



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA  
CP: 1.639 CEP: 59.072-970 NATAL-RN TEL(FAX): 215-3831

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E MORFO-  
SEDIMENTAR DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREAS  
ADJACENTES: SUBSÍDIOS PARA CONTROLE E  
RECUPERAÇÃO AMBIENTAL NO CASO DE  
DERRAMES DE HIDROCARBONETO**

Autor:

**EUGÊNIO PIRES FRAZÃO**

Orientadora:

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Helenice Vital (DG/PPGG/UFRN)**

**Dissertação nº 36 / PPGG**

**Natal - RN, maio de 2003**

Divisão de Serviços Técnicos  
Catalogação da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Frazão, Eugênio Pires.

Caracterização hidrodinâmica e morfo-sedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes : subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto / Eugênio Pires Frazão. – Natal, RN, 1998.

144 f. : il.

Orientador: Helenice Vital.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica.

1. Sensoriamento remoto – Estuário Rio Potengi (RN) – Dissertação. 2. Mapeamento de sensibilidade ambiental – Estuário Rio Potengi (RN) – Dissertação. 3. Hidrodinâmica – Estuário Rio Potengi (RN) – Dissertação. 4. Recuperação ambiental – Hidrocarbonetos – Dissertação. I. Vital, Helenice. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 528.8(813.2)(043.2)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA  
CP: 1.639 CEP: 59.072-970 NATAL-RN TEL(FAX): 215-3831

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E MORFO-  
SEDIMENTAR DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREAS  
ADJACENTES: SUBSÍDIOS PARA CONTROLE E  
RECUPERAÇÃO AMBIENTAL NO CASO DE  
DERRAMES DE HIDROCARBONETO**

Autor:

**EUGÊNIO PIRES FRAZÃO**

*Dissertação de Mestrado apresentada em 19 de maio de 2003, para obtenção do título de Mestre em Geodinâmica pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN.*

Comissão Examinadora:

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Helenice Vital (orientadora)**

**Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr. (LAGEMAR/UFF)**

**Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro (DG/CCET/PPGG/UFRN)**

Natal - RN, maio de 2003



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Ciências Exatas e da Terra

**Programa de Pesquisa e Pós-Graduação  
em Geodinâmica e Geofísica - PPGG**

**PARECER DA BANCA EXAMINADORA  
DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO ALUNO**

**EUGÊNIO PIRES FRAZÃO**

O mestrando fez uma boa apresentação da sua Dissertação, utilizando adequadamente o tempo previsto para a apresentação. O candidato demonstrou um excelente domínio das questões relativas à pesquisa, aliando sua grande experiência profissional na metodologia empregada, avançando no conhecimento em geofísica marinha, sedimentologia e sensoriamento remoto. Outra grande contribuição do candidato foi a iniciação da análise integrada dos dados como subsídio para controle e recuperação ambiental no caso de derrame de hidrocarboneto, abrindo oportunidades de pesquisas para futuros estudantes. Na arguição, o aluno respondeu muito bem às questões formuladas pela banca, acatando com postura corretamente científicas as críticas recebidas. O texto está de uma maneira geral bem escrito, apresentado contudo alguns pontos de melhoria antes de sua edição final. As ilustrações são de boa qualidade, apresentando de forma clara e objetiva os dados, os métodos utilizados e as interpretações e conclusões decorrentes. De acordo com a análise de todos os elementos, a Banca avaliou que os resultados apresentados satisfazem plenamente os requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geodinâmica. Tendo em vista a multidisciplinaridade do assunto e as inovações incorporadas, o aluno foi aprovado com conceito A.

Natal, 19 de maio de 2003

**Prof. Dra. Helenice Vital**

**Orientadora e Presidente da Banca (DG/CCET/PPGG/UFRN)**

**Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr.  
Examinador externo (LAGEMAR/UFF)**

**Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro  
Examinador interno (DG/CCET/PPGG/UFRN)**



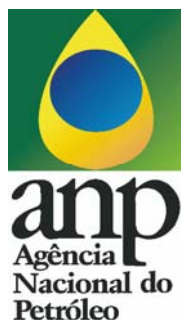


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA**  
*CP: 1.639 CEP: 59.072-970 NATAL-RN TEL(FAX): 215-3831*

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Dissertação desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN), tendo sido subsidiada pelos seguintes agentes financiadores:

- Agência Nacional do Petróleo - ANP/PRH-22,
- Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP, através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor Petróleo e Gás Natural - PRH-ANP/MME/MCT,
- TRANSPETRO / PETROBRAS: mapeamento de sensibilidade ambiental dos ecossistemas da linha de costa em áreas portuárias de atuação da TRANSPETRO,
- PETRORISCO (FINEP/CNPq/CTPETRO): monitoramento ambiental das áreas de risco a derrames de petróleo e derivados.



*“... vivam suas próprias experiências, pois elas  
são únicas ”*

*Paulo Coelho*

*Dedico este trabalho sobretudo aos meus pais, Eugênio Frazão e Carmen Maria Castro Pires Frazão que me puseram no mundo, e à minha esposa Luciana de Sousa Frazão, companheira de todos os dias, que sempre me deram forças para seguir esta estrada tortuosa que é a vida.*

## AGRADECIMENTOS

Quando finalizamos um trabalho como este, o sentimento é de haver percorrido um longo caminho. O esforço foi grande, mas a sensação é maravilhosa. E, nesse trabalho muitas pessoas me ajudaram, ficando uma parte de cada uma delas nesta dissertação. Outras, não serão citadas nesta folha de agradecimentos, mas elas me auxiliaram de modo indireto com uma palavra amiga, um incentivo ou com amizade e estarão sempre dentro de mim, junto com um sentimento de gratidão.

Meus Agradecimentos:

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Helenice Vital, pelo voto de confiança, sua amizade, esforço, sugestões, atenção, incentivo e críticas que contribuiu decisivamente para o êxito deste trabalho e, principalmente, pela liberdade dada para elaboração do tema da pesquisa desenvolvida e apoio para integração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro, que desde o início desta dissertação tem me orientado a respeito das diversas técnicas de processamento digital de imagens e por ter cedido a imagem ETM+ do satélite Landsat-7.

Ao Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pela aceitação no referido programa, e por me dar a oportunidade, subsídio e incentivo para a conclusão do curso de mestrado, através de seus professores, funcionários e infraestrutura.

À Secretária da PPGG, Nilda, pela sua eficiência, dedicação e carinho, com os quais tem merecido o título de “anjo da guarda” dos alunos.

À Agência Nacional do Petróleo ANP/PRH-22, pela concessão da bolsa de mestrado que permitiu minha dedicação exclusiva a este trabalho ao longo dos últimos 2 anos .

Ao Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), pela utilização de seu laboratório de geoprocessamento, onde foram tratadas as imagens de satélite.

Aos membros da banca de exame de qualificação, Profs. Drs. Helenice Vital, Francisco Hilário Bezerra e Venerando Eustáquio Amaro, bem como aos Profs. Drs. Alberto Garcia de Figueiredo Jr. e Venerando Eustáquio Amaro, que vieram compor o

comitê de avaliação final desta dissertação de mestrado, pelos comentários feitos e importantes contribuições a esse trabalho.

A Marinha do Brasil (MB), pela concessão das embarcações pertencentes a Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte (CPRN), durante as etapas de campo.

Ao comandante da Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte (CPRN/MB), capitão-de-corveta Sérgio Gago Guida, por ter disponibilizado as embarcações tornando possível a viabilização desta dissertação.

A praticagem do Porto de Natal, por ter cedido a lancha Piloto I para os levantamentos dos parâmetros físicos no estuário Potengi.

Ao Prof. Dr. Carlos Augusto por ter cedido o CTD da *Valeport* para as medições dos parâmetros físicos no estuário.

Ao engenheiro civil Luciano, pela realização do sobrevôo com seu ultraleve modelo *FOX* na área de estudo.

Ao coordenador da Estação Climatológica da UFRN, Domingos Sávio M. Padro, por ter cedidos os dados meteorológicos referentes aos anos de 2001 e 2002.

A todos os meus amigos, professores e funcionários do Departamento de Geologia e, em particular, aos do Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica.

Aos grandes amigos Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho e Msc. Alex Costa da Silva pela amizade e conselhos durante a execução desta dissertação.

Aos colegas Angélica, Flavo, Flávia, Henrique, Josibel, Luciano, Marcelo, Marcelo Chaves, Michael, Werner, Yoe Alain e, pela grande amizade durante estes últimos dois anos.

Ao estudante do Curso de Graduação em Geologia André Giskard e aos técnicos Jean e Muchê do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental (GGEMMA), cuja colaboração nos trabalhos de campo e laboratório foram imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Eugênio Frazão e Carmen Maria Castro Pires Frazão e, a meu irmão Bruno Pires Frazão, com quem pude contar nas horas difíceis e de alegria, pois gostaria de mostrar minha gratidão a essas pessoas que não mediram esforços para o êxito deste trabalho.

Por fim, eu gostaria de agradecer à minha esposa Luciana de Sousa Frazão, pelo apoio, incentivo e compreensão, por todos estes anos de convivência e amizade mútuas.

Assim, agradeço a Deus, por ter me dado a graça de conhecer esta pessoa, que é minha fonte constante de inspiração e força interior ao longo dessa jornada de aprendizagem no planeta Terra, chamada “vida”.

Ainda desejo expressar meus mais sinceros agradecimentos, pela compreensão, amizade e apoio recebido de todos que, voluntária ou involuntariamente, participaram no desenvolvimento desse trabalho.



## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o Mapeamento de Sensibilidade Ambiental ao derramamento de óleo no estuário Potengi-RN e litoral adjacente, através de dados de sensoriamento remoto, coleta, tratamento e integração de dados geomorfológicos, oceanográficos (temperatura, salinidade, densidade, intensidade e direção das correntes), meteorológicos (velocidade e direção dos ventos), e sísmico de alta resolução (batimetria e sonografia).

O estuário do rio Potengi situa-se no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, estando inserido no contexto geológico da bacia costeira Pernambuco-Paraíba e ocupando uma extensão de 18km; abriga a zona portuária de Natal e um terminal petrolífero, concentrando desta forma importantes operações de transporte de petróleo, passíveis de derrames acidentais.

Sob o ponto de vista oceanográfico, o estuário Potengi caracteriza-se pela ausência de estratificação térmica marcante, enquadrando-se como parcialmente misturado, do tipo B segundo Pritchard (1955) e do tipo 2 segundo o diagrama estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966).

Dois sistemas principais de ventos são responsáveis pela formação dos conjuntos de ondas incidentes na área. A maré dinâmica apresenta no Porto de Natal amplitude média em sizígia e quadratura, em torno de 2.8m e 2m respectivamente.

O mecanismo de intrusão da maré salina foi definido através da salinidade, que é o parâmetro principal para a identificação deste mecanismo. Importantes variações dos valores médios de salinidade (36.32psu), temperatura (28.11°C) e densidade (22.96Kg/m<sup>3</sup>) nas águas estuarinas apresentaram características de regiões de baixas latitudes. A temperatura das águas acompanha as variações de temperatura do ar, na região, com expressivas amplitudes diárias.

Neste trabalho, o reconhecimento da morfologia de fundo deste estuário, através da análise batimétrica e sonográfica, objetivou avaliar a influência das correntes superficiais e de fundo na modelagem do leito. Neste sentido, o emprego do sonar de varredura lateral revelou-se de grande utilidade na identificação da morfologia do leito e sua relação com a ação predominante das correntes de marés no estuário Potengi. Além disso, demonstrou como os sonogramas podem servir de base para a comparação das diferentes formas resultantes das variações hidrodinâmicas locais.

Os sedimentos holocênicos, que preenchem o canal estuarino, são predominantemente arenosos, variando de selecionados a bem selecionados, por vezes siltosos. A sedimentação é controlada pelas condições hidrodinâmicas do ambiente, sendo reconhecidas duas fácies texturais importantes: Fácies Lamosa e Fácies Arenosa. A distribuição destas fácies texturais aparentemente oscila em função da periodicidade das marés e intensidade das correntes.

Todos os dados acima mencionados foram integrados em um sistema de informação geográfica (SIG), a partir do qual foi gerado o Mapa de Sensibilidade Ambiental a derrames de óleo com Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL) para o estuário Potengi. A análise integrada desses dados é essencial para planos de contingência ao derramamento de óleo, visando a redução das consequências ambientais do vazamento, e tornar eficientes os esforços de contenção e limpeza / remoção no Porto de Natal.

Este estudo vem corroborar para o aumento do conhecimento do meio estuarino e contribuir para um melhor gerenciamento do binômio meio ambiente / cargas poluidoras.

## ABSTRACT

This study presents the Environmental Sensibility Mapping to oil spillings on the Potengi estuary - RN and neighboring coastline through remote sensing data, collecting, treatment and integration of the geomorphologic, oceanographic (temperature, salinity, density, direction and intensity), meteorological (wind speed and direction) and high resolution seismic (bathymetry and sonography) data.

The Potengi river estuary is located on the eastern coastline of the Rio Grande do Norte State, being inserted in the geological context for the coastal Pernambuco-Paraíba basin and spreading over 18 km; it shelters the Natal harbor zone and an oil terminal, centralizing, therefore, important oil transport operations that can cause accidental spillings.

Under the oceanographic point of view, the Potengi estuary is characterized by the absence of any expressive thermic stratification, being classified as partially mixed, "B" type according to Pritchard (1955), and "2" type in conformity to the stratification-circulation diagram by Hansen & Rattray (1966).

Two main wind systems are responsible for the formation of wave sets that occur in the area. The dynamic tide presents, in the Natal Harbor, mean amplitude in spring and quadrature tides, with around 2.8 and 2m, respectively.

The mechanism of saline tide mixing was defined through the salinity which is the main parameter for the identification of this mechanism. Important variations of the salinity mean values (36.32 psu), temperature (28.11°C) and density (22.96 kg/m<sup>3</sup>) in the estuarine waters presented features belonging to low latitude regions. The water temperature follows the air temperature variations, in the region, with expressive daily amplitudes.

In this study, the identification of the estuarine bed morphology through bathymetric and sonographic analysis, had the purpose to evaluate the influence of the superficial and bottom currents for the bottom shaping. In this way, the use of the side scan sonar showed, to be very useful in the identification of the bottom morphology and its relationship with the predominant action of the tidal currents in the Potengi estuary. Besides, it showed how the sonograms can be a support to the comparison of the several patterns derived from the local hydrodynamic variations.

The holocene sediments, which fill the estuarine channel, are predominantly sandy, varying from selected, sometimes silty. The sedimentation is controlled by the environmental hydrodynamic conditions, being recognized two important textural facies: Muddy Facies and Sandy Facies. The distribution of these textural facies apparently oscillates owing to the tidal cycle and flow intensity.

Each one of the above mentioned data was integrated in a Geographic Information System (GIS), from which was produced the Environmental Sensibility Map to oil spillings with Coastal Sensibility Index (CSI) to the Potengi estuary. The integrated analysis of these data is essential to oil spilling contingency plans, in order to reduce the spilling environmental consequences and to make efficient the endeavours of contention and cleaning up/removal on the Natal Harbor.

This study has the aim to collaborate for the increase of informations about the estuarine environment and contribute to a better management of the question: environment/polluting loads.

## SUMÁRIO

---

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Lista de Ilustrações .....	x
Lista de Tabelas .....	xiv

---

### CAPÍTULO 1

---

#### INTRODUÇÃO

1.1	APRESENTAÇÃO .....	02
1.2	OBJETIVOS .....	03
1.3	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	04
1.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	05
1.4.1	VEGETAÇÃO .....	05
1.4.2	CLIMA .....	06
1.4.3	MARÉS .....	07
1.4.4	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....	09
1.4.4.1	Litoestratigrafia da Bacia Pernambuco/Paraíba .....	09
1.4.4.1.1	<i>Rochas Sedimentares Cretáceas (Bacia PE-PB-RN)</i> .....	09
1.4.4.1.2	<i>Rochas Sedimentares Tércio-Quaternárias (Formação Barreiras)</i> .....	11
1.4.4.1.3	<i>Sedimentos Quaternários</i> .....	12
1.4.5	ARCABOUÇO TECTÔNICO .....	16

---

### CAPÍTULO 2

---

#### MATERIAIS E MÉTODOS

2.1	INTRODUÇÃO .....	21
2.2	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA .....	22
2.3	TRABALHOS DE CAMPO .....	22
2.3.1	LEVANTAMENTO TERRESTRE .....	23
2.3.1.1	Levantamentos da Morfologia Costeira .....	23
2.3.1.2	Determinação dos Dados Hidrodinâmicos (Ondas e Correntes Litorâneas) .....	24
2.3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI .....	24
2.3.2.1	Levantamento Ecobatimétrico .....	24
2.3.2.2	Levantamento Sonográfico .....	25
2.3.2.3	Levantamento dos Parâmetros Físicos da Água .....	26
2.3.2.4	Coleta de Sedimento de Fundo .....	29
2.4	PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO .....	30
2.4.1	TRATAMENTO PRÉVIO DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS .....	30

2.4.1.1	Sedimentos Arenosos e Lamosos .....	30
2.4.1.2	Sedimentos Arenosos e Lamosos com Presença de Carbonatos .....	30
2.4.1.3	Sedimentos Arenosos e Lamosos com Presença de Matéria Orgânica .....	31
2.4.2	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	31
2.5	TRABALHOS DE GABINETE .....	32
2.5.1	PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS .....	32
2.5.1.1	Análise Batimétrica .....	32
2.5.1.2	Análise Sonográfica .....	33
2.5.2	PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA ÁGUA.....	33
2.5.2.1	Análise e Processamento dos Dados de Correntes .....	33
2.5.2.2	Análise dos Dados de Temperatura, Salinidade e Pressão .....	34
2.5.2.3	Análise das Marés .....	35
2.5.3	PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	35
2.5.4	CONFEÇÃO DA CARTA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL.....	37
2.5.4.1	Separação dos Segmentos Sensíveis ao Derramamento de Óleo através do uso do Sensoriamento Remoto e SIG .....	37
2.5.4.2	Processamento dos Dados Hidrodinâmicos necessários para Elaboração das Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo .....	37
2.5.4.3	Armazenamento dos Dados em um Banco de Dados Geográficos ( BDG) .....	38
2.5.5	INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS.....	38

---

### *CAPÍTULO 3*

---

#### **CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO POTENGI**

3.1	DEFINIÇÃO.....	40
3.2	CLASSIFICAÇÃO .....	42

---

### *CAPÍTULO 4*

---

#### **ANÁLISE HIDRODINÂMICA E FÍSICA DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREA ADJACENTE**

4.1	ESTUDO DAS ONDAS E DO REGIME DE VENTOS.....	49
4.2	AS MARÉS NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI E ÁREAS ADJACENTES .....	50
4.2.1	A MARÉ DINÂMICA .....	51
4.2.1.1	Aspectos Gerais .....	51
4.2.1.2	Características das Marés Dinâmicas no Estuário .....	53
4.2.1.3	Estudo das Correntes de Maré .....	55
4.2.1.4	Velocidade das Correntes .....	56

