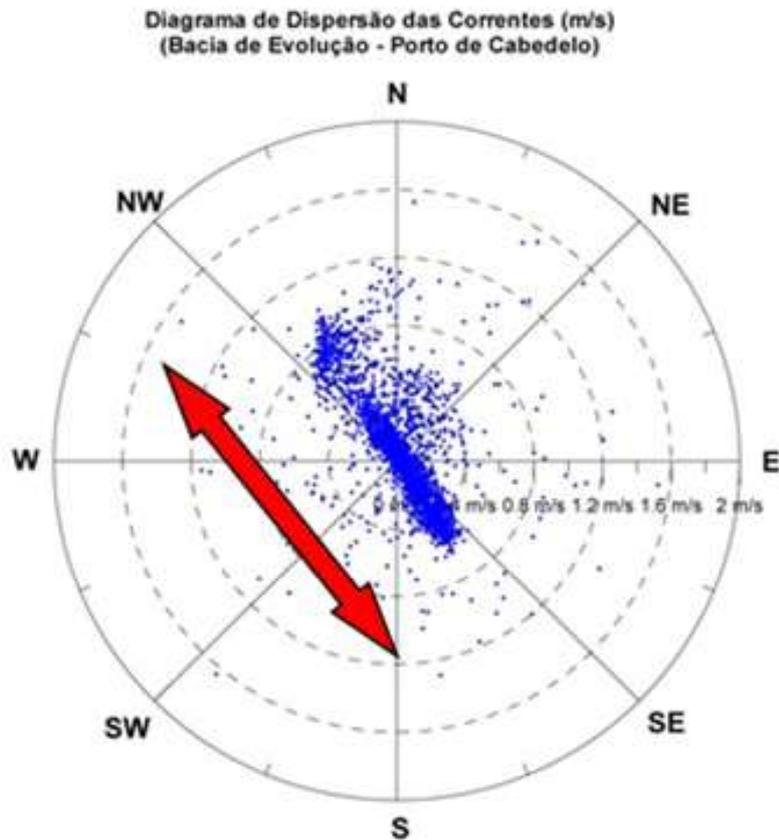
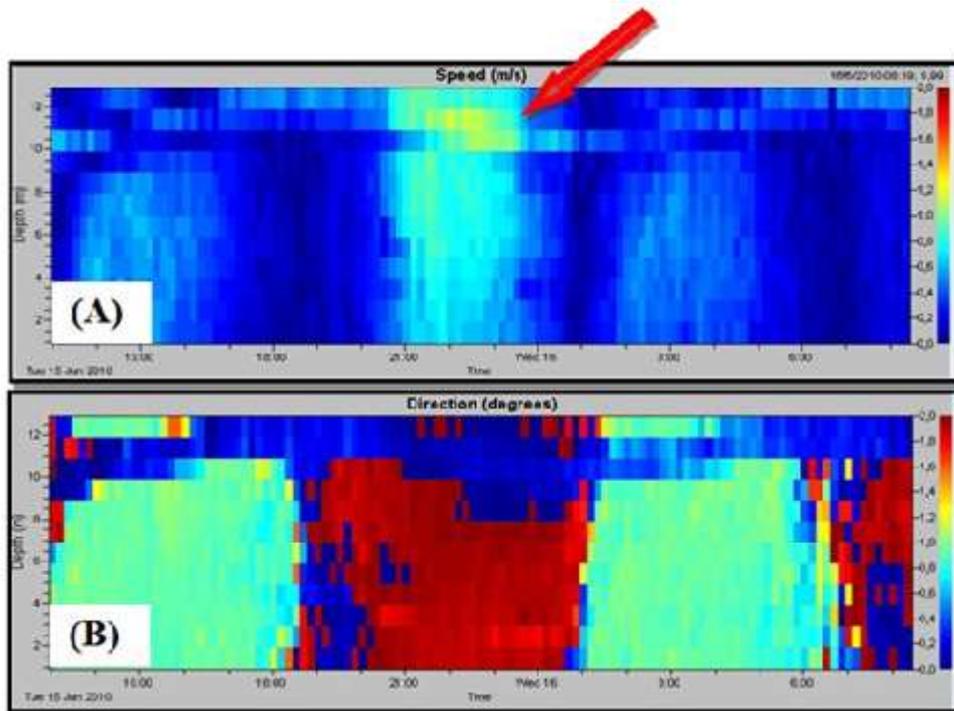


Figura 11 - Diagrama de dispersão das correntes de maré (m/s) para a bacia de evolução (local onde os navios atracam) área interna do Porto de Cabedelo.



**Figura 12** - Perfil acústico: (A) da intensidade das correntes, indicando que a maior velocidade das correntes ocorre na baixa-mar (seta vermelha) e (B) direção das correntes medidas com ADCP da NORTEK na área costeira do Porto de Cabedelo, no período de 15/06/10 às 11:01hs até 16/06/10 às 08:31 hs.

### Ondas

De acordo com os dados, foi observada a predominância de ondas com alturas significativas próximas a 1,21 metros e alturas máximas de 2,16 metros para a região da área costeira (Figura 13). Na bacia de evolução do Porto de Cabedelo ocorrem alturas mínimas de 0,09 metros, média de 0,21 metros e máximas de 0,30 metros (Figura 14), evidenciando a situação de “bom tempo”, com predominância de mar local, durante todo o período amostrado.

Conforme anteriormente mencionado, a análise espectral das ondas foi realizada com base num registro muito curto de medição (15 a 18/06/2010) e deve ser considerada com restrições. Apesar disso, foi possível estabelecer uma primeira caracterização do padrão de ondas na região da área costeira/mar aberto e bacia de evolução do Porto de Cabedelo.

Entretanto, recomenda-se que novas medições de altura de onda sejam efetuadas em todas as estações de medição, utilizando-se uma taxa amostral de 0,5 s e um período de registro de, no mínimo, 10 a 20 minutos. Estes registros devem ser repetidos a cada 30 a 60 minutos num período de monitoramento de pelo menos 15 dias.

O período de pico das ondas ( $T_p$ , s) apresentou mediana de 5,04 s, predominando ondas com  $T_p < 6$  s e alturas significativas ( $H_s$ ) inferiores a 0,30 m. Valores máximos e médios de  $H_s$  foram de 0,85 e 0,13 m, respectivamente.

De acordo com o diagrama de dispersão das alturas das ondas para a região costeira e da bacia de evolução do Porto de Cabedelo, Figura 15 (A), verifica-se que as ondas com altura moderada a forte vêm da direção E para a região costeira localizada a cerca de 6 km em direção a *offshore*. Porém, na dispersão das ondas na bacia de evolução do Porto de Cabedelo, ocorre uma dispersão das ondas alterando o sentido e altura da mesma. Na Figura 15 (B), observa-se que as ondas vem do quadrante E e do quadrante SE, sendo este último provocado pelos ventos oriundos do continente, com menos intensidade e amplitude que na área costeira (mar aberto).

### Caracterização Climatológica

As movimentações originadas pelos ventos geram movimentos complexos na coluna d'água e são importantes na compreensão dos processos costeiros.

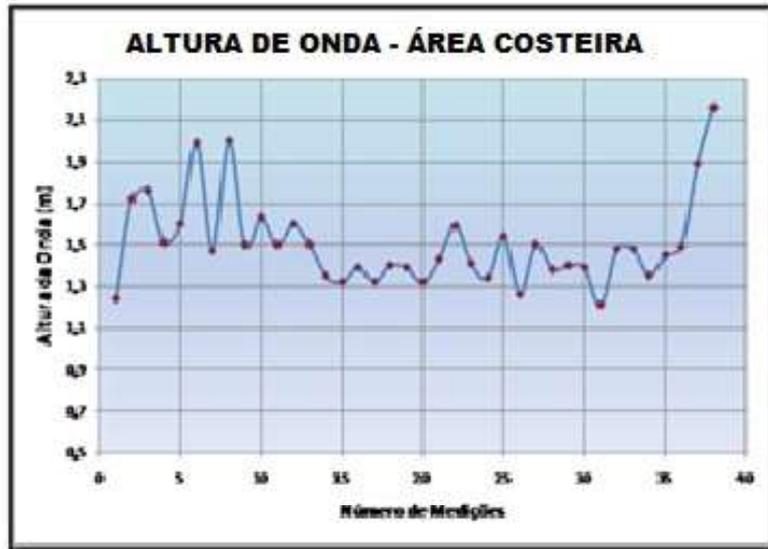


Figura 13 - Frequência relativa das alturas significativas ( $H_s$ ) dos dados de onda para a área costeira do Porto de Cabedelo.