4.2.2	A MARÉ SALINA .....	57
4.3	<b>ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ÁGUAS DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREA OCEÂNICA ADJACENTE.</b>	57
4.3.1	TEMPERATURA DA ÁGUA .....	59
4.3.2	SALINIDADE DA ÁGUA .....	62
4.3.3	DENSIDADE .....	63
4.4	<b>DIAGRAMAS DE MISTURA DO ESTUÁRIO POTENGI.....</b>	64

---



---

## *CAPÍTULO 5*

---



---

### **ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS E DOS SEDIMENTOS RECENTES**

5.1	<b>ASPECTOS GERAIS .....</b>	68
5.2	<b>ANÁLISE DO ESTUDO BATIMÉTRICO .....</b>	69
5.2.1	EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO ESTUÁRIO .....	78
5.3	<b>FORMAS DE LEITO SEDIMENTARES .....</b>	81
5.3.1	FORMAS DE LEITO NO ESTUÁRIO POTENGI .....	86
5.3.2	FORMAS DE LEITO NA PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE À FOZ DO RIO POTENGI .....	90
5.3.3	OUTRAS FEIÇÕES .....	96
5.4	<b>ESTUDO DOS SEDIMENTOS RECENTES .....</b>	98
5.4.1	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS .....	98
5.4.1.1	Mediana .....	99
5.4.1.2	Diâmetro Médio .....	99
5.4.1.3	Desvio Padrão .....	100
5.4.1.4	Assimetria .....	100
5.4.1.5	Curtose .....	100
5.4.2	DISTRIBUIÇÃO DAS FÁCIES TEXTURAS .....	103
5.4.3	FRAÇÃO CARBONATADA .....	106
5.4.4	MATÉRIA ORGÂNICA PARTICULADA .....	106

---



---

## *CAPÍTULO 6*

---



---

### **MAPA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO**

6.1	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	109
6.2	<b>MAPA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL DA ZONA COSTEIRA DE NATAL .....</b>	111

---

---

*CAPÍTULO 7*

---

---

**CONCLUSÕES**

<b>7.1</b>	<b>HIDRODINÂMICA E DISTRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ÁGUAS DO ESTUÁRIO POTENGI.....</b>	<b>124</b>
<b>7.2</b>	<b>MAPEAMENTO DA MORFOLOGIA DO FUNDO E DAS FORMAS DE LEITO.....</b>	<b>127</b>
<b>7.3</b>	<b>MAPEAMENTO DOS ECOSISTEMAS SENSÍVEIS AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO POR SENSORES REMOTOS.....</b>	<b>130</b>

---

---

*CAPÍTULO 8*

---

---

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>145</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.1</b>	Mapa de localização da área de estudo.....	<b>04</b>
<b>Figura 1.2</b>	Variação dos parâmetros meteorológicos.....	<b>08</b>
<b>Figura 1.3</b>	Mapa Geológico Simplificado do Rio Grande do Norte (compilado de Dantas 1998).....	<b>09</b>
<b>Figura 1.4</b>	Bacia Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte e suas subdivisões (modificado de Mabesoone 1996).....	<b>10</b>
<b>Figura 1.5</b>	Carta Estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba (modificado de Feijó 1994).....	<b>11</b>
<b>Figura 1.6</b>	Falésia localizada na Barreira do Inferno, a qual é típica da Formação Barreiras.....	<b>12</b>
<b>Figura 1.7</b>	Rochas praias (BR-01 e BR-02) paralelas à linha de costa. Praia do Meio, Natal-RN, A.P = antes do presente.....	<b>13</b>
<b>Figura 1.8</b>	Dunas antigas, apresentando coloração amarelada devido à oxidação, localizadas na zona oeste de .....	<b>14</b>
<b>Figura 1.9</b>	Dunas antigas sofrendo devastação devido à ação antrópica.....	<b>14</b>
<b>Figura 1.10</b>	Dunas intermediárias do tipo parabólicas e longitudinais menos oxidadas que as dunas antigas localizadas no Parque das Dunas.....	<b>15</b>
<b>Figura 1.11</b>	Terraço e planície aluvionar do rio Potengi.....	<b>15</b>
<b>Figura 1.12</b>	Mapa geológico da planície costeira e adjacente ao embasamento cristalino entre a Barreira do Inferno e a foz do rio Ceará-Mirim.....	<b>17</b>
<b>Figura 1.13</b>	Bloco diagrama mostrando a topografia do semi-graben da bacia do estuário do rio Potengi.....	<b>18</b>
<b>Figura 1.14</b>	Imagem Landsat 7 ETM+ utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional <i>sunangle</i> .....	<b>19</b>
<b>Figura 2.1</b>	Fluxograma da metodologia adotada.....	<b>21</b>
<b>Figura 2.2</b>	A) Ultraleve modelo <i>FOX</i> utilizado para tirar fotos oblíquas de pequeno formato ao longo da linha de costa.....	<b>23</b>
<b>Figura 2.3</b>	A) Método de levantamento de perfis topográficos modificado de Birkemeier (1981).....	<b>24</b>
<b>Figura 2.4</b>	A) Ecobatímetro modelo <i>HYDROTRAC</i> da Odom, operando na frequência de 200 kHz.....	<b>26</b>
<b>Figura 2.5</b>	Navegação em tempo real mediante o <i>software</i> <i>GPS trackmaker</i> .....	<b>26</b>
<b>Figura 2.6</b>	Operação com o peixe do sonar de varredura lateral da <i>EG&amp;G</i> , transdutor com 2 canais de recepção.....	<b>27</b>
<b>Figura 2.7</b>	Conjunto de correntômetro com CTD modelo 108 MkIII da <i>VALEPORT</i> , com uma hélice com 2 pás.....	<b>29</b>
<b>Figura 2.8</b>	Coleta das amostras de fundo do estuário do rio Potengi com o amostrador pontual do tipo <i>van veen</i> .....	<b>30</b>
<b>Figura 2.9</b>	(A) Sedimentos arenosos e lamosos colocados em Becker de 500 a 1000ml e lavados com água.....	<b>32</b>
<b>Figura 2.10</b>	Diagrama de nivelamento da estação maregráfica da Capitania	

	dos Portos do Rio Grande do Norte (CPRN).....	36
<b>Figura 3.1</b>	(A) Representação esquemática das definições de estuário de acordo com Pritchard (1967) e Dalrymple <i>et al</i> (1992).....	41
<b>Figura 3.2</b>	Tipos fisiográficos estuarinos.....	43
<b>Figura 3.3</b>	Classificação dos estuários baseada em parâmetros morfológicos, sedimentológicos e oceanográficos.....	43
<b>Figura 3.4</b>	Circulação e distribuição de salinidade média num estuário parcialmente misturado (modificado de Dyer 1986).....	45
<b>Figura 3.5</b>	Diagrama estratificação-circulação proposto por Hasen & Rattray (1966).....	46
<b>Figura 4.1</b>	Fotografia aérea mostrando a propagação da onda em direção à costa do quadrante SE.....	50
<b>Figura 4.2</b>	Comparação de níveis de maré medidos e simulados com o <i>software</i> PACMARE, no ano de 2001 e 2002.....	52
<b>Figura 4.3</b>	Mapa com as principais direções dos ventos alísios, correntes de maré, deriva litorânea e as correntes marinhas.....	53
<b>Figura 4.4</b>	Relacionamento da maré com a corrente de maré .....	55
<b>Figura 4.5</b>	Cartas de correntes de maré mostrando a direção e velocidade em nós no canal principal .....	58
<b>Figura 4.6</b>	Localização das estações fixas ao longo do canal estuarino do rio Potengi.....	59
<b>Figura 4.7</b>	Curvas de variações da temperatura do ar para as datas correspondentes aos dias de medições de temperatura da água.....	61
<b>Figura 4.8</b>	Distribuição vertical da temperatura (A), salinidade (B) e densidade (C) no rio Potengi.....	65
<b>Figura 4.9</b>	Diagrama T-S espalhado do rio Potengi, mostrando dois agrupamentos que caracterizam a Massa de Água Tropical de Superfície .....	66
<b>Figura 5.1</b>	Localização dos perfis batimétricos transversais e longitudinais à calha do rio Potengi.....	69
<b>Figura 5.2</b>	Carta batimétrica do estuário Potengi, mostrando as zonas de bancos e do Canal Principal de Navegação.....	71
<b>Figura 5.3</b>	Carta batimétrica do estuário Potengi, submetida ao filtro de imagem sombreada para ressaltar as principais morfologias do fundo.....	72
<b>Figura 5.4</b>	Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 01.....	74
<b>Figura 5.5</b>	Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 02.....	74
<b>Figura 5.6</b>	Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 03.....	75
<b>Figura 5.7</b>	Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 04.....	75
<b>Figura 5.8</b>	Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 05.....	76

<b>Figura 5.9</b>	Perfis batimétricos transversais à calha do rio Potengi, sendo que a seção (A-B) é perpendicular ao Banco do Igapó e (C-D) ao Banco da Base.....	<b>79</b>
<b>Figura 5.10</b>	Perfis batimétricos transversais (I-J e L-M) e longitudinais (N-O e P-Q) ao rio Potengi, sendo que na seção (I-J).....	<b>80</b>
<b>Figura 5.11</b>	Anteparo artificial (espigão) proporcionando um fluxo turbulento durante a maré de vazante.....	<b>81</b>
<b>Figura 5.12</b>	Cartas Batimétricas do estuário do rio Potengi referentes aos anos de 1973 (A) e 2002 (B).....	<b>82</b>
<b>Figura 5.13</b>	Praia da Redinha sofrendo um intenso processo de erosão devido ao deslocamento do canal principal de navegação em direção a sua margem.....	<b>83</b>
<b>Figura 5.14</b>	Diagrama de regime de fluxo para determinação das formas de leito.....	<b>86</b>
<b>Figura 5.15</b>	Diagrama de Flemming (1988) do log-log da altura (H) versus comprimento (L).....	<b>88</b>
<b>Figura 5.16</b>	Batimetria simplificada da área de estudo e localização das figuras 5.17 a 5.26.....	<b>91</b>
<b>Figura 5.17</b>	Sonograma registrado com o sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria.....	<b>91</b>
<b>Figura 5.18</b>	Sonograma mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria.....	<b>92</b>
<b>Figura 5.19</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da Odom, operando na frequência de 200 kHz, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>92</b>
<b>Figura 5.20</b>	Sonograma mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>93</b>
<b>Figura 5.21</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da Odom, operando na frequência de 500 kHz, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>93</b>
<b>Figura 5.22</b>	Registro sonográfico apresentando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano/sedimento fino, (2) Dunas com médio comprimento de ondas.....	<b>94</b>
<b>Figura 5.23</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da Odom, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>94</b>
<b>Figura 5.24</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>95</b>
<b>Figura 5.25</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>95</b>

<b>Figura 5.26</b>	Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da EG&G, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria.....	<b>96</b>
<b>Figura 5.27</b>	Imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 (2001) utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional <i>sunangle</i> .....	<b>97</b>
<b>Figura 5.28</b>	Sonograma mostrando (1) embarcações naufragadas.....	<b>97</b>
<b>Figura 5.29</b>	Sonograma mostrando a ação antrópica na morfologia do leito.....	<b>98</b>
<b>Figura 5.30</b>	Curvas granulométricas para as amostras PT-001 a PT-048 dos sedimentos recentes do estuário Potengi.....	<b>101</b>
<b>Figura 5.31</b>	Distribuição do diâmetro médio dos sedimentos recentes do estuário Potengi.....	<b>102</b>
<b>Figura 5.32</b>	Distribuição das principais fácies texturais no estuário do rio Potengi, segundo a classificação de Folk (1974).....	<b>104</b>
<b>Figura 5.33</b>	Transporte da pluma de sedimentos em suspensão do estuário Potengi em direção a plataforma.....	<b>105</b>
<b>Figura 6.1</b>	Mapa de sensibilidade ambiental a derrames de óleo para região da grande Natal.....	<b>113</b>
<b>Figura 6.2</b>	Modelo Digital de Terreno (MDT) combinado com a composição colorida RGB 432 mostrando a topografia do semi-graben do estuário Potengi.....	<b>116</b>
<b>Figura 6.3</b>	Ecosistemas sensíveis ao derramamento de óleo apresentando ISL 5.....	<b>117</b>
<b>Figura 6.4</b>	Segmento 03 apresentando substrato com enrocamentos <i>rip-rap</i> expostos e plataforma exumada recoberta por concreções lateríticas.....	<b>117</b>
<b>Figura 6.5</b>	Substrato constituído de recifes areníticos em franja, atuando como uma barreira natural ao óleo.....	<b>118</b>
<b>Figura 6.6</b>	Floresta de mangue no segmento 06 (ISL 10). Vegetação associada com alta diversidade biológica.....	<b>118</b>
<b>Figura 6.7</b>	Enrocamento do tipo <i>rip-rap</i> abrigado, disposto na margem para conter a erosão no segmento 07.....	<b>119</b>
<b>Figura 6.8</b>	Segmento apresentando baixo índice de sensibilidade ambiental (ISL 1), por apresentar estruturas artificiais.....	<b>119</b>
<b>Figura 6.9</b>	Segmento com ISL 1, apresentando instalações das indústrias pesqueiras.....	<b>120</b>
<b>Figura 6.10</b>	Manguezal precedido de terraço de baixa-mar lamoso.....	<b>121</b>

## LISTA DE TABELAS

<b><i>Tabela 4.1</i></b>	Valores máximos, mínimos e médios de temperatura (°C), salinidade (psu) e densidade (Kg/m <sup>3</sup> ) à superfície.....	<b>57</b>
<b><i>Tabela 5.1</i></b>	Esquema de classificação recomendada pelo Simpósio do SEPM para formas de leito e acamamentos (Ashley 1990).....	<b>85</b>
<b><i>Tabela 6.1</i></b>	Determinação dos índices de sensibilidade da área de estudo ao longo da linha de costa.....	<b>114</b>



**CAPÍTULO 1:**  
**INTRODUÇÃO**



## **1.1. APRESENTAÇÃO**

Os estuários são ambientes sedimentares costeiros cuja evolução depende da interação entre parâmetros hidráulicos, sedimentares e aspectos morfológicos, e onde a atividade biológica é uma condicionante fundamental. Constituindo meios receptores de sedimentos por excelência, onde os processos evolutivos são rápidos, os estuários são importantes zonas de investigação da morfodinâmica atual e fácies deposicionais da história geológica recente.

Os sistemas estuarinos são também meios atrativos para ação antrópica, onde o desenvolvimento das atividades portuárias e marítimas é crescente. Constituem deste modo, pólos importantes para o desenvolvimento de estudos da geologia e geofísica marinha relacionados sobretudo com a manutenção de canais navegáveis, com o comportamento de zonas de dragagem e de rejeito, e com a construção e manutenção de obras. Em todos eles, para além do conhecimento dos parâmetros hidrodinâmicos e compreensão dos padrões de circulação, a natureza dos materiais e a dinâmica sedimentar constituem componentes determinantes na previsão dos processos atuantes, devido a evolução no passado recente ser analisada numa perspectiva de compreensão da evolução futura.

Desenvolvida no âmbito dos projetos “Mapeamento de Sensibilidade Ambiental dos Ecossistemas da Linha de Costa em Áreas Portuárias de atuação da TRANSPETRO” (TRANSPETRO/PETROBRAS) e “PETRORISCO - REDE 05 - Monitoramento Ambiental de Áreas de Risco a Derrames de Petróleo e seus Derivados” (FINEP/CNPq/CTPETRO), esta pesquisa visou o Mapeamento de Sensibilidade Ambiental do Estuário Potengi - RN, para a zona portuária de Natal, que possui um intenso tráfego de navios petroleiros de grande porte e abriga um terminal petrolífero, tornando esta região passível ao derramamento accidental de óleo (Figura 1.1). Neste contexto, foram coletados parâmetros geomorfológicos, oceanográficos (temperatura, salinidade, densidade, intensidade e direção das correntes) e meteorológicos (velocidade e direção dos ventos), combinados com levantamento sísmico de alta resolução. A partir da integração destes dados foi possível a identificação de cada ecossistema sensível ao derramamento de óleo, fornecendo assim importantes informações para o plano de contingência de eventos accidentais ou intencionais, bem como a identificação dos setores da costa que terão monitoramento ambiental.

O Porto de Natal concentra importantes operações de transporte de petróleo, passíveis de derrames acidentais. Tais acidentes, ainda que raros, são de difícil controle, podendo provocar danos materiais e ecológicos de grandes proporções. Em caso de acidentes ambientais, os danos causados a esta região tendem a ser bastante amplificados, não apenas pelas conseqüências econômicas e estéticas, facilmente evidenciáveis, mas também pela maior sensibilidade intrínseca dos ambientes aí representados. De fato, os manguezais e as planícies de marés são considerados os ambientes onde se esperam, em caso de acidentes, os impactos iniciais mais graves e com recuperação mais lenta. Este estudo vem corroborar para o aumento do conhecimento do meio estuarino e contribuir para um melhor gerenciamento do binômio meio ambiente / cargas poluidoras.

Esta dissertação representa a etapa final do Curso de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGG/UFRN).

## **1.2. OBJETIVOS**

O principal objetivo desta pesquisa é analisar as situações de risco decorrentes de eventuais derrames de hidrocarbonetos no estuário Potengi. Este tipo de análise é essencial para reduzir as conseqüências ambientais do vazamento (MMA 2002), tornar eficientes os esforços de contenção e limpeza / remoção no Porto de Natal, simulando a hidrodinâmica forçada pelo vento e sua atuação conjunta (correntes e vento) no transporte de manchas de óleo, como apoio ao plano de contingência. Desdobram-se como objetivos específicos:

1. Integração dos dados de ecosonda vertical, sonar de varredura lateral e hidrodinâmicos, com intuito de fornecer subsídios para analisar as principais forçantes que influenciam o transporte de manchas de óleo e os fatores que levam a movimentação, e deposição de cada tipo de sedimento na área de estudo;
2. Reconhecimento dos tipos de morfologia de fundo, através da análise batimétrica e sonográfica, para verificar a influência das correntes superficiais e de fundo na modelagem do leito;
3. Elaborar um Mapa de Sensibilidade Ambiental (MSA) a derrames de óleo, de modo que as prioridades de proteção possam ser estabelecidas e as estratégias de contenção e limpeza / remoção delineadas antecipadamente.

### 1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área abrangida no presente estudo acha-se limitada geograficamente pela praia de Santa Rita (a norte) e pelo Parque das Dunas (a sul), situando-se entre as latitudes de  $05^{\circ}52'00''$  e  $05^{\circ}41'57''$  S e as longitudes de  $35^{\circ}19'16''$  e  $35^{\circ}08'24''$  W (Figura 1.1).