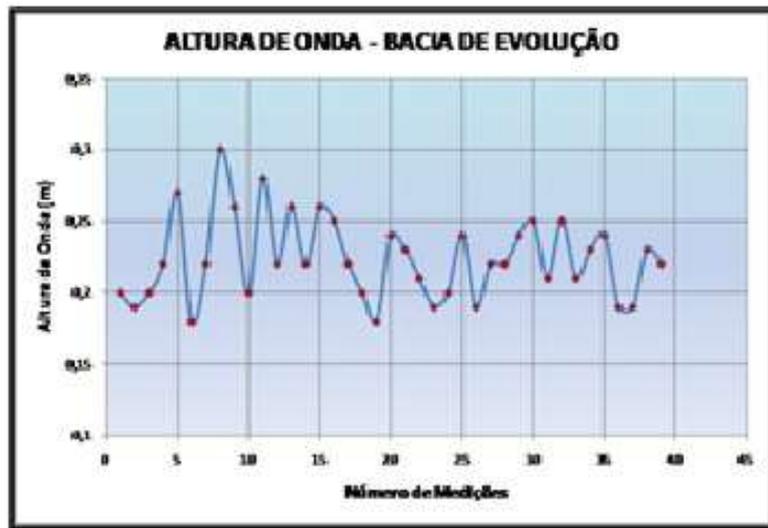


Figura 14 - Frequência relativa das alturas significativas ( $H_s$ ) dos dados de onda para a bacia de evolução do Porto de Cabedelo.

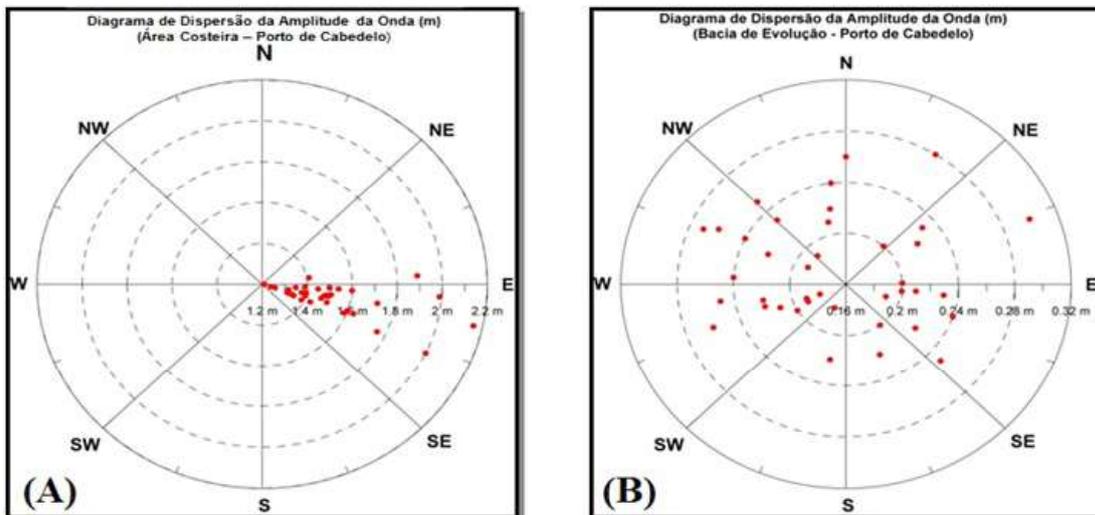


Figura 15 - Diagrama de dispersão das alturas de ondas para a região da área costeira (A) e bacia de evolução (B) do Porto de Cabedelo.

A região é caracterizada pela grande incidência de raios solares, implicando assim, na disponibilidade de energia luminosa. O regime térmico é bastante uniforme, com temperaturas elevadas e pequenas variações ao longo do ano. Não há registros históricos para a região de ocorrência de tempestades, ciclones ou furacões.

#### *Regime dos Ventos*

A região nordeste do Brasil encontra-se localizada no cinturão de ventos alísios. Os ventos alísios que alcançam a costa do Estado da Paraíba são predominantemente provenientes de SE e NE e estas direções são controladas pelos movimentos da Zona de Convergência Intertropical.

No litoral do Estado da Paraíba na cidade de João Pessoa os ventos sopram de Leste para Oeste, de Nordeste para Sudoeste e de Sudeste para Noroeste, o que fica claramente evidenciado pela disposição das dunas costeiras. Devido à presença constante e intensa dos ventos alísios, as massas de águas são bem misturadas sem a presença de qualquer estratificação. A velocidade e direção dos ventos influenciam diretamente nos

processos costeiros, seja na geração de ondas (que por sua vez irão gerar sistemas de circulação e as correntes costeiras), seja como importante agente na dinâmica sedimentar das praias, constituindo-se no principal responsável pelo sistema de troca de areias entre as praias e as dunas. A distribuição sazonal das direções dos ventos não apresenta grandes variações, ocorrendo apenas mudanças na frequência em função de grandes perturbações atmosféricas, cuja intensidade respeita o ciclo climatológico dos ventos na região equatorial. As direções Leste-Oeste e Nordeste-Sudoeste dos ventos estão relacionadas à ação do Anticiclone Sul que diminui no Norte e Nordeste do Brasil, passando para a atuação da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT.

A partir dos dados de ventos processados para o período de 28/02 a 04/07 de 2010, notou-se que os ventos mais frequentes neste mês são de SE, E e NE. Ventos de Norte ou Sul, dificilmente atuam na região por muito tempo, e os ventos de Oeste, Sudoeste e Noroeste são muito pouco frequentes. O diagrama de dispersão dos vetores de ventos para o período de 28/02 a 04/07 de 2010 é mostrado na Figura 16.

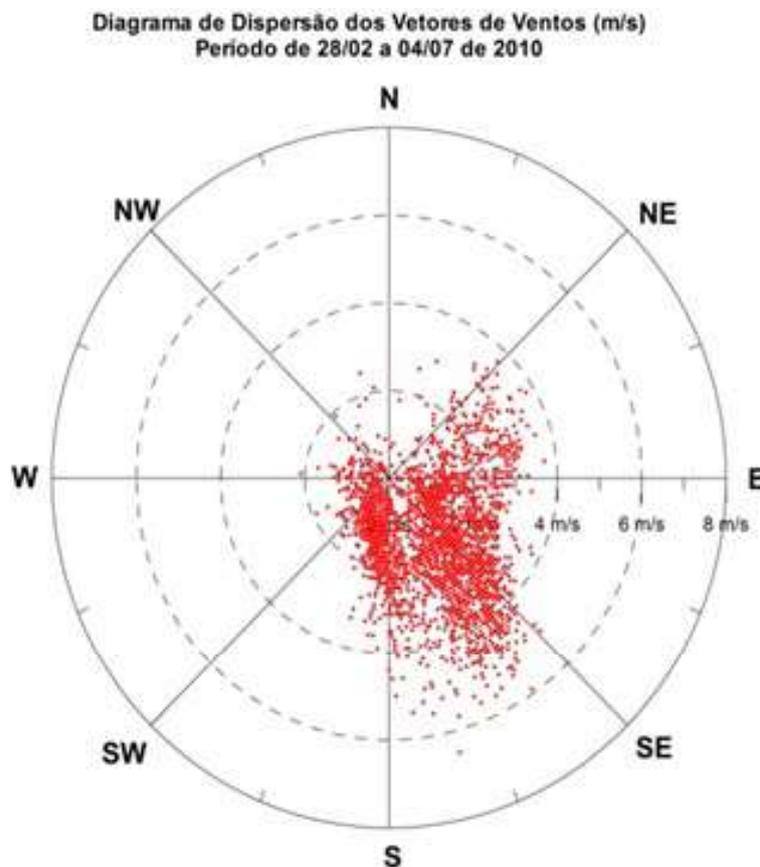


Figura 16 - Diagrama de dispersão dos vetores de ventos para área do Porto de Cabedelo, no período de 28/02 a 04/07 de 2010.

A caracterização meteorológica foi feita por um período reduzido, mas que não se apresentou atípico e os valores trabalhados estão dentro das médias esperadas para a região de estudo, porém o ideal é que se faça uma série temporal, para que se possam extrair resultados mais expressivos.

### 3.3 Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto

#### Composição 4-2- NDWI

A composição colorida em RGB 4-2-NDWI para a área de estudo evidencia com maior detalhamento as feições submersas da bacia de evolução e da zona costeira adjacente ao Porto de Cabedelo. As unidades geoambientais presentes na faixa litorânea também foram evidenciadas: áreas de manguezais e florestas em vermelho escuro; áreas agrícolas com cores variando entre vermelho e alaranjado claro; áreas com solos expostos evidentes em polígonos esbranquiçados e amarelados; áreas urbanas definidas por cores claras e

estruturas decorrentes da distribuição dos arruamentos; canais de marés e corpos d'água em cores azul escuro; na península entre Cabedelo e João Pessoa há o destaque para as praias arenosas na cor amarelo com a forma característica de baías formadas nas zonas sem a proteção de recifes; o canal principal do rio Paraíba do Norte e os bancos areno-lamosos e/ou lamosos próximos às margens também são melhor definidos, do mesmo modo que o canal do rio da Guia. Contudo, o incremento mais relevante da imagem da Figura 17 está na identificação de algumas formas de fundo no substrato marinho adjacente à península da cidade de Cabedelo.