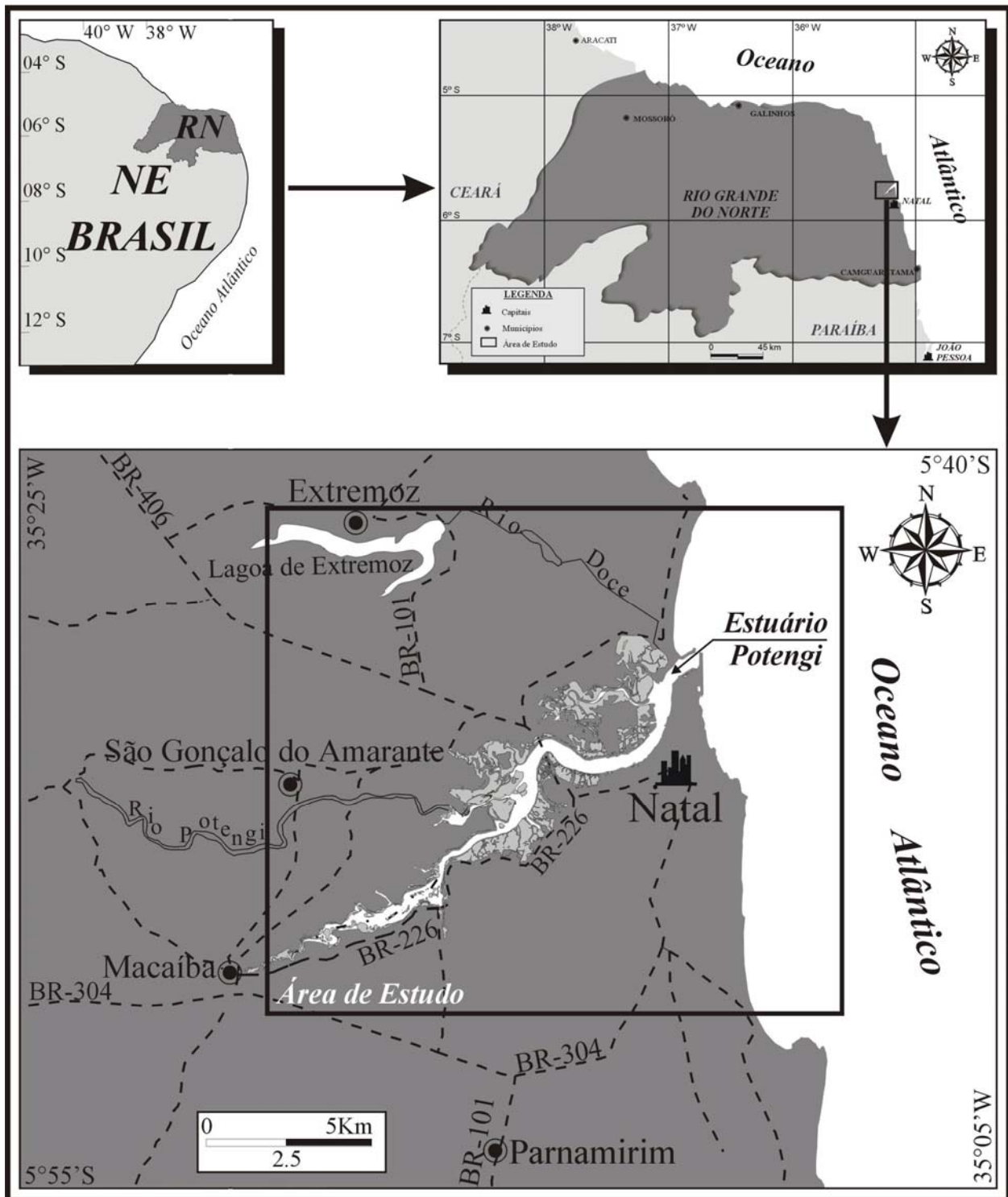


Figura 1.1 - Mapa de Localização da Área de Estudo.

Em relação aos recursos hídricos costeiros do Nordeste, esta área não apresenta rios de grande magnitude, como o Amazonas ou o São Francisco, que provoquem grandes modificações hidrológicas, destacando-se no litoral oriental o rio Potengi.

O rio Potengi, percorre três zonas distintas do Estado do Rio Grande do Norte, nasce nas imediações da Serra da Santana, situadas em altitudes de 500 metros aproximadamente, corre em direção às proximidades da cidade de São Tomé até alcançar o estuário, percorrendo aproximadamente 180 km antes de desaguar no Oceano Atlântico. Em direção à montante do estuário, nas gamboas, a perda de intensidade das correntes atuantes diminui acentuadamente a movimentação das águas, possibilitando a deposição de material mais fino. A distribuição das areias em seu interior reflete diretamente a influência das correntes de marés sobre a carga sedimentar do fundo (Oliveira 1985).

## **1.4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

### **1.4.1. VEGETAÇÃO**

A vegetação predominante na área é do tipo restinga, a qual recobre as dunas e vegetação de mangue, ambas em avançado estado de degradação antrópica.

As dunas mais recentes de caráter móvel, não apresentam cobertura vegetal. As mais antigas apresentam-se parcialmente ou totalmente cobertas por vegetação, que ora é herbácea, escassa e rasteira. Espécies do gênero *Anacardium* (cajueiro) e *Ficus* (gameleira) aparecem entre as predominantes nas encostas das dunas. Encontram-se também gramíneas dos gêneros *Elionuros*, *Andropogon*, *Briza* e *Imperata*, ciperáceas, papilionáceas e algumas compostas, todas rasteiras, bem como espécies de *Remirea marítima* e *Spartina* sp consideradas como fixadoras de dunas.

O Planalto Costeiro, disposto nas superfícies aplainadas dos sedimentos terciários, é constituído de dois estratos: um arbustivo e outro herbáceo. O estrato herbáceo é composto quase totalmente de gramíneas dispostas em moitas, destacando-se os gêneros *Aristida* e *Andropogon*. O arbustivo arbóreo apresenta pequenas árvores e arbustos distribuídos esparsamente, destacando-se as espécies *Curatella americana* (lixeira) *Byrsonima cydoniaefolia* (murici do tabuleiro) *Duratea fieldingiana* (batiputa), *Hancornia speciosa* (mangabeira) *Anacardium occidentale* (cajueiro) *Hirtella ciliata* (canoé) e *Miconia* sp.

A floresta de manguezal, com uma área de 862 ha no estuário Potengi, possui uma composição florística semelhante aos demais manguezais do Rio Grande do Norte, onde três das principais espécies de árvores são encontradas: a *Rhizophora mangle* (mangue vermelho ou mangue sapateiro) com uma grande predominância (cerca de 63% ou 546 ha), a *Laguncularia racemosa* (mangue branco ou mangue manso) e a *Avicennia germinans* (mangue preto) que se situam nas partes mais interiores do estuário (SEPLAN/RN 1986).

#### 1.4.2. CLIMA

Segundo a classificação de Köppen, a região estudada está situada numa zona de transição entre os climas As' - quente e úmido, e BSH - árido quente, com predominância do tipo AS', o qual é caracterizado por uma precipitação anual irregular como mostra na figura 1.2.

A vasta extensão territorial da região Nordeste (1.540.827 km<sup>2</sup>) somada ao papel do relevo, tornam o quadro climático dessa região um dos mais complexos. Esta complexidade não traduz a extraordinária variedade climática do ponto de vista da pluviometria (Nimer 1972).

De acordo com os dados de precipitação medidos pela Estação Climatológica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) para os anos de 2001 e 2002 observa-se que esta região caracteriza-se por um regime pluviométrico mais elevado, ou seja, períodos chuvosos, que se estendem de março a abril e de junho a agosto, verificando-se em junho, o valor máximo da média mensal de chuvas para 2001 e no mês de março para o ano de 2002 (Figura 1.2). O volume médio anual das chuvas foi de 1278.6 e 2028.2 mm, respectivamente para os anos de 2001 e 2002.

A precipitação é um importante fator-controle do ciclo hidrológico e, portanto, da regulação das condições ecológicas e geográficas de uma determinada região.

Conforme os dados meteorológicos obtidos das médias mensais para os anos de 2001 e 2002, na Estação Climatológica Principal - UFRN, os ventos predominantes são provenientes do quadrante E (este) e os de maior frequência, são provenientes de ESE.

A velocidade dos ventos apresenta variações em escala de dias, semanas e também sazonal (Figura 1.2), com maior intensidade no período de julho a setembro para o ano de

2001 e de outubro a dezembro para 2002, atingindo respectivamente velocidades de 5.4 e 4.7 m/s e influenciando diretamente na propagação das ondas.

Observa-se ainda, que ao longo de todo ano, prevalece uma circulação secundária de brisa marítima. Ao longo do dia, o ar aquece mais rapidamente sobre a terra do que sobre as águas costeiras, decorrendo, deste fato, o decréscimo de pressão sobre a terra e uma convergência do ar marítimo sobre a mesma. Este deslocamento de E para W constitui a brisa marítima, que se intensifica ao longo do dia, atingindo velocidades máximas do meio para o fim da tarde. Com o anoitecer, a brisa se arrefece, podendo até inverter-se, durante a madrugada, constituindo o terral de W para E (Portobrás 1979).

Como podemos observar na figura 1.2 os ventos fortes nesta região estão associados ao maior contraste térmico entre o oceano e o continente no período menos chuvoso.

As temperaturas médias anuais para 2001 e 2002 nesta região foram de 25.8 e 26.6°C, respectivamente. Apresentando valores mínimos de 20.3 e 23.9°C e valores máximos de 29.6°C para os anos anteriormente citados.

A insolação média anual, foi de 3050 e 2919 horas para os anos de 2001 e 2002 e a umidade relativa do ar apresentou valores máximos de 88 e 85%, para 2001 e 2002, entre os meses de junho a agosto (Figura 1.2).

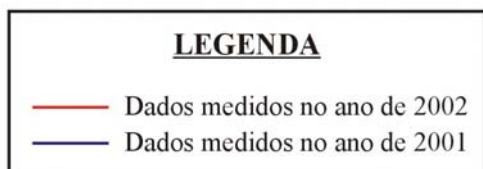
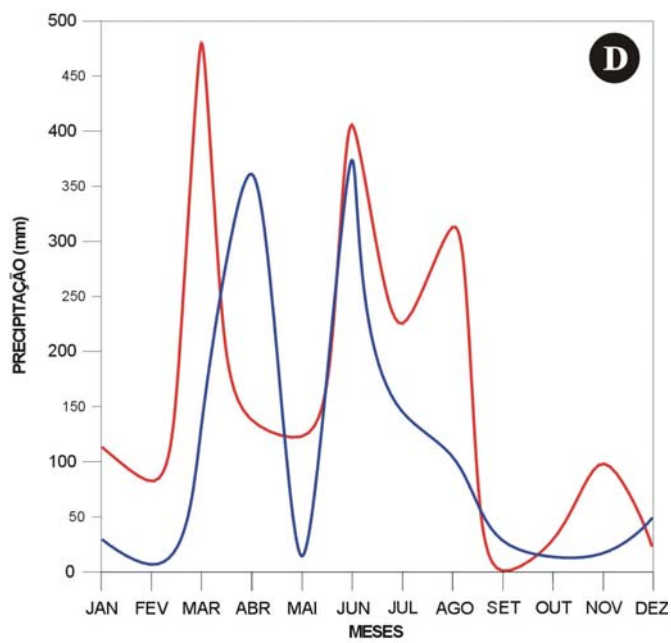
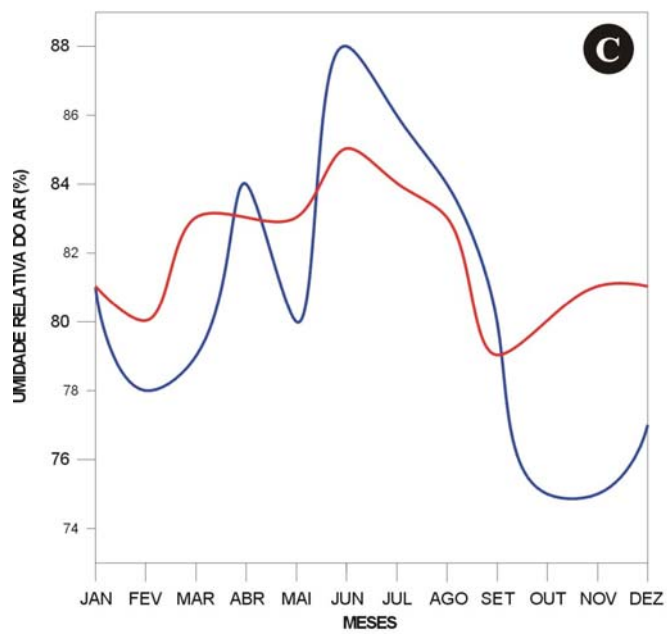
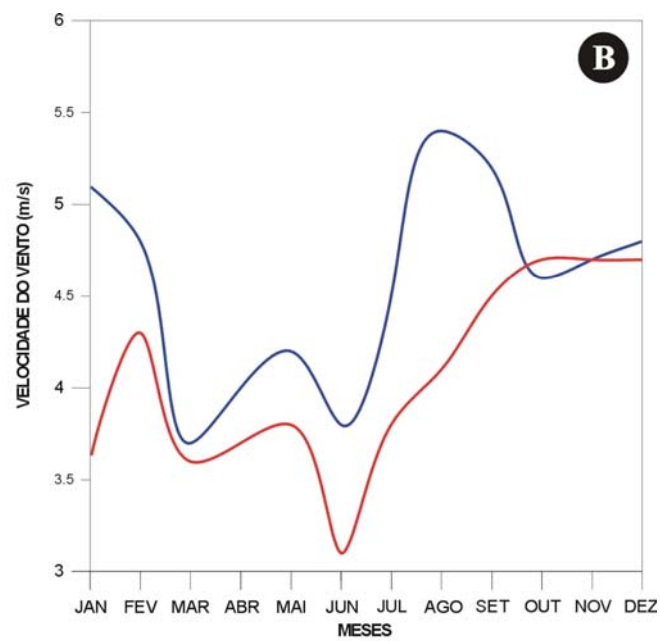
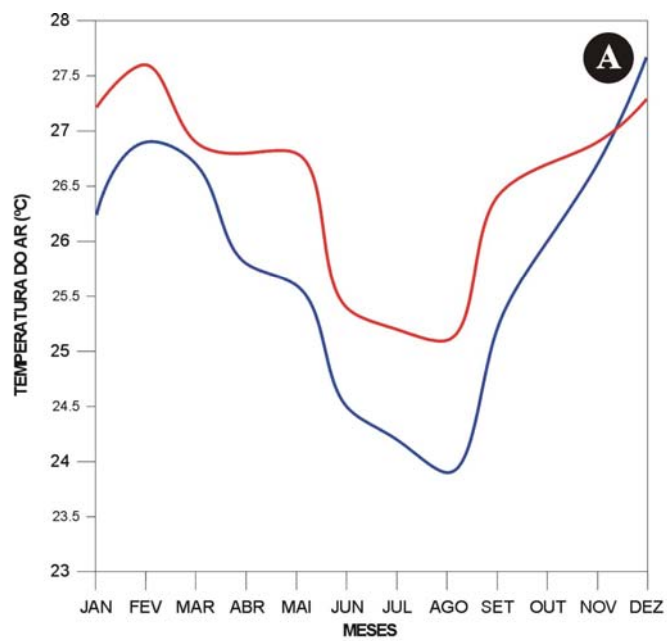
#### 1.4.3. MARÉS

A maré apresenta características semi-diurnas e sua influência é sentida no interior do estuário do rio Potengi, atingindo a cidade de Macaíba, a cerca de 18 Km da cidade de Natal (Hidroconsult-Hidrologia 1978), com a variação média das marés de sizígias de cerca de 2.30m e das marés de quadratura, de cerca de 0.85m.

O rio Potengi é intermitente em sua cabeceira tornando-se perene em seu baixo curso, devido à influência da maré e às restituições subterrâneas (Barros 1984).

As correntes de maré são mais fortes nas vazantes de inverno, período este caracterizado por chuvas intensas. Normalmente, as correntes de maré nos escoamentos de vazante apresentam valores de 3.5 e 1.3 nós, respectivamente, nas marés de sizígias e de quadraturas. Por ocasião das cheias fluviais, as correntes variam de 2.3 a 4.5 nós, sendo que as de vazante são mais fortes entre o Banco das Velhas e a Baixinha. As marés de enchente geram correntes de 1.5 nós em direção ao interior do rio (Portobrás 1979).





**Figura 1.2** - Variação dos parâmetros meteorológicos (A) temperatura do ar, (B) velocidade do vento, (C) umidade relativa e (D) precipitação ao longo dos anos de 2001 e 2002.

#### 1.4.4. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área estudada situa-se no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1.3), incluída na bacia litorânea denominada Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte, de idade cretácea. São encontradas ainda uma seqüência terció-quaternária (Formação Barreiras) e sedimentos quaternários recentes (dunas fixas ou móveis, aluviões, terraços fluviais e mangues).



Figura 1.3 - Mapa geológico simplificado do Rio Grande do Norte (compilado de Dantas 1998).

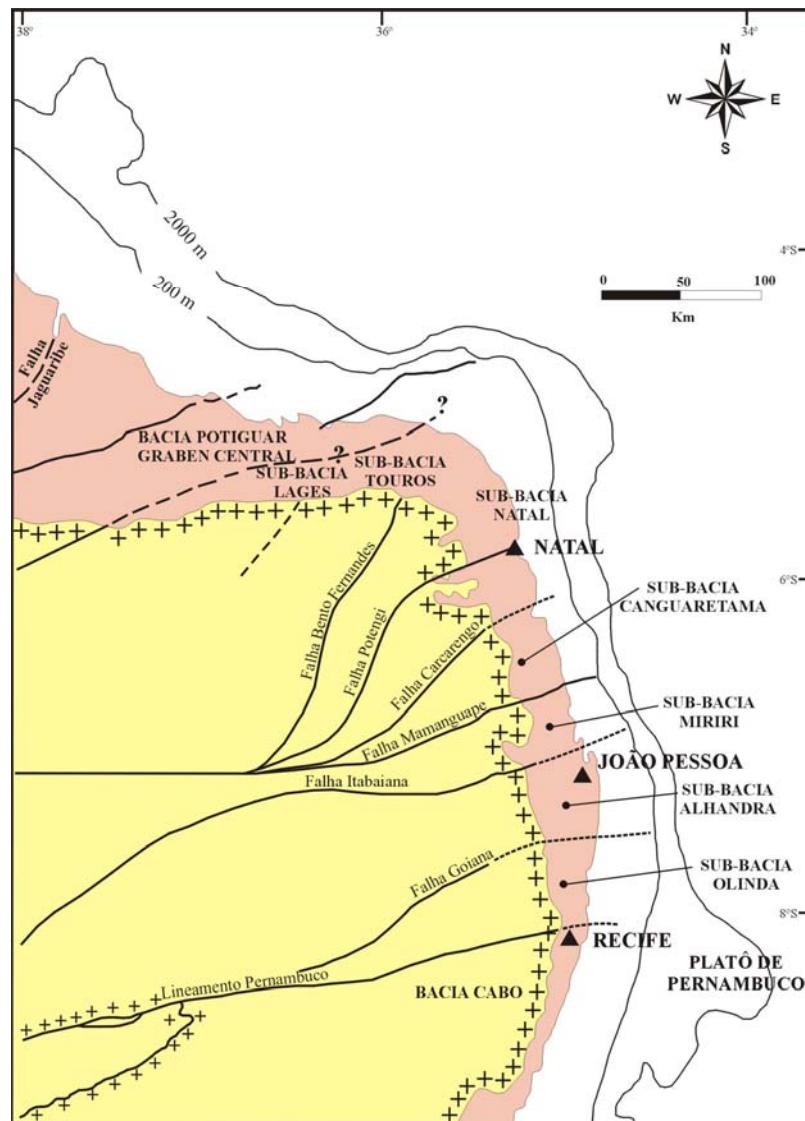
#### 1.4.4.1. Litoestratigrafia da Bacia Pernambuco / Paraíba

##### 1.4.4.1.1. Rochas Sedimentares Cretáceas (Bacia PE-PB-RN)

Segundo Mabessone (1996), os sedimentos cretáceos que formam a Bacia PE-PB-RN (Figuras 1.4 e 1.5) repousam discordantemente sobre o embasamento cristalino. Esta bacia ocupa, em sua porção emersa, uma estreita faixa de cerca de 9000 Km<sup>2</sup>, estendendo-se por 24000 Km<sup>2</sup> na plataforma continental. Situada entre os paralelos 6° e 9° Sul, é a bacia mais setentrional da costa brasileira. É limitada ao sul pelo Lineamento

Patos, excluindo a Sub-bacia Cabo, e ao norte pelo Sistema de Falhas Carnaubais, incluindo a Plataforma Leste ou de Touros da Bacia Potiguar, devido às afinidades litológicas (Mabessone 1996).