Na imagem da Figura 17 observa-se que cores em tons azuis mais escuros, aparecem em águas continentais como rios e lagoas (setas pretas na Figura 17), possivelmente devido à alta absorção da matéria orgânica, enquanto que cores em tons azuis claros denotam águas costeiras, onde a contribuição da corrente de deriva litorânea, como também a ação das ondas que ressuspendem e transportam sedimentos (setas vermelhas na Figura 17).

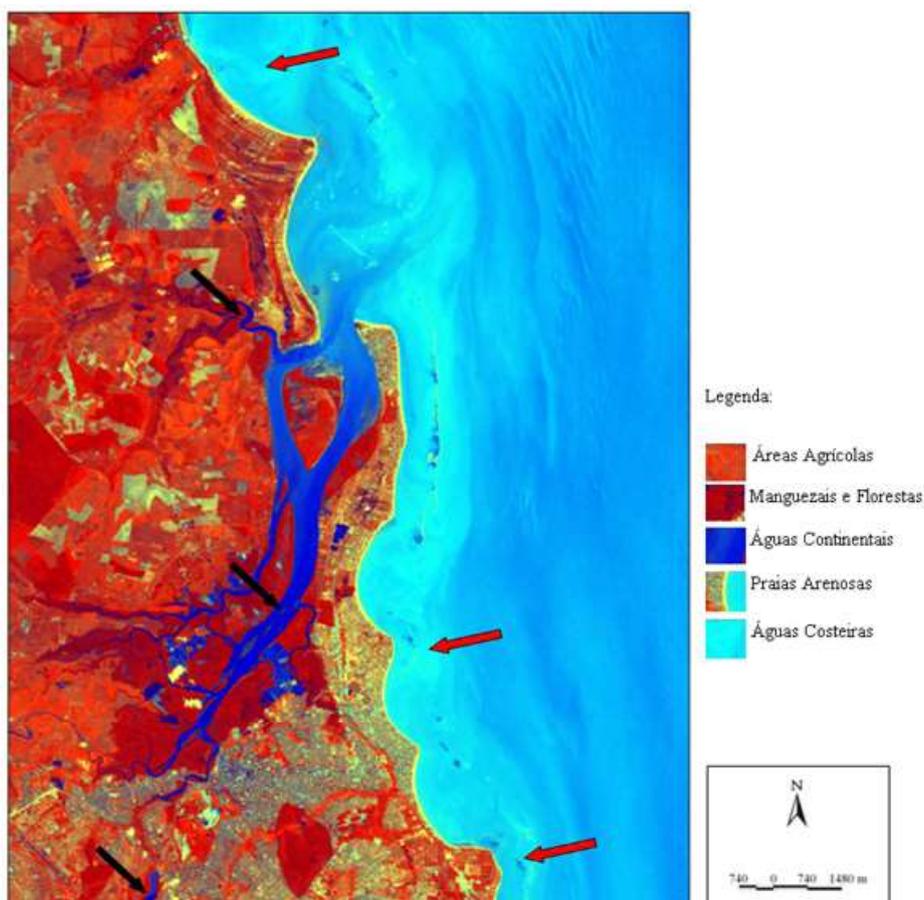


Figura 17 - Carta imagem da composição colorida das bandas 2-4- NDWI do LANDSAT7 ETM+ combinadas em RGB realçando as áreas submersas e possíveis arenitos praias presentes no ERP, 2001.

Composição RGBI 4-2-NDWI- PC1

Para esta etapa, utilizou-se a composição colorida RGB4-2-NDWI fusionada com a PC1 no canal Intensity, submetida a um filtro direcional de matriz 5x5, com o intuito de discriminar e realçar estruturas de fundo, antes não perceptíveis na imagem, como também demarcar o tipo de água quanto ao volume de sedimentos em suspensão (Figura 18).

A porção NE da Figura 18 mostra estruturas sigmoidais semelhantes a *sandwaves* que aparecem alongadas no sentido NW-SE (setas pretas na Figura 18), onde tais estruturas são formações menores e intercaladas, porém presentes em maior densidade na imagem, provavelmente influenciadas e controladas pelo fluxo hidrodinâmico. Os bancos arenosos aparecem dispostos no sentido N-S por mais de 10 km ao longo da imagem (setas vermelhas na Figura 18), visivelmente maiores, longas e contínuas, acompanhando a geometria do continente, provavelmente

definindo a posição pretérita de antigas linhas de costa submersas. Essas estruturas acompanham a presença de *beachrocks* que também se estendem de N-S, ao longo da margem do continente (setas azuis na Figura 18). Ainda na Figura 18, as tonalidades em vermelho e em azul no ERPN demonstram possivelmente a presença de matéria orgânica transportada pela água desse estuário. As cores em tons amarelados sugere pluma de material particulado em suspensão transportado pela corrente de deriva litorânea. Tal feição indica ainda que o sentido da corrente de deriva litorânea é de S para N. Por fim, as cores em tons esverdeados aparecem mais afastadas do continente, denotando águas oceânicas profundas e pobres em sedimento em suspensão e matéria orgânica. As áreas sem a proteção de *beachrocks* sofrem maior erosão, pelo efeito de ondas e marés, como mostram as linhas de costa em formas côncavas (setas brancas) ao longo do litoral.