Por ser cortada por falhamentos (Figura 1.4) E-W e SW-NE, Mabessone (1996) subdividiu esta bacia em sub-bacias: Olinda, Alhandra, Miriri, Canguaretama, Natal, Touros e Lages, cada qual com diferentes espessuras. Na região de Natal a espessura máxima encontrada foi de 450m.



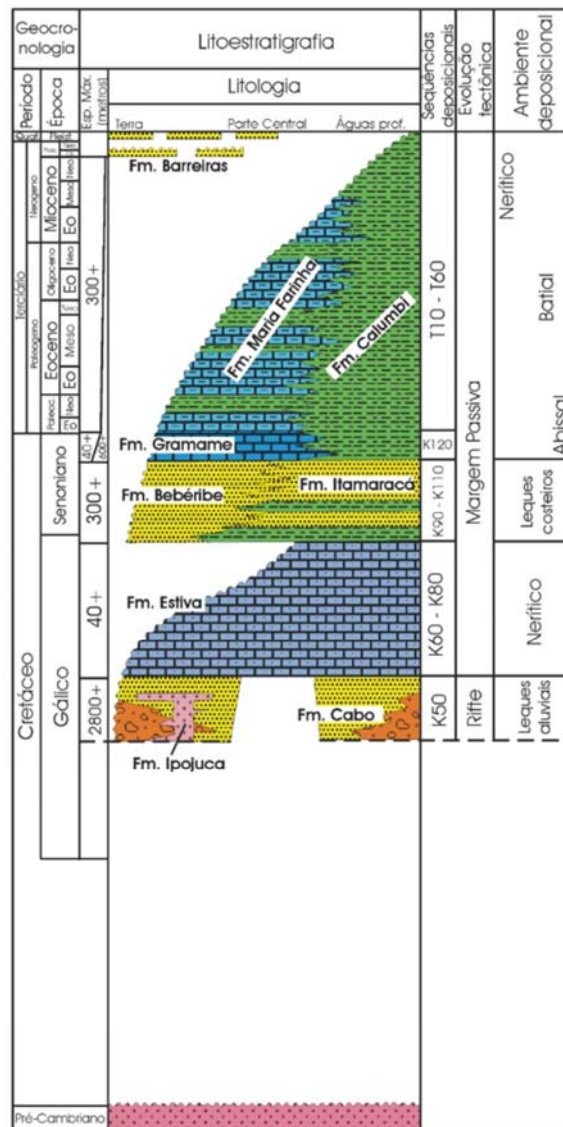
**Figura 1.4** - Bacia Pernambuco - Paraíba - Rio Grande do Norte e suas subdivisões (modificado de Mabessone 1996).

Estratigraficamente a bacia apresenta duas seqüências:

1) Seqüência Clástica Inferior: constituída por arenitos quartzosos e arenitos calcíferos. Correlacionáveis aos litotipos da Formação Açú da Bacia Potiguar, de acordo com dados de sub-superfície, de poços e dados geofísicos. Mabessone *et al.* (1991) datou alguns

polens encontrados nas camadas argilosas e atribuiu a esta seqüência uma idade Turoniana a Santoniana.

2) Seqüência Carbonática Superior: constituída por calcários fossilíferos, aos quais Mabessone *et al.* (1991) inferiu uma correlação petrográfica com os carbonatos da Formação Guimarães da Bacia Potiguar. Esta seqüência representa um ciclo transgressivo-regressivo.



**Figura 1.5** - Carta estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba (modificado de Feijó 1994).

#### 1.4.4.1.2. Rochas Sedimentares Tércio-Quaternárias (Formação Barreiras)

De acordo com diversos autores a Formação Barreiras é observada em toda faixa litorânea brasileira, desde o estado do Rio de Janeiro até o Pará. Esta Formação apresenta sedimentos pouco ou não consolidados, com cores variadas, variando de argilas a conglomerados com estratificações diversas (Figura 1.6).

Esta seqüência repousa ora sobre o embasamento cristalino, ora sobre sedimentos cretáceos ou sedimentos cenozóicos, sempre com contato erosional discordante, bem pronunciado. Sobre esta seqüência ocorrem os sedimentos quaternários recentes (terraços fluviais, sedimentos costeiros), que não formam um capeamento contínuo (Mabessone *et al.* 1972).

Estudos recentes feitos por Mabessone *et al.* (1991) sugerem que todo o pacote sedimentar da Formação Barreiras pode ser considerado como uma única unidade litoestratigráfica; entretanto devido aos diferentes sistemas deposicionais a ela atribuídos, sua faciologia pode diferir em cada região.

Sugiuo *et al.* (1986), com base em datações paleomagnéticas, atribuíram à Formação Barreiras uma idade pliocênica superior à pleistocênica.

Estas rochas apresentam-se na região sob a forma de superfície de tabuleiros e sua interface com o mar ocorre sob a forma de falésias.



**Figura 1.6** - Falésia localizada na Barreira do Inferno, a qual é típica da Formação Barreiras. Ao longo de toda a área de estudo esta Formação apresenta-se capeada por sedimentos eólicos.

#### 1.4.4.1.3. Sedimentos Quaternários

Os sedimentos quaternários, predominantes na região, capeiam a Formação Barreiras e são representados por rochas praias “*beachrocks*”, dunas (fixas ou móveis), depósitos aluvionares, depósitos praias, terraços fluviais e mangues.

##### a) Rochas Praiais “*Beachrocks*”

As rochas praias “*beachrocks*” (Figura 1.7) são comumente conhecidos como “recifes de arenitos”, e ocorrem desde o Estado do Rio de Janeiro até o Ceará (Sugiuo 1999).



Os estudos realizados por Oliveira *et al.* (1990) inferiram a formação das rochas praias da região de Natal entre o subambiente da zona de estirâncio e de antepraia. Dois cordões de *beachrocks* afloram, um mais recente com idade de 4.700 anos e outro mais antigo com 6.500 anos, este mais próximo ao continente.

As rochas praias ou arenitos de praia são rochas sedimentares usualmente formadas na zona intermaré, embora possam desenvolver-se em zona sub-litorânea (Scholten 1972; Alexanderson 1972), úteis como indicadores da variação do nível do mar em regimes de mesomaré (Hopley 1986; Bezerra *et al.* 1998). A mineralogia das rochas praias pode variar de areias silícicas puras a areias carbonáticas biogênicas, enquanto que o cimento pode variar de aragonita a calcita magnesiana.



**Figura 1.7** - Rochas praias (BR-01 e BR-02) paralelas à linha de costa. Praia do Meio, Natal-RN, A.P = antes do presente (Foto: Vital, nov. 2001).

#### b) Dunas Fixas e Móveis

Esta unidade recobre praticamente toda a região, embora esteja em grande parte ocupada pela área urbana de Natal. São constituídas, predominantemente, por quartzo em forma de areias quartzosas, bem selecionadas e com grãos arredondados (Gomes *et al.* 1981). As dunas cobrem a Formação Barreiras e capeiam sedimentos recentes, apresentando uma direção preferencial SE-NW (direção dos ventos). Morfologicamente predominam as dunas tipo parabólica, porém, em certos casos, apresentam um progressivo estiramento, sugerindo uma transição para a morfologia longitudinal.

Os sedimentos que formam as dunas são provenientes da Formação Barreiras e sedimentos transportados da Plataforma Continental. As dunas mais recentes apresentam um melhor selecionamento. Segundo Nogueira (1982) existem quatro gerações diferentes de dunas.

*i. Dunas Antigas (Paleodunas):* são as dunas retrabalhadas inúmeras vezes, e fixadas por vegetação exuberante, com coloração alaranjada devido à oxidação (Figura 1.8). Apresentam cotas altimétricas entre 45 e 65m e, em alguns pontos da região, como por exemplo as dunas do Bairro de Candelária (zona sul) e Bairro das Quintas (zona oeste), a devastação antrópica neste ambiente é evidente (Figura 1.9).



**Figura 1.8** - Dunas antigas, apresentando coloração amarelada devido à oxidação, localizadas na zona oeste de Natal (Foto: Frazão, out. 2001).



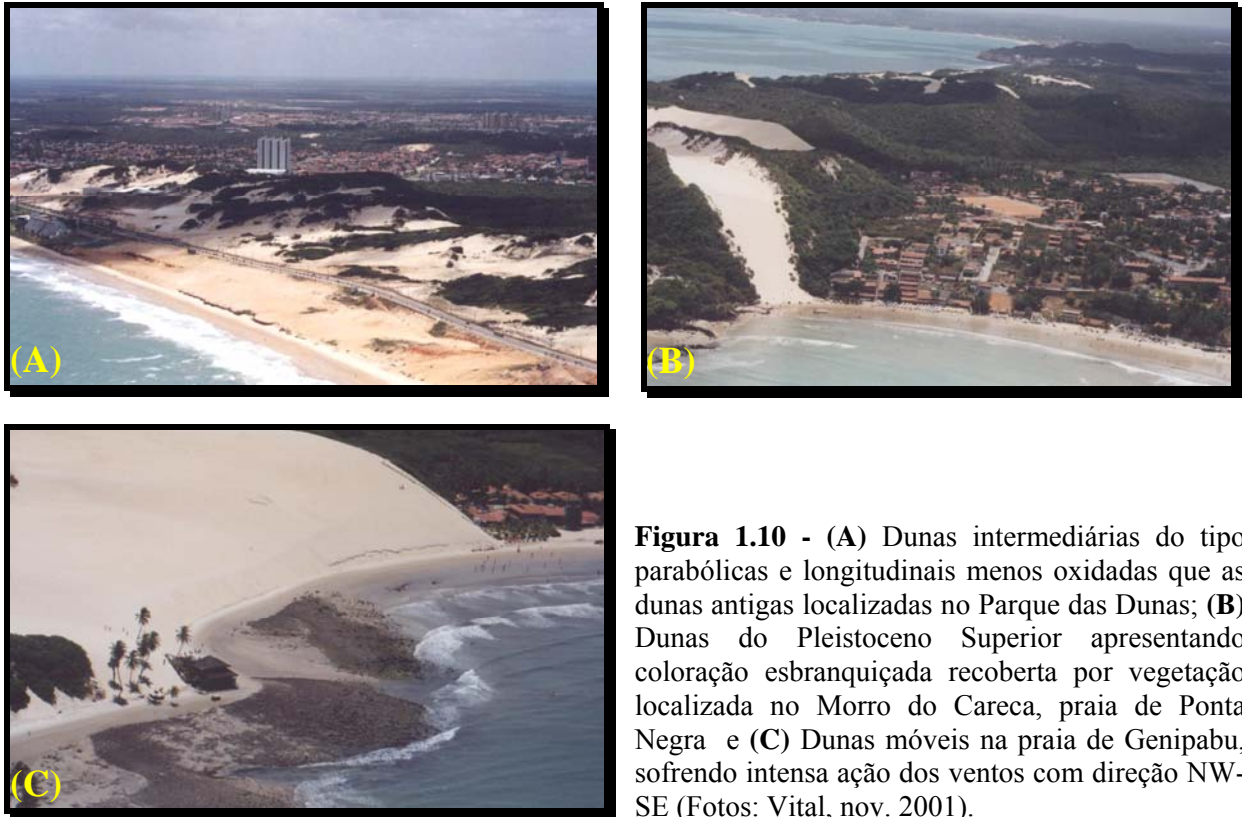
**Figura 1.9** - Dunas antigas sofrendo devastação devido à ação antrópica (Foto: Frazão, out. 2001).

*ii. Dunas Intermediárias:* diferem da anterior apenas por estarem um pouco menos oxidadas e pelas cotas que variam entre 70 a 120m, como por exemplo as dunas do Parque das Dunas (Figura 1.10a).

*iii. Dunas do Pleistoceno Superior:* são esbranquiçadas e ocupam as praias e baixadas, por exemplo as dunas de Ponta Negra (Figura 1.10b).

*iv. Dunas Atuais ou Móveis:* referem-se àquelas que se formaram atualmente, estando associadas ao desenvolvimento do litoral atual, e formam extensos cordões paralelos à

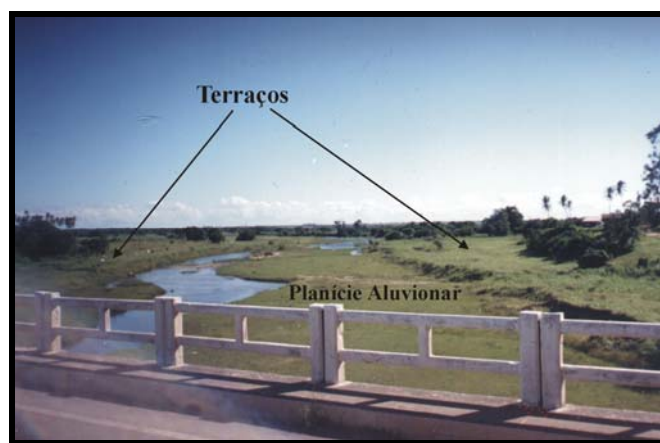
praia, migram devido à ação dos ventos, areias brancas e localizadas no sopé das dunas intermediárias, têm como exemplo as dunas da Redinha e Genipabú (Figura 1.10c).



**Figura 1.10** - (A) Dunas intermediárias do tipo parabólicas e longitudinais menos oxidadas que as dunas antigas localizadas no Parque das Dunas; (B) Dunas do Pleistoceno Superior apresentando coloração esbranquiçada recoberta por vegetação localizada no Morro do Careca, praia de Ponta Negra e (C) Dunas móveis na praia de Genipabu, sofrendo intensa ação dos ventos com direção NW-SE (Fotos: Vital, nov. 2001).

### c) Depósitos Aluvionares

Constituem os terraços e planícies aluvionares, mal distribuídos na área. A sua litologia é caracterizada pela matriz argilosa avermelhada e os grãos de areia quartzosa de granulação média a fina, podendo ser relacionados às planícies de inundação, mas também apresentam unidades arenosas, correlacionáveis aos canais (Figura 1.11). Às vezes confundidos com a Formação Barreiras.



**Figura 1.11** - Terraço e planície aluvionar do rio Potengi (Foto: Frazão, nov. 2001)



#### d) Sedimentos de Praias

Os depósitos praias atuais são sedimentos arenosos inconsolidados constituídos basicamente por quartzo, minerais pesados, mica, fragmentos de rochas e carapaças de organismos, com granulometria bastante variada. Estes sedimentos são submetidos à ação da dinâmica costeira e retrabalhamento constante, sendo transportados para outras áreas produzindo diferenças na morfologia praias, por processos fluviais, e, principalmente, marinho e eólico, com aporte contínuo de sedimentos (Figura 1.7).

#### 1.4.5. ARCABOUÇO TECTÔNICO

A região é alvo de inúmeros estudos no contexto da neotectônica, devido à ocorrência de diversas áreas sísmicamente ativas, a exemplo da Falha Sísmica de Samambaia (João Câmara - RN). Ferreira *et al.* (1987) estabeleceram o campo de tensões atual, com compressão ( $\alpha_1$ ) E-W e extensão ( $\alpha_3$ ) N-S. Na mesma região trabalhos recentes caracterizaram, em campo, estruturas compatíveis com a falha definida com dados sísmicos.

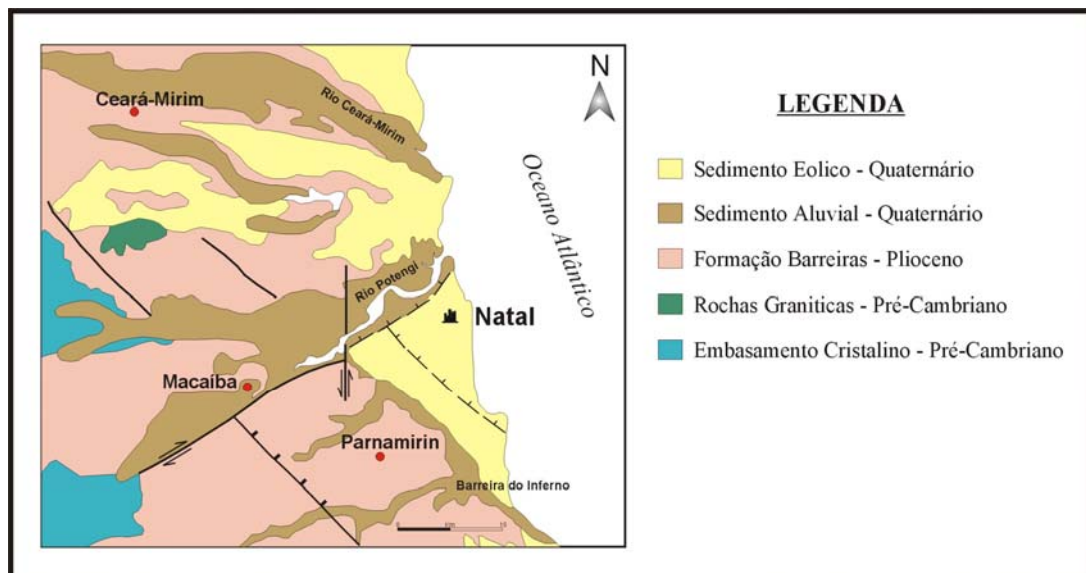
O litoral oriental do Rio Grande do Norte é marcado por uma série de vales estruturais de direção NE a ENE, os quais são controlados por feições tipo *graben* que aprisionam, em seu assoalho, os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras (Mioceno-Pleistoceno), capeados por aluviões e outros depósitos recentes (Bezerra *et al.* 1998).

As rochas praias, que ocorrem ao longo do litoral são boas ferramentas para caracterizar a neotectônica da região (Caldas 1996). Devido à natureza dos corpos arenosos, os indicadores cinemáticos, principalmente estrias, são pouco desenvolvidos nos mesmos; porém, a morfologia e arranjo dos sistemas de fraturas pode suprir, pelo menos em parte, essa deficiência (Pereira 1999).

De acordo com Pereira (1999) que estudou as principais direções de lineamentos na Formação Barreiras e nas rochas praias, na Formação Barreiras foram observados campo de tensões com extensão N-S e compressão E-W, sendo que este campo de tensões pode se reportar a um evento mais antigo (pleistoceno inferior), compatível com o campo regional atual (compressão E-W e extensão N-S).

Os lineamentos preferenciais observados nas rochas praias, segundo Pereira (*op. cit.*), foram nas direções N-S, E-W e pares conjugados NE e NW, oblíquos à orientação preferencial do cordão de arenito de praia.

Os processos tectônicos atuantes próximo ao estuário Potengi e áreas adjacentes, foram descritos com mais precisão a partir das idades por radiocarbono obtidas por Bezerra (1998) e Bezerra *et al.* (1998). Mais recentemente Bezerra *et al.* (2001), com base em dados de poços e de geofísica, concluíram que a bacia do estuário do rio Potengi apresenta a forma de um semi-graben, estendendo-se por no mínimo 20km a partir do litoral até Macaíba, e limitada pela falha do Jundiá de direção preferencial de 60° (NE), localizada na margem direita do rio Potengi (Figura 1.12).

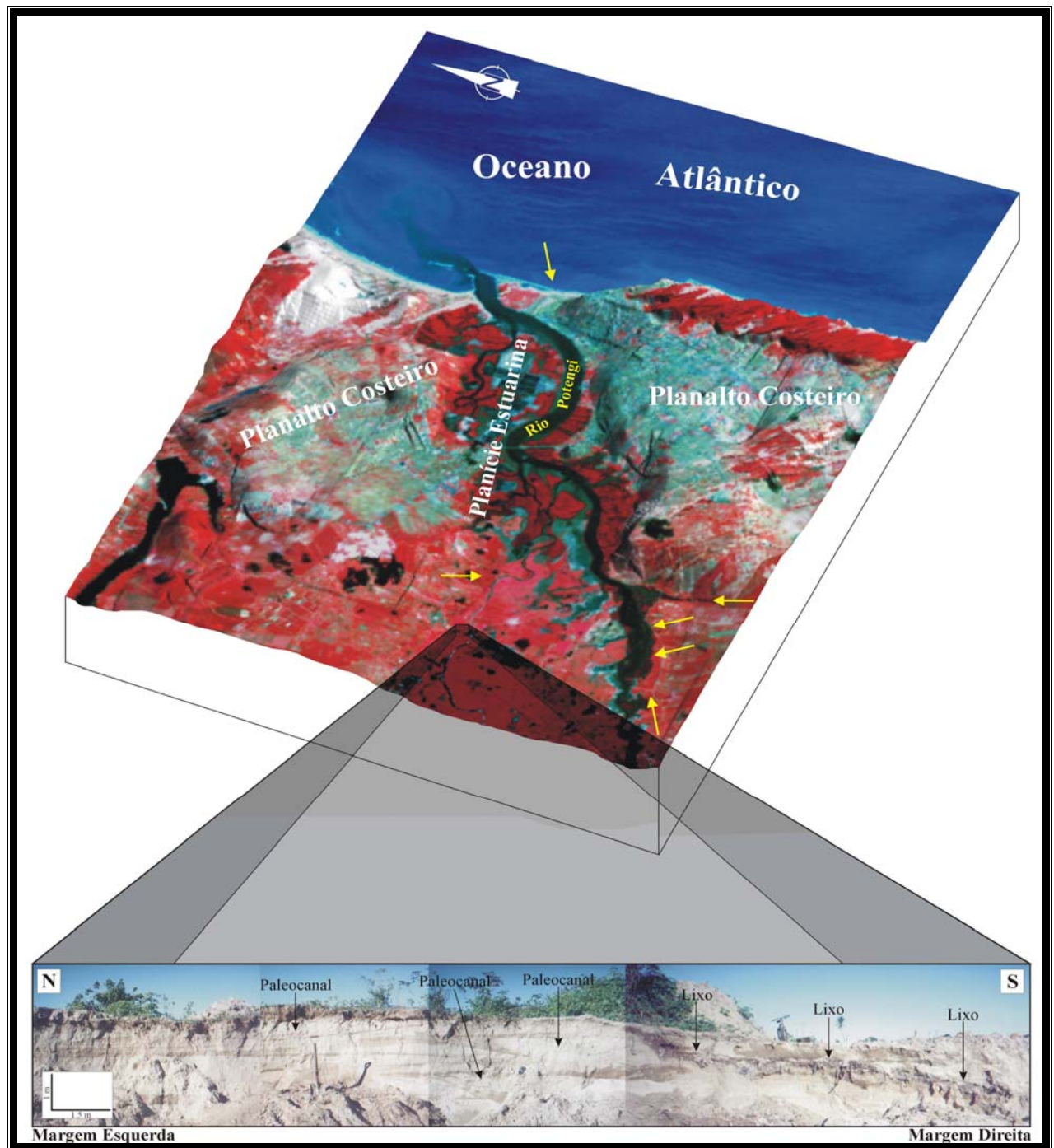


**Figura 1.12** - Mapa geológico da planície costeira e adjacente ao embasamento cristalino entre a Barreira do Inferno e a foz do rio Ceará-Mirim, mostrando os principais lineamentos tectônicos (modificado de Bezerra *et al.* 2001).

Analisando-se o modelo digital de terreno (MDT) combinado com a imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 (órbita/ponto 214-064 de 04 de agosto de 2001) (Figura 1.13), foi possível observar na bacia do estuário Potengi, algumas falhas com a direção N que truncam a falha do Jundiá e falhas com *trends* para NW, além do soerguimento do planalto costeiro na margem direita do rio Potengi. Este soerguimento estaria relacionado ao basculamento de blocos ocasionado pela falha do Jundiá.

Na margem esquerda, observa-se paleomeandros que refletem a inclinação e migração lateral do canal do rio Potengi em direção à falha do Jundiá, devido ao basculamento do bloco crustal (Figura 1.13). Estudos do controle tectônico da distribuição dos canais de migração lateral também apresentam relevância para a

industria do petróleo, uma vez que controles tectônicos de paleovales influenciam a distribuição e migração de hidrocarbonetos.

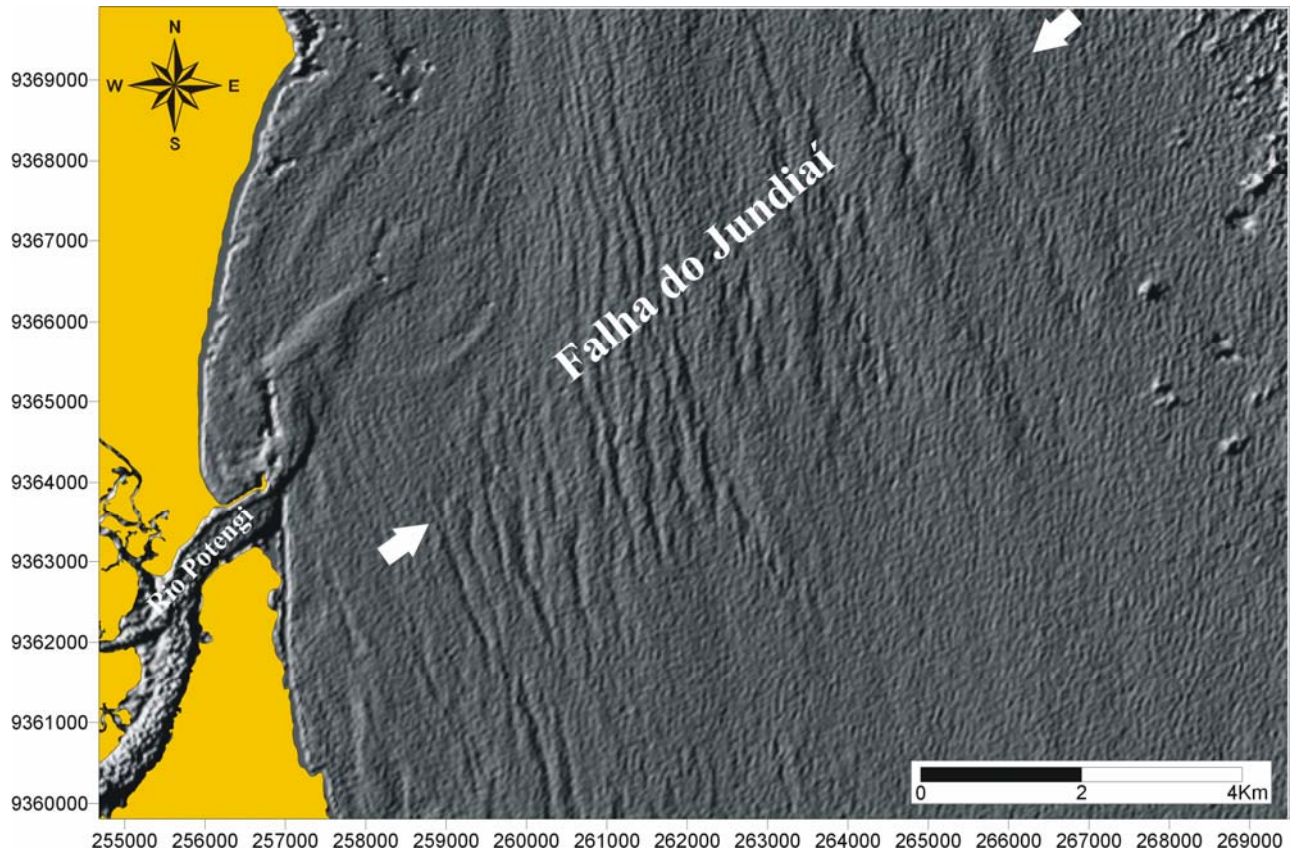


**Figura 1.13** - Bloco diagrama mostrando a topografia do semi-graben do rio Potengi, a partir da combinação dos dados planimétricos e com o sensor ETM+ do Landsat 7 (2001), através da composição colorida 4R 3G 2B e migração lateral do canal do rio Potengi para a margem direita, devido ao basculamento do bloco crustal causado pela reativação da falha do Jundiá.

Tanto as falhas com *trends* NE como para NW são compatíveis com a compressão de E-W (Assumpção 1992; Lima *et al.* 1997; Ferreira *et al.* 1998). Entretanto, visto que algumas falhas com *trend* para NW se desviam mais de 45° da direção da reativação da

falha (Bezerra 1998), sua reativação pode ter sido favorecida pela pressão de altos fluídos e pelo material da falha fraco (Bezerra & Vita-Finzi 2000).

Frazão & Vital (2002b), através do sensor ETM+ do Landsat 7, utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional *sunangle* ( $118^\circ$  Az e  $18^\circ$  de inclinação solar), mapearam a continuação da falha do Jundiáí na parte submersa da plataforma continental até uma profundidade de aproximadamente 30m, demonstrando que a falha apresenta um *trend* preferencial para NE (Figura 1.14).



**Figura 1.14** - Imagem Landsat 7 ETM+ utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional *sunangle* ( $118^\circ$  Az e  $18^\circ$  de inclinação solar), mostrando a continuação da falha do Jundiáí na plataforma continental.

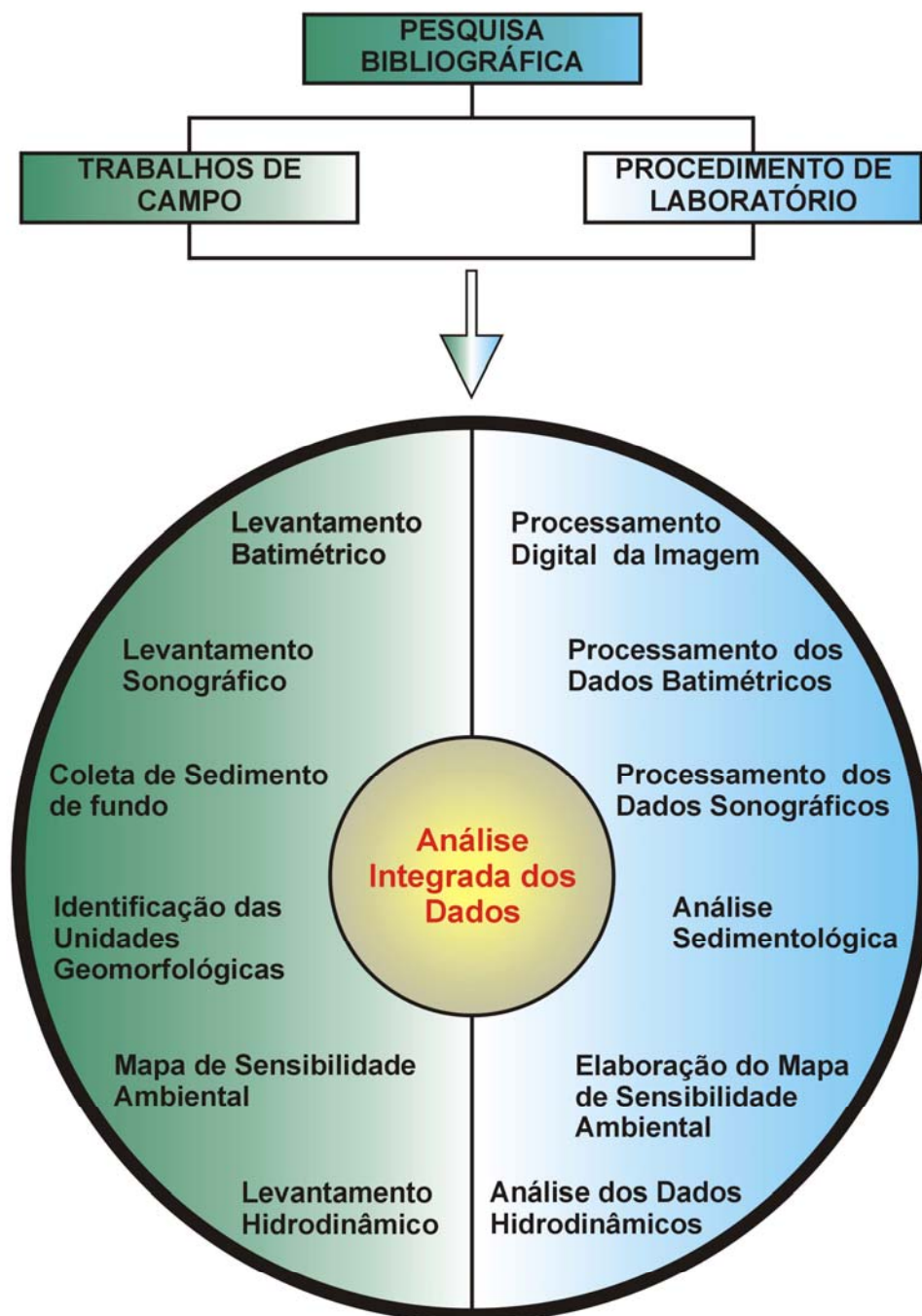




**CAPÍTULO 2:**  
**MATERIAIS E MÉTODOS**

## 2.1. INTRODUÇÃO

As atividades desenvolvidas para a elaboração desta dissertação foram subdivididas nas seguintes etapas: pesquisa bibliográfica e cartográfica, trabalhos de campo, laboratório, gabinete e integração dos dados. A metodologia aplicada pode ser melhor visualizada no fluxograma da figura 2.1.



**Figura 2.1** - Fluxograma da metodologia adotada.

## **2.2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA**

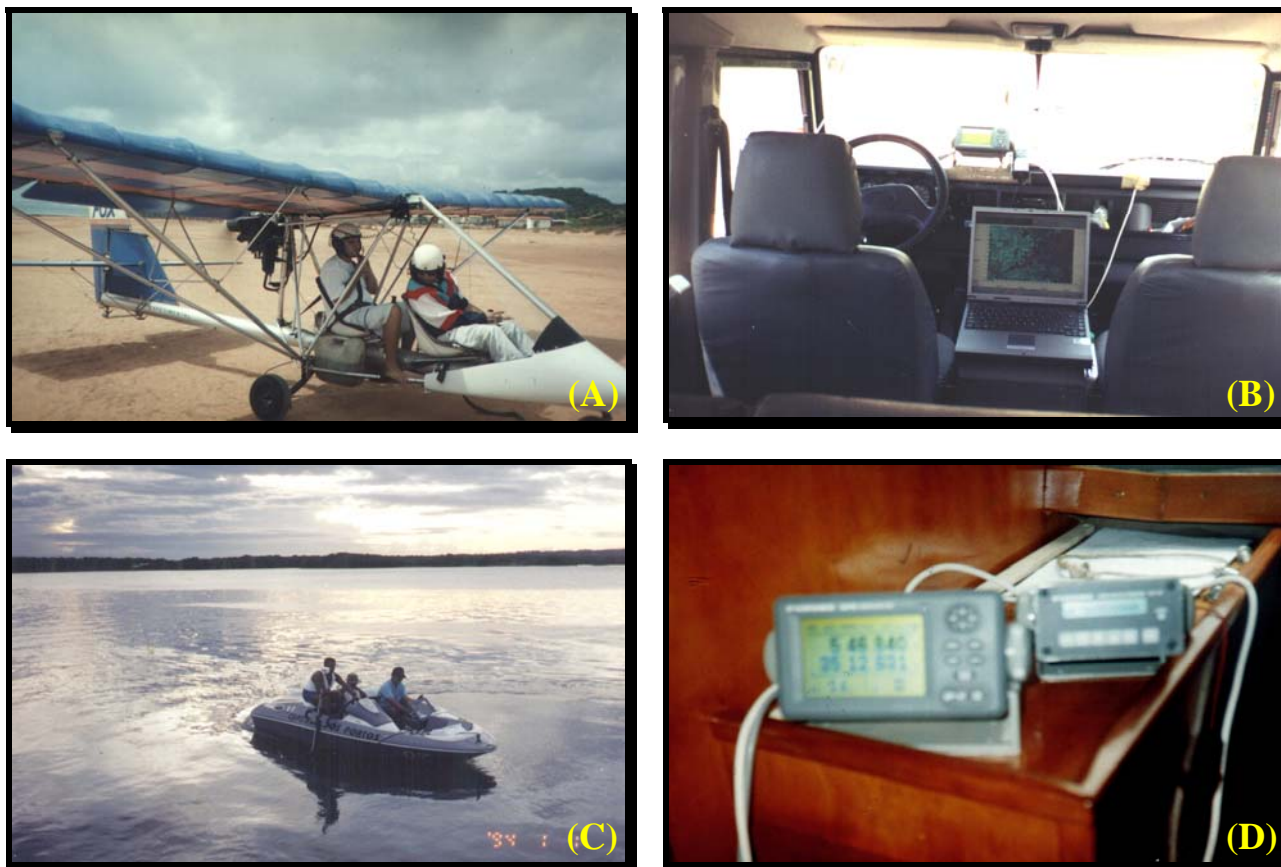
Esta etapa constou do levantamento das publicações relacionadas ao cenário geológico regional, da metodologia utilizada nas diferentes etapas deste trabalho, bem como estudos geológicos costeiros realizados em áreas quaternárias de outros setores da costa brasileira e de países com contexto geológico semelhante ao da costa oriental do Estado do Rio Grande do Norte, principalmente naqueles dominados por regimes de mesomarés.