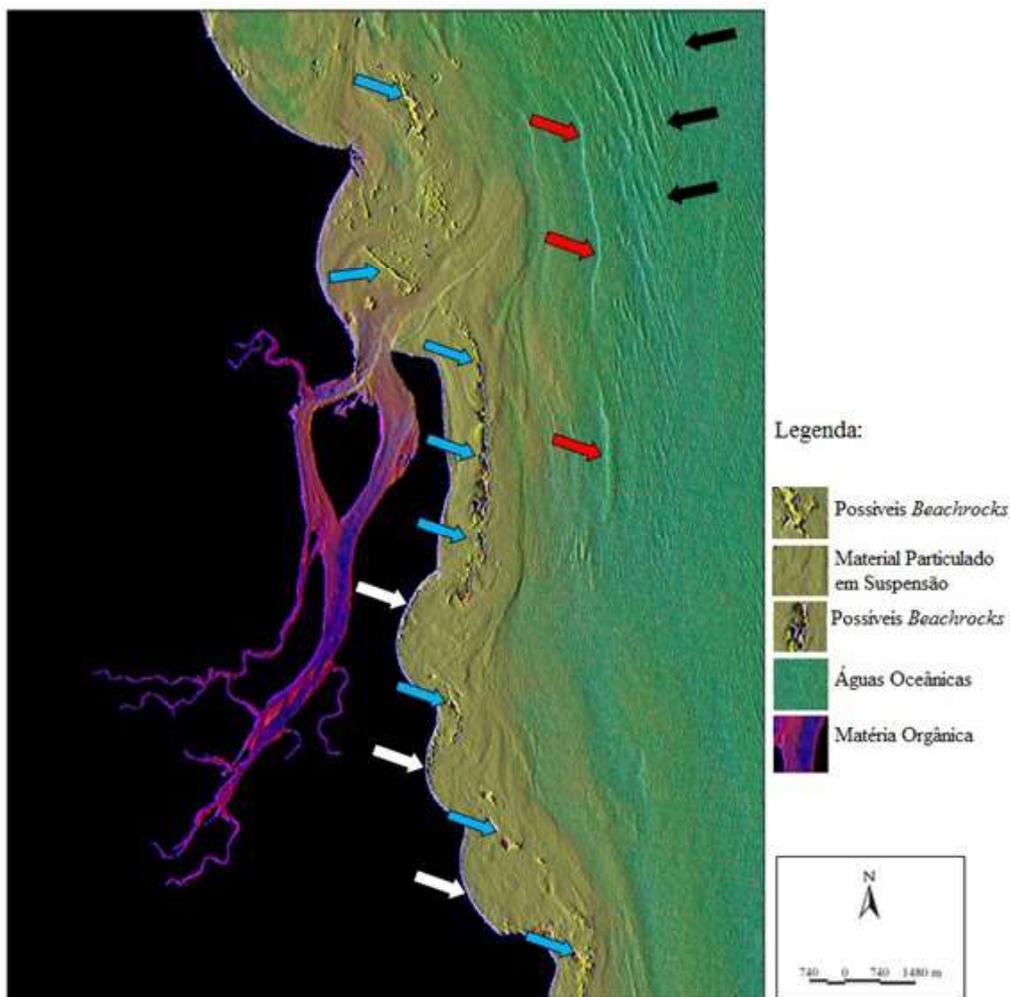


Figura 18: Carta imagem do LANDSAT7 ETM+ (2001) com composição colorida RGBI 4-2-NDWI - PC1, com filtragem direcional 5x5, realçando a morfologia submersa presentes no ERPN.

Na Figura 19 utilizou-se os mesmos parâmetros de composição de bandas da Figura 18 com o reamostragem de histograma da imagem, o que permitiu destacar a extensão da pluma de sedimentos em suspensão carregados pela corrente de deriva litorânea (cores em tons avermelhados). As feições em tons azulados, possivelmente bancos areno-lamosos e/ou lamosos submersos puderam ser evidenciados ao longo do leito do rio (setas verdes na Figura 19).