Para este trabalho foram consultados dissertações, teses, páginas eletrônicas, relatórios, periódicos especializados e livros, bem como mapas existentes da região costeira, incluindo cartas planialtimétricas, batimétricas, fotografias aéreas e imagens de satélite.

## **2.3. TRABALHOS DE CAMPO**

Os trabalhos de campo foram executados em três etapas: (1) a primeira consistiu de um levantamento aéreo, realizado com ultraleve modelo *Fox*, com a finalidade de tirar fotos oblíquas dos principais ecossistemas ao longo da linha de costa e identificação de alvos específicos, para auxiliar na separação dos segmentos sensíveis ao derramamento de óleo; (2) a segunda compreendeu a investigação “*in situ*” com um jipe modelo *DEFENDER 110 4x4* da *Land Rover* para caracterizar e separar os segmentos com auxílio de um DGPS. Em cada segmento sensível ao derrame de óleo, foram realizados perfis de praia, coleta de dados hidrodinâmicos (ondas, correntes, marés), amostragem de sedimentos e sócio-econômicos; e (3) a terceira consistiu de levantamentos batimétricos, sonográficos, parâmetros físicos d’água e coleta de sedimentos de fundo no estuário do rio Potengi, tendo sido utilizado como meio flutuante embarcações cedidas pela Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte - CPRN / Marinha do Brasil (Figura 2.2).

O posicionamento dos dados levantados foi efetuado com o auxílio do *Global Positioning System - GPS* da marca *Furuno* (modelo *GP-31*), corrigidos com dados do *Global Differential Positioning System - DGPS*, também da marca *Furuno* (modelo *GR-80*). Esta correção é efetuada via *link* de rádio, operando na frequência de 305.0 kHz, da estação base localizada em Calcanhar-RN pertencente à Marinha do Brasil, situada na latitude de 05°10’ S e longitude 35°29’ W (Figura 2.2d).



**Figura 2.2 - A)** Ultraleve modelo *FOX* utilizado para tirar fotos oblíquas de pequeno formato ao longo da linha de costa, com finalidade de individualizar os segmentos sensíveis ao derramamento de óleo; **B)** Carro equipado com DGPS e GPS de navegação para separação dos segmentos sensíveis ao óleo; **C)** Embarcação pertencente a Capitania dos Portos do RN (CPRN) utilizada nos levantamentos dos perfis ecobatimétricos, sonográficos e amostragem de sedimento no rio Potengi e **D)** GPS / DGPS da *FURUNO* utilizados para navegação e posicionamento dos perfis batimétricos (Fotos: Frazão, nov. 2001).

## 2.3.1. LEVANTAMENTO TERRESTRE

### 2.3.1.1 Levantamentos da Morfologia Costeira

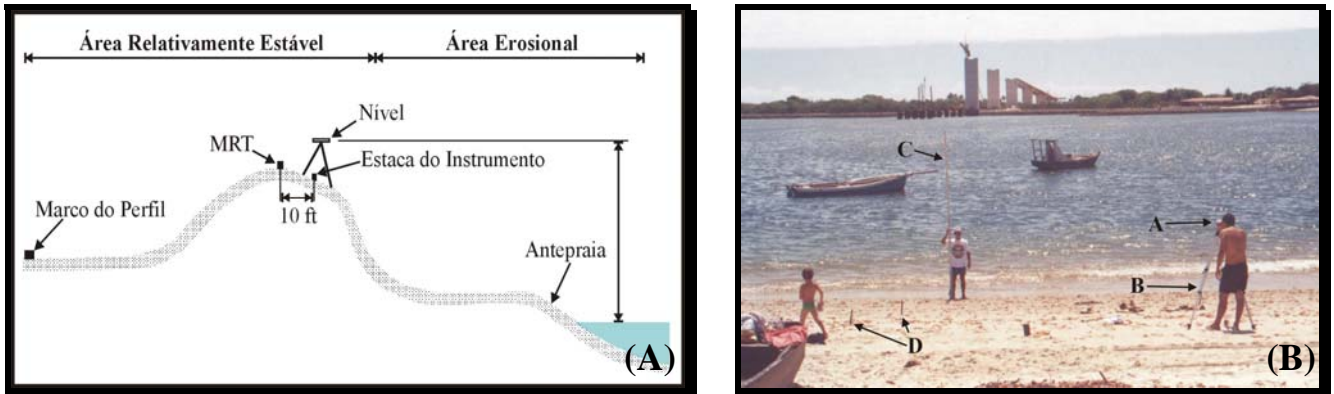
#### a) Método e procedimento no levantamento dos perfis de praia

Neste trabalho utilizou-se o método de levantamento por *Stadia* modificado que tem provado ser rápido, econômico e suficientemente preciso para este tipo de estudo, desenvolvido por Birkemeier (1981) (Figura 2.3a).

O levantamento de perfis de praia foi realizado sempre em períodos de baixa mar, a partir de marco de referência temporário (MRT), escolhido previamente e posteriormente locado em campo, no início do pós-praia, em cada um dos segmentos sensível ao derramamento de óleo, dispostos ao longo da linha de costa e separados com base nas características geomorfológicas e socioeconômicas do litoral de acordo com Araújo *et al.* (2000). Durante estes levantamentos utilizou-se um nível da marca *Leica*



modelo NA 724, um tripé regulável topográfico de alumínio, uma mira com 4m de comprimento, trena e piquetes de PVC (Figura 2.3b).



**Figura 2.3** - A) Método de levantamento de perfis topográficos modificado de Birkemeier (1981) e B) Nível Topográfico da *Leica* modelo NA 724 (A), tripé regulável de alumínio (B), mira com 4m de comprimento (C) e piquetes de PVC (D) (Fotos: Frazão, nov. 2001).

#### b) Amostragem dos sedimentos praiais

Amostras foram coletadas nas zonas do pós-praia, estirâncio e ante-praia de cada perfil de praia realizado. Tendo em vista a importância do dado granulométrico para a elaboração dos mapas de sensibilidade ambiental, teve-se o cuidado de amostrar apenas a camada mais superficial, de modo a caracterizar o estrato formado no momento da coleta (Muehe 1996).

#### 2.3.1.2. Determinação dos Dados Hidrodinâmicos (Ondas e Correntes Litorâneas)

A determinação da altura, período e direção de incidência das ondas sobre a linha de costa foram obtidos a partir da observação direta de acordo com Muehe (1996), para cálculos de transporte de sedimentos e caracterização geomorfológica da praia. Estes dados foram medidos no mesmo período do levantamento topográfico, sempre durante a preamar, tendo-se o cuidado de registrar a hora inicial e final, altura da maré para o dia da medição e o local de observação na caderneta de campo.

### 2.3.2. LEVANTAMENTO DE DADOS NO ESTUÁRIO POTENGI

#### 2.3.2.1. Levantamento Ecobatimétrico

O levantamento ecobatimétrico foi realizado ao longo de perfis longitudinais e transversais ao canal do rio, totalizando 89 perfis. O espaçamento entre os perfis

transversais foi de aproximadamente 50m. Este espaçamento foi definido levando-se em consideração a presença de bancos presentes no canal.

Os dados batimétricos foram obtidos utilizando-se um ecobatímetro da *Odom Hydrographic Systems* modelo *HYDROTRAC* operando na frequência de 200 kHz, com resolução do feixe vertical de 0.01m, com portas para *side scan sonar* e DGPS da *STARLINK* acoplados (Figura 2.4). A calibração da ecossonda de feixe vertical foi realizada a cada início de operação, levando em consideração a velocidade do som de 1543.18 m/s para a região com base nos dados de temperatura e salinidade medidos com o CTD.

O levantamento dos perfis ecobatimétricos transversais e longitudinais foram posicionados em tempo real mediante o *software GPS TrackMaker v. 3.3.1*. Nesta etapa o DGPS da *FURUNO* com interface NMEA 0183 foi acoplado à porta serial COM1 do *notebook*, possibilitando a visualização da trajetória da embarcação em imagens de satélite retificadas e em mapa batimétrico preliminares (Figura 2.5).

### **2.3.2.2 Levantamento Sonográfico**

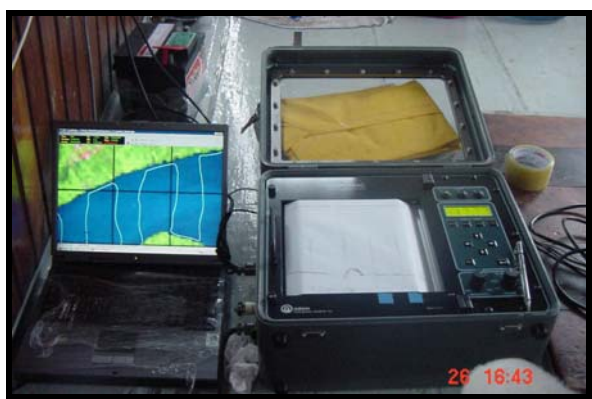
A cobertura sonográfica foi efetuada em toda área de estudo, seguindo-se a orientação do canal estuarino e, na medida do possível, objetivando mapear o fundo em suas porções mais rasas, próximo às margens e aos bancos existentes na área portuária próximo à gamboa do Jaguaribe.

Dois sistemas de sonar de varredura lateral “*side scan sonar*” foram utilizados: (1) O modelo 272T da *EG&G ENVIRONMENTAL EQUIPMENT*, pertencente à Universidade de Kiel, operando numa frequência de 500 kHz e registrando num gravador de papel seco, com 16 diferentes tons de cinza, apresentando uma resolução de 0.13m para o range de 50 metros (Figura 2.6a) e (2) o sonar modelo *HYDROTRAC* da marca *Odom Hydrographic Systems*, pertencente à UFRN, operando numa frequência baixa de 200 kHz, registrando num gravador de papel térmico, com 8 tons diferentes de cinza, dispondo de uma resolução de 0.01m (Figura 2.6b).

Os alcances “*ranges*” de varredura lateral foram escolhidos em função da profundidade e largura dos canais e da distância do recobrimento em relação às margens. Todos os perfis sofreram as correções relativas às distorções inerentes ao funcionamento do equipamento.



**Figura 2.4 - A)** Ecobatímetro modelo *HYDROTRAC* da *Odom*, operando na frequência de 200 kHz e **B)** Antena do DGPS *Starlink* acoplado ao *HYDROTRAC* (Fotos: Frazão, set. 2001).



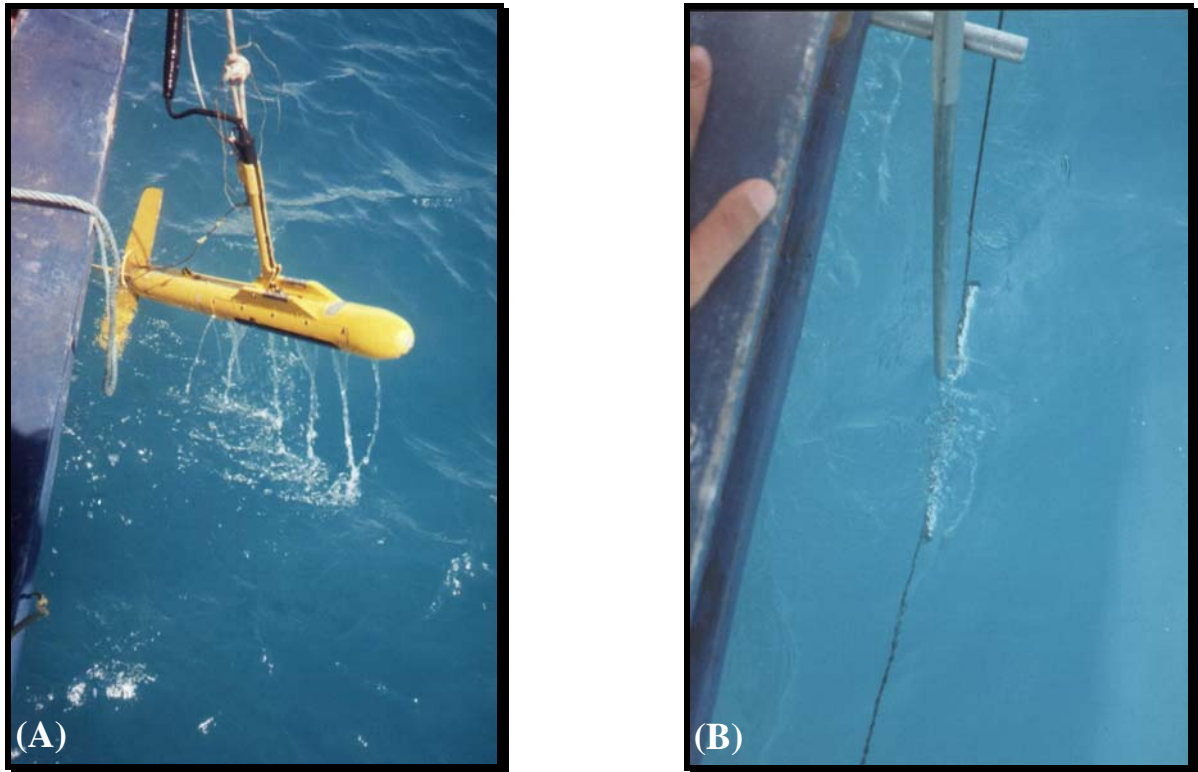
**Figura 2.5 -** Navegação em tempo real mediante o *software GPS TrackMaker v.3.3.1* possibilitando a visualização da trajetória da embarcação na tela do *notebook* (Fotos: Frazão, jan. 2002).

### 2.3.2.3. Levantamento dos Parâmetros Físicos da Água

Esta etapa do trabalho foi realizada entre os dias 21 e 23 de novembro de 2002, em 6 estações fixas, dispostos ao longo do canal principal de navegação do rio Potengi, desde a Ponte do Igapó até sua foz, durante o período de maré de sizígia, que de acordo com a D.H.N (1966), é quando ocorrem as mais fortes correntes encontradas no estuário.

A plataforma utilizada para a medição dos parâmetros físicos (temperatura, salinidade, densidade, direção e velocidade da corrente) foi a Lancha Piloto I pertencente

à Praticagem do Porto de Natal; nas ocasiões de mudança de direção e sentido da corrente, a lancha era fundeada em dois pontos (proa e popa) para que seus movimentos fossem minimizados.



**Figura 2.6** - Operação com o peixe do sonar de varredura lateral da *EG&G*, transdutor com 2 canais de recepção rebocado a 2 metros de lâmina d'água (A) e transdutor unidirecional do sistema *HYDROTRAC* da *Odom*, fixado na lateral da embarcação (B) (Fotos: Frazão, jan. 2002).

#### **a) Medição da corrente**

As medições do vetor velocidade foram efetuadas utilizando-se a embarcação como referência. Neste caso, para se calcular o vetor velocidade da água com relação ao barco, é necessário conhecer com precisão a velocidade do barco relativa ao leito do estuário para extrair-se o vetor velocidade absoluta da água.

A medição da velocidade e direção da corrente foi realizada durante um ciclo de 13 horas, utilizando-se um correntômetro modelo 108kIII da *VALEPORT* e um correntômetro acústico por efeito Doppler da *AANDERAA* (Doppler Current Sensor - DCS 3500).

O correntômetro modelo 108MkIII da *VALEPORT* (Figura 2.7a), mede basicamente direção e intensidade da corrente através de uma hélice de impulsão (rotor). A intensidade da corrente foi estimada pelo número de rotações do rotor, em torno de um eixo horizontal, por unidade de tempo. A direção da corrente, em relação ao aparelho, foi

medida por um leme que se orienta com o fluxo. A direção do instrumento no que tange ao campo magnético terrestre foi medida por uma bússola magnética. Conseqüentemente, na edição dos dados o primeiro passo foi obter a direção da corrente em relação ao norte geográfico, corrigindo o efeito da declinação magnética.

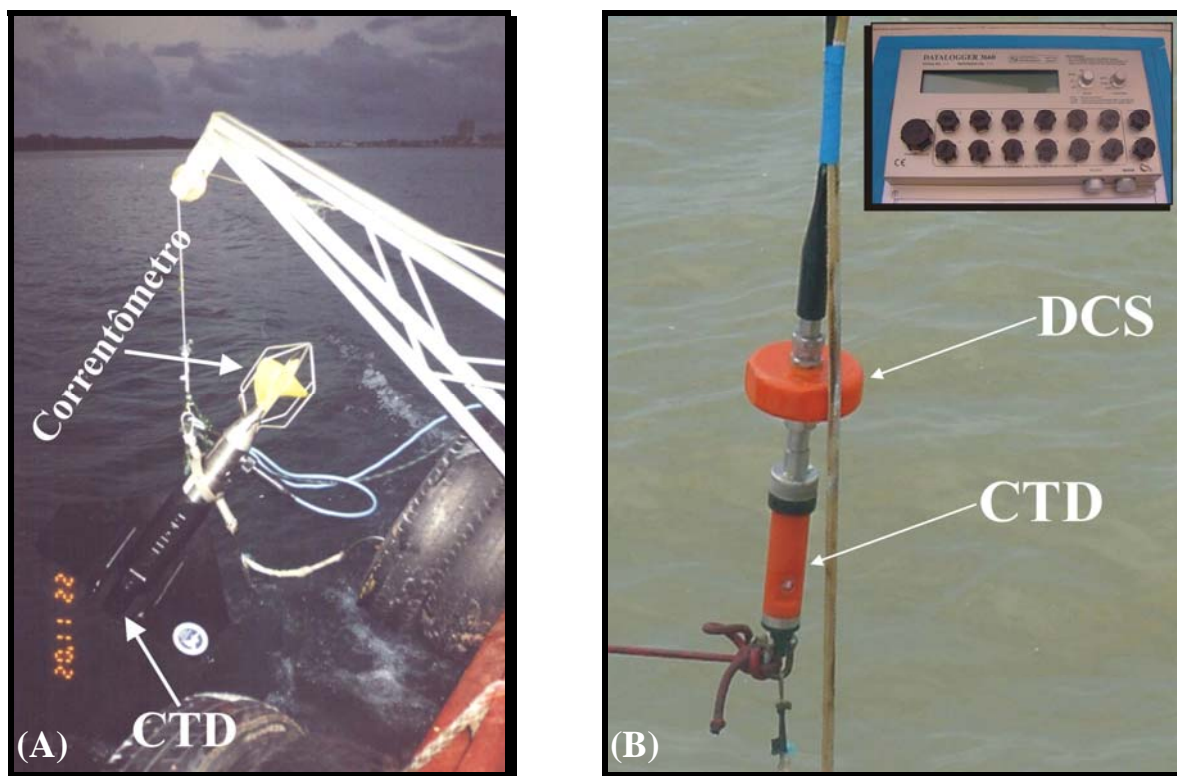
O correntômetro acústico por efeito Doppler (DCS) modelo 3500 da AANDERAA (Figura 2.7b), utiliza o princípio segundo o qual a frequência de uma onda sonora é modificada quando refletida por um objeto em movimento. O aparelho emite pulsos sonoros a partir de 4 transdutores de *piezoceramica* posicionados individualmente a 90° ao redor da circunferência do disco, perpendiculares ao centro da linha do sensor e esses pulsos sonoros são refletidos de volta para o instrumento pelos refletores existentes na água do mar. Esses refletores, bolhas de ar, materiais ou organismos suspensos na água, como partículas em suspensão ou organismos planctônicos, são transportados pela corrente e, assim, por efeito *doppler*, a frequência da onda sonora refletida é diferente daquela emitida originalmente. O transdutor sonoro capta essa anomalia de frequência e estima a velocidade relativa entre o refletor e o instrumento a partir de uma distância de 0.5 a 2 metros do transdutor. Este tipo de correntômetro acústico por efeito *doppler* também possui um componente Pt 2000 de platina que mede a temperatura de água com precisão de  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ .

#### ***b) Medição da temperatura, salinidade e densidade***

A temperatura e, principalmente, a salinidade são as propriedades hidrográficas que necessariamente devem ser medidas durante um experimento num sistema estuarino. A salinidade é de fundamental importância não somente pelo fato de seu gradiente longitudinal gerar movimentos estuário acima, como também para classificá-lo de acordo com o critério da estratificação da salinidade e com o Diagrama Estratificação-circulação.

A cada estação fixa foi realizada uma perfilagem vertical contínua de temperatura e de salinidade em função da pressão ou profundidade, utilizando-se um CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*) modelo 108 MkIII da VALEPORT (Figura 2.7a) e um CTD modelo 3231 da AANDERAA (Figura 2.7b), permitindo uma precisão de cinco centésimos de grau Celsius ( $0.05^{\circ}\text{C}$ ), de condutividade ( $0.075 \text{ mS/cm}$ ) e de salinidade ( $0.04 \text{ psu}$ ), ambos compostos por sensores de condutividade, temperatura, salinidade e pressão.





**Figura 2.7** - Conjunto de correntômetro com CTD modelo 108 MkIII da VALEPORT, com uma hélice com 2 pás (rotor) para medir a intensidade da corrente e um leme de cauda para se orientar ao fluxo (A) e conjunto correntômetro doppler (DCS), CTD e DATA LOGGER da AANDERAA, com 18 canais (B) (Fotos: Frazão, nov. 2002).

Dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento) foram coletados em cada estação fixa, devido estes parâmetros influenciarem diretamente na camada superficial d' água.

A aquisição dos parâmetros físicos da água (temperatura, salinidade e corrente) foi realizada em tempo real, através do DATA LOGGER modelo 3660 da AANDERAA com 18 canais e do CDU modelo 8008 da VALEPORT, conectados ao *notebook* expondo em tempo real os dados em forma de gráficos.

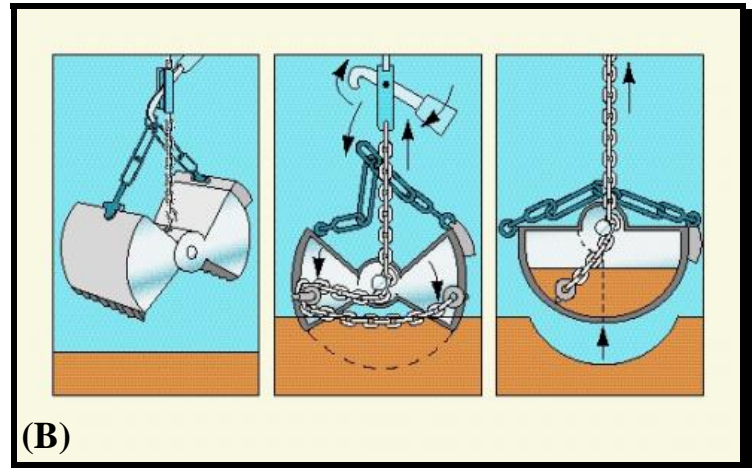
#### 2.3.2.4 Coleta de Sedimento de Fundo

Uma interpretação preliminar dos sonogramas revelou a variedade e distribuição espacial das intensidades de tons registrados; assim os locais de amostragem de sedimentos foram escolhidos de acordo com esta distribuição espacial, com o propósito de calibrar cada área de intensidade diferenciada de tons.

Desta forma, foram coletadas 48 amostras de sedimento de fundo utilizando-se amostrador pontual do tipo *van veen* (Figura 2.8a); em cada estação foram anotadas: hora

inicial e final da coleta, profundidade local (fornecida pelo ecobatímetro modelo *HYDROTRAC*) e coordenadas geográficas (fornecidas pelo DGPS).

Este amostrador pontual do tipo *van veen* (Figura 2.8b) é um equipamento bastante simples e apenas amostra o fundo, não se preocupando com a preservação das características estratigráficas ou mecânicas da amostra.



**Figura 2.8** - Coleta das amostras de fundo do estuário do rio Potengi com o amostrador pontual do tipo *van veen* (A) e esquema do sistema de coleta com o amostrador pontual do tipo *van veen* (B) (Foto: Frazão, mar. 2002).

## 2.4. PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

### 2.4.1. TRATAMENTO PRÉVIO DAS AMOSTRAS GEOLÓGICAS

#### 2.4.1.1. Sedimentos Arenosos e Lamosos

O material coletado, previamente seco em temperatura ambiente, e classificado pela cor, foi submetido a sucessivas lavagens com água destilada para eliminação de sais (Figura 2.9a), com a finalidade de evitar alterações na análise granulométrica. Posteriormente este material foi levado à estufa a 60°C até a secagem completa.

#### 2.4.1.2. Sedimentos Arenosos e Lamosos com a Presença de Carbonatos

Foram utilizados 50g deste material, previamente seco em temperatura ambiente, e classificado pela cor, para ataque com ácido clorídrico (HCl) 10% diluído, com o propósito de quantificar e eliminar o carbonato presente (Figura 2.9b). Em seguida, este material foi lavado com água destilada para eliminação do ácido clorídrico.

Posteriormente, as amostras foram pesadas para o conhecimento do seu percentual de carbonato.

#### **2.4.1.3. Sedimentos Arenosos e Lamosos com Presença de Matéria Orgânica**

Foram utilizados 10g do material atacado anteriormente por HCl diluído a 10%, com a finalidade de quantificar e retirar toda a matéria orgânica existente na amostra. A matéria orgânica foi eliminada com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), diluído em água destilada (100ml  $H_2O_2$  para 900ml de água destilada). Em seguida, este material foi lavado com água destilada para eliminação do peróxido de hidrogênio (Figura 2.9b). Os filtros contendo material foram secos em estufa a uma temperatura máxima de 60°C e pesados para o conhecimento do seu percentual de matéria orgânica.

#### **2.4.2. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

Após eliminação do carbonato e matéria orgânica, as amostras foram analisadas quanto à granulometria. Para fração maior que 2 mm utilizou-se o peneiramento convencional, enquanto a fração menor que 2mm foi analisada em um granulômetro a laser modelo 1180L da CILAS (Figura 2.9c), com um range de 2 mm a 2 microns; o resultado da análise efetuada pelo granulômetro a laser é dada na forma de histogramas (diâmetro das partículas vs valores cumulativos) e uma tabela com o percentual cumulativos em cada fração.

Em seguida, os valores obtidos na análise granulométrica foram plotados em histogramas e curvas acumulativas construídas em escalas aritméticas segundo Folk (1974), que classifica o sedimento de acordo com as proporções de cascalho (>2mm), areia (0.0625 - 2mm) e lama (< 0.0625mm) usando um diagrama ternário que define quinze principais grupos texturais. Para os cálculos estatísticos de distribuição (Média, Mediana, Selecionamento, Assimetria e Curtose) e frequência acumulada utilizou-se o software SAG. O SAG (Sistema de Análise Granulométrica) é um programa de cálculo de parâmetros estatísticos e construção de histogramas para amostras sedimentares. Os parâmetros estatísticos e a classificação textural baseiam-se no método de FOLK e a classificação faciológica baseia-se no método de Lasonneur modificado por Dias (1996).





**Figura 2.9** - (A) Sedimentos arenosos e lamosos colocados em becker de 500 e 1000 ml e lavados com água, para a dissolução do sal, para serem colocados na estufa a uma temperatura de 60°, para secagem; (B) Amostra atacada com HCl diluído a 10% e peróxido de hidrogênio e (C) Análise granulométrica no granulômetro à laser modelo 1180L da CILAS (Fotos: Frazão, nov. 2002).

## 2.5. TRABALHOS DE GABINETE

Esta etapa consistiu da organização, tabulação, tratamento e processamento dos dados coletados no campo, para reduzir e corrigir eventuais erros e posterior integração dos dados.

### 2.5.1. PROCESSAMENTO DE DADOS GEOFÍSICOS

#### 2.5.1.1. Análise Batimétrica

Em gabinete todas as profundidades foram reduzidas a um datum constante onde o zero relativo aproxima-se do zero absoluto estabelecido para o nível de águas médias mais baixas da maré de sizígia, em seguida os dados de profundidade foram analisados e filtrados para corrigir eventuais erros.

Posteriormente, os dados do levantamento batimétrico foram processados no *software SURFER (Win98) v. 7.0*, que tem a capacidade de gerar GRID's e contornos de superfície de plotagem em três dimensões (3D). Os arquivos grid (\*.GRD) foram gerados para produzir mapas de isolinhas da morfologia do fundo do estuário do rio Potengi.

Para a elaboração da topografia de fundo do estuário do rio Potengi dois passos no processamento foram seguidos: (1) o selecionamento do melhor método de gridagem

para a topografia do estuário e (2) análise das diferenças entre o espaçamento das linhas de levantamento e o espaçamento entre as linhas do processamento. O método da krigagem foi o que mostrou melhores resultados na definição da topografia submarina, devido à boa distribuição de cada *spike* do levantamento batimétrico que possibilitou uma boa interpolação dos dados.

### **2.5.1.2. Análise Sonográfica**

Conforme ressalta Flemming 1976 *apud* Russel-Cargill (1980), a maior parte dos sistemas de sonografia lateral produzem imagens distorcidas das estruturas morfológicas de fundo, o que dificulta a interpretação dos resultados apresentados nos sonogramas. De acordo com este autor, as principais fontes de distorção nos referidos registros são a variação na velocidade da embarcação, a inclinação do “*range*” de calibração, o espalhamento horizontal do feixe acústico, as variações da altura do sensor, inclinações nas camadas de fundo e instabilidade no cabo de reboque do sensor, entre outras. Desta forma, antes do início da avaliação sistemática dos sonogramas, estas distorções provocadas por: *a) Construção da imagem sonográfica, b) Variações na velocidade da embarcação, c) Distorções de escala, d) Cálculo da resolução transversa, e) Cálculo da resolução vertical (range resolution-Rr), f) Cálculo da altura de um alvo ( $H_0$ ), g) Cálculo do comprimento da sombra acústica ( $L_s$ ), h) Inclinação do “range” (slant range- $R_s$ ), i) Cálculo da distância horizontal verdadeira*, foram eliminadas de acordo com as indicações de Flemming (1976) para evitar interpretações falsas.

## **2.5.2. PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DA ÁGUA**

### **2.5.2.1. Análise e Processamento dos Dados de Correntes**

Inicialmente, os dados de direção magnética (NM) da corrente adquiridos pelos correntômetros do tipo rotor e acústico, foram reduzidos ao norte verdadeiro (N). Isto se fez necessário devido à necessidade de se plotar na carta batimétrica elaborada do estuário do rio Potengi, os vetores de velocidade da corrente, já que ela foi elaborada em relação ao norte verdadeiro.

Para realizar esta redução foi necessário conhecer o ângulo de declinação magnética local (**D**), que é um desvio angular em relação ao norte verdadeiro para leste ou oeste. Na região de estudo esta declinação magnética é de 22°15'W de acordo com os

dados obtidos da D.H.N (2000). Em seguida, foi efetuada a redução da direção magnética (**dd**) ao norte verdadeiro; utilizando-se a seguinte expressão:

$$\mathbf{D} = 90^\circ - (\mathbf{dd} - \mathbf{D})$$

Os dados de velocidades ou intensidade da corrente coletados com o correntômetro da *VALEPORT*, foram tratados inicialmente no *software Valeport VTMetLog v. 1.08*, com a finalidade de filtrar e reduzir os dados coletados pelo correntômetro, e identificar as possíveis perdas de integridade (alterações em seus valores) e processamento para aquisição de tabelas.

As medidas de velocidade e direção da corrente, obtidas pelo correntômetro Doppler (DCS) da *AANDERAA*, foram inicialmente calibrados de acordo com coeficientes de calibração cedidos pelo fabricante. Em seguida os dados foram tabulados utilizando-se o *software da Aanderaa v. 2.20*, com a finalidade de filtrar e reduzir os dados coletados pelo sensor Doppler de Corrente (DCS), com a finalidade de gerar tabelas.

Os dados de temperatura, velocidade e direção da corrente foram calibrados, apresentando *ranges* com valores de 0 a 500 cm/s para velocidade da corrente, de 0 a 360° para a direção magnética da corrente em relação ao norte magnético (NM) e de -8 a 41°C para a temperatura.

Em seguida, estes dados foram analisados no software Grapher (Win98) v. 4.0, para a confecção dos perfis verticais em duas dimensões (2D) da intensidade da corrente, com relação à profundidade e à amplitude de maré, respectivamente, pois os dados de direção da corrente foram plotados diretamente no mapa batimétrico elaborado para o estuário do rio Potengi.

#### **2.5.2.2. Análise dos Dados de Temperatura, Salinidade e Pressão**

Para os dados de temperatura, salinidade, densidade e pressão coletados com o CTD da *VALEPORT* foi utilizado o *software Valeport VTMetLog v. 1.08*, com a finalidade de filtrar e reduzir os dados coletados pelo CTD (temperatura, salinidade e pressão), e identificar as possíveis perdas de integridade.

Inicialmente o CTD da AANDERAA foi calibrado convertendo-se os dados brutos (**N**) medidos para unidades de engenharia usando-se a polinomial de 3ª ordem:  $\mathbf{R} = \mathbf{A} + \mathbf{BN} + \mathbf{CN}^2 + \mathbf{DN}^3$ , em que os coeficientes de calibração foram cedidos pelo fabricante.

Os dados de condutividade, temperatura e pressão foram calibrados, onde os valores da condutividade apresentam um *range* de 0 a 75 mS/cm, a temperatura de -7.5 a 41°C e a pressão de 0 a 1100 kPa.

A conversão dos dados de condutividade e temperatura obtidos com o CTD da AANDERAA em valores de salinidade e densidade, foram efetuados através da equação de estado internacional (IES 80) da Unesco, descrita por Fofonoff, no JGR (1985), vol 90, nº C2, 3332-3342 pp.

Para visualização dos dados coletados com os dois aparelhos, os mesmos foram plotados em 2-D e 3-D com os *softwares Grapher e Surfer*, respectivamente.

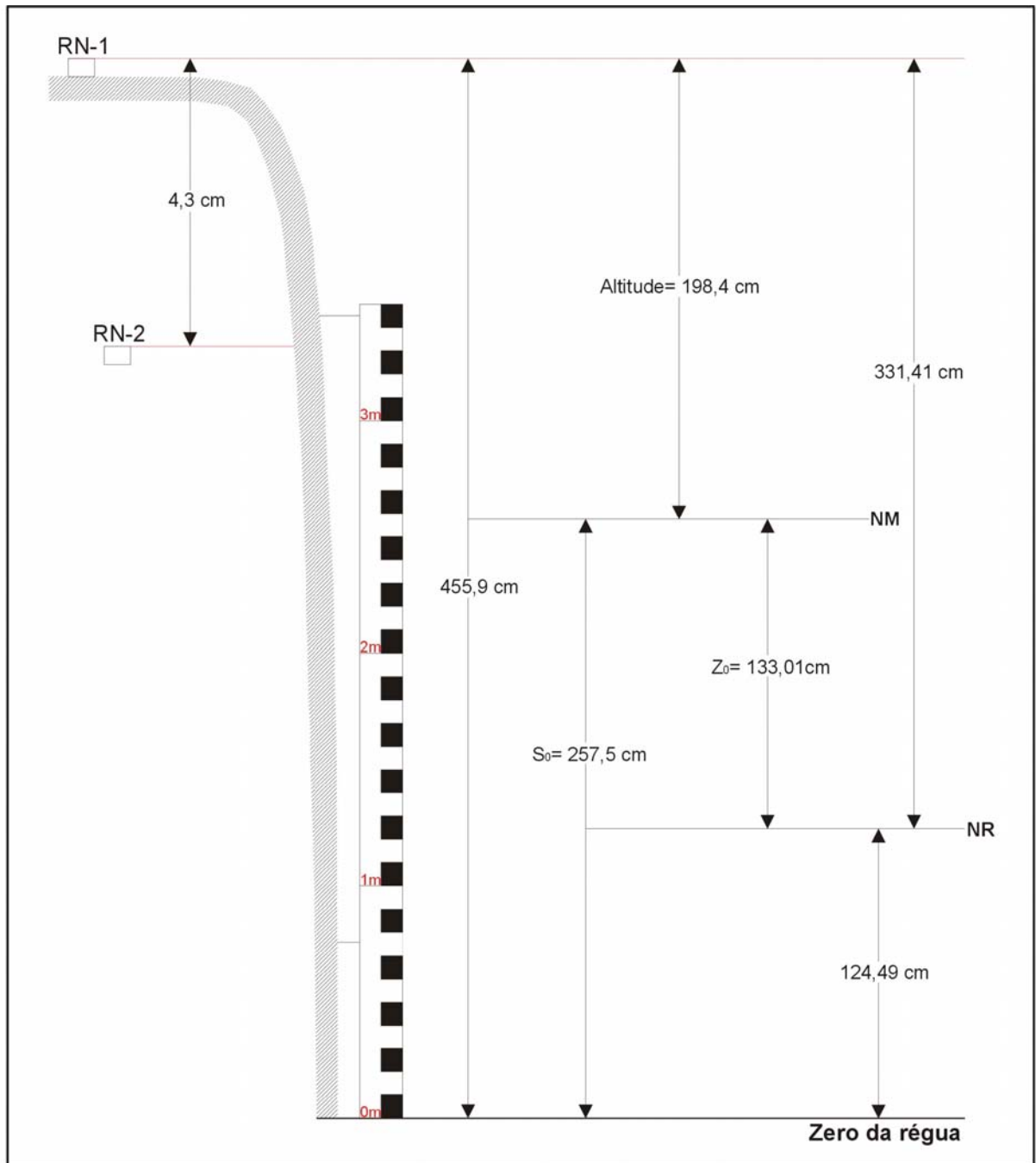
### **2.5.2.3. Análise das Marés**

Os dados de amplitude de marés foram obtidos, a partir da instalação de uma estação maregráfica na margem direita do estuário do rio Potengi, localizada na Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte (CPRN), com as seguintes coordenadas geográficas 05°46'421" S e 35°12'301" W, com base em duas referências de nível (RN-1 e RN-2), como se mostra no diagrama de nivelamento (Figura 2.10). O nível de redução calculado para esta estação foi de 124.49cm acima do zero da régua, como é mostrado na ficha do nivelamento geométrico da estação maregráfica (Anexo 01).