No momento do imageamento pelo LANDSAT 7 ETM+ as condições eram de baixa mar o que pode ter contribuído para os resultados analisados, aumentando os valores de correlação do NDWI, o qual toma como vantagem as diferenças entre as reflectâncias das faixas espectrais do verde e do infravermelho próximo.

Distinguir diferentes variações causadas por alterações na profundidade da água, pelo tipo de fundo e pelo espalhamento e absorção na coluna d'água por material em suspensão, é o grande desafio quando se trata de identificação de morfologias submersas e da

pluma de sedimentos por imagens de satélite em áreas costeiras e estuarinas.

### Considerações Finais

Os levantamentos batimétricos são cruciais para a navegação em qualquer corpo aquoso, além de serem necessários para as modelagens hidrodinâmicas e acompanhamento de processos de erosão ou assoreamento. A associação de procedimentos de estatísticas espaciais aos SIGs é importante porque permite representações com hipóteses mais próximas do contínuo dos fenômenos ambientais e também porque quantifica as imprecisões associadas aos produtos trabalhados.

As técnicas de aquisição de dados hidroacústicos utilizando em conjunto levantamentos batimétricos de alta e baixa frequência, se mostraram excelentes ferramentas para obter informações sobre as condições hidrodinâmicas atuais na área de estudo, sobre a localização e a profundidade de corpos rochosos submersos,

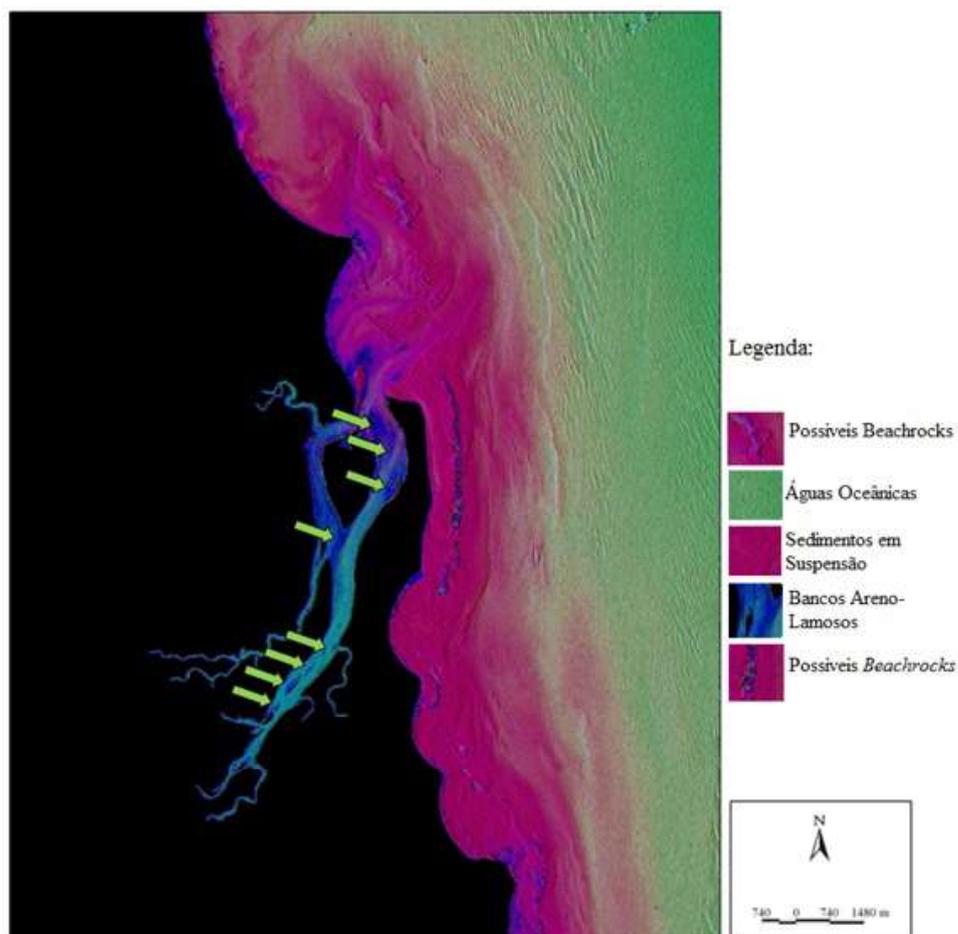


Figura 19 - Imagem do LANDSAT 7 ETM+ (2001) com composição colorida RGBI 4-2-NDWI - PCI, com realce de histograma para destaque para a morfologia submersa, a pluma de sedimentos e arenitos praias presentes no ERP.

além de obter a relação entre os tipos de leitos marinhos, que podem se tornar armadilhas naturais para colisão, encalhe de embarcações e aprisionamento de hidrocarbonetos em caso de vazamentos acidentais.

A integração de produtos multitemporais (mapas digitais e imagens de sensores remotos) utilizados como base no estudo multitemporal do Estuário do Rio Paraíba do Norte, mostraram-se eficientes para a caracterização geomorfológica do ERP, realçando estruturas submersas que antes não eram perceptíveis nas imagens.

Dados de sensoriamento remoto também podem prover uma contribuição valiosa na batimetria em áreas estuarinas. Entretanto, as condições ambientais podem ter uma maior influência na acurácia da técnica e necessitam ser consideradas quando da aplicação de modelos. Mesmo sem a acurácia das cartas náuticas, mapas como os gerados neste trabalho são de utilidade tanto para o planejamento de estudos e para a modelagem ambiental, quanto para a segurança da navegação de embarcações de grande e pequeno porte.

O grande volume de sedimentos que estão provocando o assoreamento da bacia de evolução e do canal principal de navegação pode ser causado por diversos fatores como: (1) mau uso do solo e agricultura inadequada em toda a área da bacia hídrica que deságua no ERP e devido às fortes chuvas que atingiram toda a região nos últimos anos; (2) erosão das margens, intensificada pelo desmatamento; e (3) transporte de sedimentos finos provenientes das regiões interiores. Lembrando que para se identificar as causas do assoreamento na região se faz necessário um estudo detalhado da taxa de sedimentação, procedência de sedimentos e um monitoramento sazonal dos parâmetros hidrodinâmicos.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo (PPGCEP/UFRN), a CAPES pela bolsa de estudo concedida, ao Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO/UFRN), aos Projetos Cooperativos HIDROSEMA e MOLECO da Rede Cooperativa Norte-Nordeste de *Monitoramento Ambiental de Áreas Sob Influência da Indústria Petrolífera (REDE 05-PETROMAR/CTPETRO-FINEP/PETROBRAS/CNPq)*. Agradecimento especial ao Dr. Anderson Targino da Silva Ferreira pelo auxílio com o processamento das imagens e ao MSc. Eugênio Pires Frazão pelo auxílio nas saídas de campo.

### **Referências Bibliográficas**

- CAVALCANTE, M.S. & ALBUQUERQUE, M. A. M. **A Dinâmica Espacial do Fluxo Marítimo do Porto de Cabedelo/PB**. Centro de Ciências Exatas e da Natureza/Departamento de Geociências. X ENCONTRO DE INICIAÇÃO À DOCÊNCIA, UFPB - PRG, 2007.
- FRAZÃO, E. P. **Caracterização Hidrodinâmica e Morfo-sedimentar do Estuário Potengi e Áreas Adjacentes: Subsídios para Controle e Recuperação Ambiental no Caso de Derrames de Hidrocarboneto**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal/RN, 144p. 2003.
- GUEDES, L. **Monitoramento Geoambiental do Estuário do Rio Paraíba do Norte – PB por Meio da Cartografia Temática Digital e Por Meio de Produtos de Sensoriamento Remoto**. Dissertação de Mestrado, PPGG/UFRN, p. 5, 38, 2002.
- GUEDES, L. AMARO, V. E. VITAL, H. Caracterização da morfologia de fundo da porção estuarina do canal do Rio Paraíba do Norte por meio do Sonar de Varredura Lateral e do Ecobatímetro. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, INPE p. 35-38, 2011.
- KRUG, L.A.; NOERNBERG, M.A. O Sensoriamento Remoto como Ferramenta para Determinação de Batimetria de Baixios na Baía das Laranjeiras, Paranaçuá – PR. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 101-105, 2007
- Mapa Batimétrico do Estuário do Rio Paraíba do Norte**. Escala 1:25.000. NEPREMAR. Núcleo de Estudos e Pesquisas dos Recursos do Mar. Projeto Estudos Ecológicos no Estuário do Rio Paraíba do Norte – PB. 1980.
- MCFEETERS, S.K. The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.
- NEPREMAR. Núcleo de Estudos e Pesquisas dos Recursos do Mar. Estudos Ecológicos no Estuário do Rio Paraíba do Norte – PB. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa-PB. **Relatório Técnico Final**. 162p. 1980.
- SOARES, A. **Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente**. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 203 págs. 2000.
- SURFER. Surfer 8.0. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers, **User's Guide**. New York. Golden Software, Inc. 2008. 639p.