Um período de aproximadamente 1 ano e 8 meses, ou seja 16.000 horas de altura da maré no Porto de Natal, foi usado para se obter a análise harmônica da maré para os anos de 2001 e 2002, utilizando o *software PACMARÉ* (Franco 2000).

### **2.5.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

Nesta fase foram aplicadas técnicas de síntese (redução da dimensionalidade) e realce das informações contidas no sensor ETM+ do Landsat 7 (órbita/ponto 214-064 de 04 de agosto de 2001), com objetivo de ampliar o contraste entre as diferentes unidades de paisagem (áreas urbanas, morfologia costeira, geologia e unidades geomorfológicas). Constituí-se, portanto, em uma etapa de preparação para a atividade de interpretação dos produtos de sensoriamento remoto resultantes do tratamento digital.



**Figura 2.10** - Diagrama de nivelamento da estação maregráfica da Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte (CPRN).

Inicialmente, a imagem Landsat 7 ETM+ foi retificada para que pudesse ser usada efetivamente como base cartográfica digital atual. Usando mapas com escala 1:100.000 e 1:50.000, a imagem de satélite ETM+ foi retificada para um sistema de coordenadas de projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM). Uma densa rede de 110 pontos de controle no terreno foi escolhida para o georreferenciamento da imagem. Muitos destes pontos foram medidos usando-se instrumentos de *Global Positioning System* (GPS) e *Global Differential Positioning System* (DGPS). Apenas intersecções de estradas e ilhas que podiam ser facilmente identificadas, tanto nas imagens quanto nos mapas, é que foram digitalizados como pontos de controle terrestre. O erro médio da raiz quadrada (RMS) para a imagem foi de  $\pm 1$  *pixel* ( $\pm 30$ m) usando-se o algoritmo do vizinho mais próximo.

Os principais processamentos digitais aqui utilizados foram: i) Composições Coloridas em RGB; ii) Razão de Bandas; iii) Métodos de índices (NDVI e NDWI) e iv) Análise por Principais Componentes (PC's), entre outros, utilizando *software ER-Mapper v.6.0* (*Earth Resource Mapping Pty Ltd.*) disponível no Laboratório de Geoprocessamento do Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

#### 2.5.4. CONFECÇÃO DA CARTA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL

##### **2.5.4.1. Separação dos Segmentos Sensíveis ao Derramamento de Óleo através do Uso do Sensoriamento Remoto e SIG.**

A sensibilidade ambiental da linha de costa foi classificada de acordo com o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL) baseado nas Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derrames de Óleo (Cartas SAO) elaboradas para o sistema Petrobrás (Araújo et al. 2000) com base na classificação da sensibilidade ambiental da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA 1997) e posteriormente, em sua maior parte, adotada pelo MMA (2002).

##### **2.5.4.2. Processamento dos Dados Hidrodinâmicos Necessários para Elaboração das Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamentos de Óleo**

Os segmentos identificados foram classificados quanto ao grau de exposição à energia de ondas e marés, à inclinação e à largura do estirâncio e ao tipo de substrato.

Para classificação do grau de exposição à energia de ondas e marés foi levado em consideração 3 fatores: (1) altura das ondas que podem ser baixa (< 25cm), média (entre 25cm e 1m) e alta (>1m); (2) o sentido da corrente que determina o sentido da migração do fluxo de óleo e (3) as correntes criadas junto à costa.

A importância principal do tipo de inclinação é o seu efeito na reflexão e quebra das ondas. Litorais muito inclinados proporcionam a reflexão e conseqüentemente quebra das ondas, apresentam um tempo mínimo de permanência do óleo, com rápida limpeza da área poluída. Portanto, quanto mais inclinado o litoral, menor é a sensibilidade ambiental. A declividade pode ser baixa (< 5graus), média (entre 5 e 30 graus), e alta (>30 graus) e a largura do estirâncio pode ser larga ou estreita.

Quanto ao tipo de substrato, estes são classificados em permeável, semi-permeável ou impermeável; a mobilidade do sedimento em baixa, alta ou fixa; além destes foram levados também em consideração a permanência do óleo, além da trafegabilidade de veículos (muito baixa, baixa, alta ou intrafegável).

#### **2.5.4.3. Armazenamento dos Dados em um Banco de Dados Geográficos (BDG)**

Os dados coletados em campo como de geomorfologia costeira, oceanográficos, sócio-econômicos e fotografias aéreas oblíquas de pequeno formato foram inseridos no *Tecgraf-Petrobras v. 2.06*, que é um Banco de Dados Geográficos criado pela TECGRAPH/PUC/RJ, utilizando rotinas já estabelecidas e compatíveis com as planilhas de levantamento de informações de campo e de resposta a derrames, bem como no banco de dados do Projeto PETRORISCO (REDE 05-PETROMAR-FINEP/CNPq/CTPETRO).

#### **2.5.5. INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS**

Após o processamento, os dados foram integrados para análise e interpretações que resultaram nesta dissertação de mestrado e publicações em eventos científicos. Estes resultados serão ainda submetidos à comunidade científica através de publicações em periódicos indexados, nacionais e internacionais.

**CAPÍTULO 3:**  
**CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO**  
**POTENGI**



### 3.1. DEFINIÇÃO

Os sistemas estuarinos vêm sendo amplamente estudados em todo o mundo, à medida em que os estudos acerca de estuários se aprofundam, a sua definição e critérios de classificação são modificados, tornando-se mais complexos. Em geral, os estuários são classificados de acordo com as características tais como salinidade, processos físicos atuantes (ondas e/ou marés), modo de formação da bacia, padrão de circulação estuarina ou mecanismos físicos deposicionais dominante.

Um das definições mais conhecidas deve-se a Pritchard (1967) que considera o grau mensurável de salinidade da água como critério para delimitar superiormente o estuário: “corpo de água, costeiro, semi-fechado, de comunicação livre com mar aberto, no qual a água marinha se dilui com água doce proveniente da drenagem continental”.

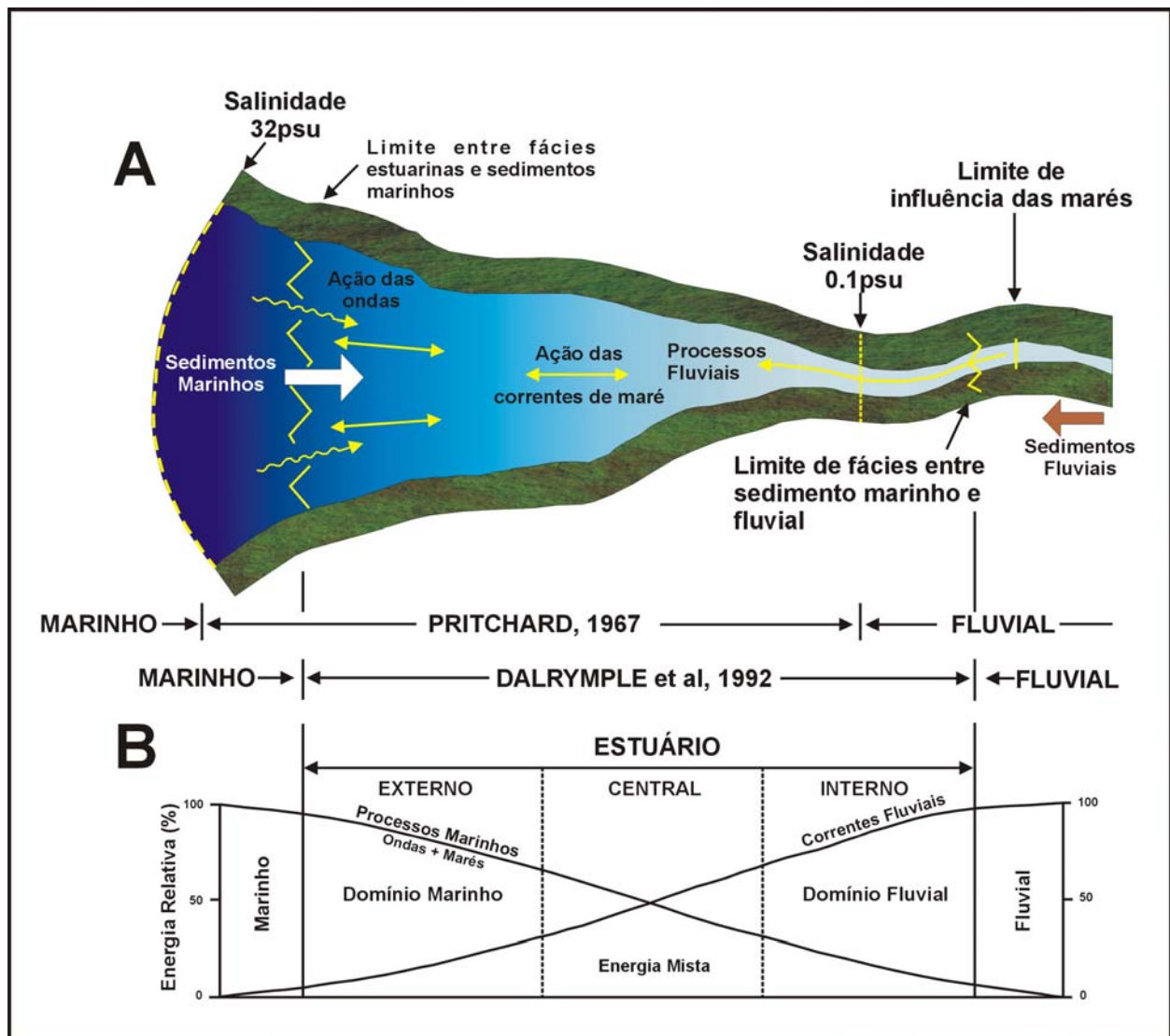
Considerando-se o modelo de Pritchard (1967) irrealista, uma vez que a influência da maré estende-se para montante do limite da intrusão salina, Fairbridge (1980) apresenta uma definição baseada essencialmente em critérios geomorfológicos: “braço de mar que ocupa um vale fluvial até ao limite superior da ação da maré”. Este autor divide o estuário em três setores: zona marítima ou estuário inferior, em ligação direta com o mar aberto; estuário médio, onde há mistura de água doce com água salgada; estuário superior ou fluvial, caracterizado pela existência de água doce, mas ainda sujeito à ação da maré.

A posição e extensão dos diferentes setores considerados num estuário, assim como os limites montante e jusante, são dependentes da descarga fluvial e da influência da maré, podendo a variação sazonal ser considerável. Assim, nem sempre os critérios morfológicos são suficientes para caracterizar um estuário, sendo importante recorrer a outros aspectos. De acordo com Day *et al.* (1989, *apud* Heip 1991), que define o limite jusante segundo critérios sedimentológicos estendendo o sistema estuarino ao ambiente marinho costeiro, a zona marítima do estuário é definida como uma área de turbidez costeira, que se estende até ao limite da pluma túrbida, em período de maré vazante.

O movimento sedimentar, proveniente da zona externa da embocadura do estuário em direção a montante, é para alguns autores um dos aspectos mais importantes para separar o sistema estuarino do sistema deltaico.

Dalrymple *et al.* (1992) admitem que para a correta definição do sistema estuarino torna-se necessário considerar não apenas fatores restritos como a salinidade ou a

influência da maré, visto que este sistema é uma zona de interação entre correntes fluviais, marés e ondas. Assim sendo, os referidos autores advogam que a definição mais completa para estuário seria: "a parte externa de um sistema de vales afogados que recebe sedimentos fluviais e marinhos, contendo fácies influenciadas por processos de marés, ondas e rio. Sua extensão é considerada a partir do limite flúvio-estuarino em direção ao continente, com fácies influenciadas por maré, até o limite estuarino-marinho em direção ao mar com fácies costeiras na foz". A partir desse pressuposto, Dalrymple *et al.* (1992) consideram que o estuário ocuparia uma área desde a desembocadura do rio, com salinidade variando entre 30-35psu, até a parte interna (rio acima) onde a salinidade da água atingisse cerca de 0.1psu (Figura 3.1).



**Figura 3.1** - (A) Representação esquemática das definições de estuário de acordo com Pritchard (1967) e Dalrymple *et al.* (1992). O limite do estuário é marcado pela salinidade 0.1psu em direção ao continente e 32psu em direção ao mar, mas o limite das fácies em direção ao continente e ao mar são mais interiores. (B) Distribuição esquemática dos processos atuantes em estuários, resultando na zonação de fácies ternária.

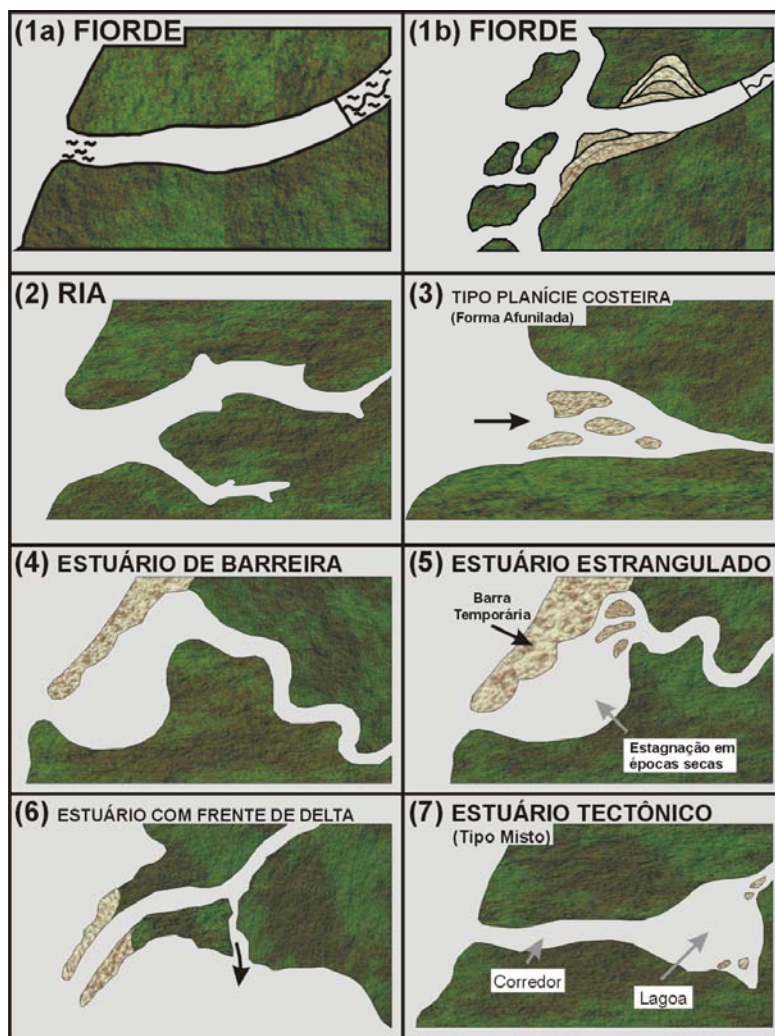
### 3.2. CLASSIFICAÇÃO

A variedade de condições hidrográficas, topográficas e climáticas dos estuários é tão diversificada, apresentando situações muitas vezes conflitantes, que impossibilitavam generalizações oceanográficas e até cinquenta anos atrás os estudos desses ambientes eram tratados puramente como fenômenos locais.

Ao longo dos últimos anos, surgiram várias propostas de classificação de estuário, porém as mais difundidas na literatura internacional e que, também, podem ser aplicadas para a interpretação de seqüências estuarinas antigas, tomam como base a interação entre o prisma de maré e a descarga de água fluvial. Esta responsável pela geração dos diferentes tipos de circulação, processos de mistura, morfologia e sedimentação, características para cada tipo de estuário.

O estuário Potengi pode ser classificado quanto ao modo de formação de bacia (Fairbridge 1980) como do tipo planície costeira (Figura 3.2). Estes estuários são típicos de regiões de planície costeira e se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno, que inundou os vales dos rios. O processo de inundação foi muito mais acentuado do que o de sedimentação e a topografia atual tornou-se muito semelhante ao vale do rio. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30m de profundidade. A área da seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial, e a configuração geométrica da seção transversal tem a forma de V. A razão largura / profundidade, em geral, é grande, embora ela esteja na dependência do tipo de rocha em que o vale do rio foi escavado. Devido ao processo recente de sedimentação, o fundo é preenchido com lama e sedimentos finos na sua parte superior, que se tornam mais grossos em direção à foz.

Quanto aos processos físicos dominantes de acordo com a classificação de Dalrymple *et al.* (1992) e de Reinson (1992), o estuário Potengi é considerado como um estuário dominado por marés ou de maré, respectivamente (Figuras 3.1b e 3.3). Apesar da amplitude de maré em torno de 2.8m ser considerada como mesomaré elevada por Davies (1964), revista posteriormente por Hayes (1979), observa-se que as correntes de maré exercem um papel fundamental neste setor da costa potiguar, justificando-se portanto a utilização do termo estuário de maré.



**Figura 3.2** - Tipos fisiográficos estuarinos (modificado de Fairbridge 1980).

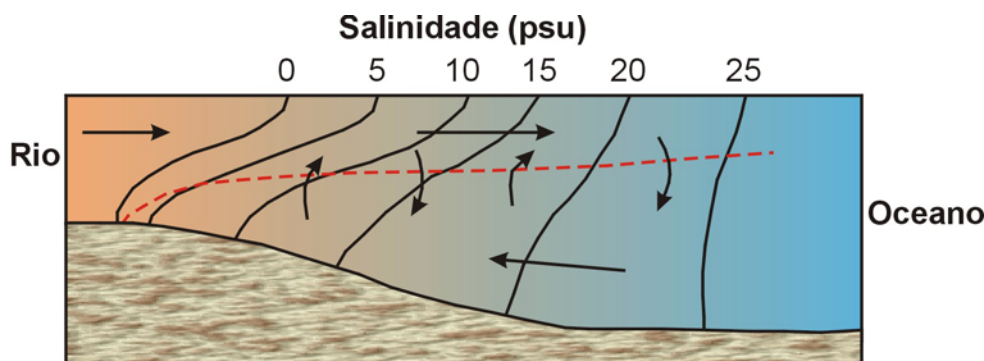
	Dominado por onda			Dominado por maré
	LAGUNAR	PARCIALMENTE FECHADO	DE FOZ ABERTA	DE MARÉ
CONFIGURAÇÃO MORFOLÓGICA	PARALELO À LINHA DE COSTA 	PARALELO OU NORMAL À LINHA DE COSTA 	NORMAL À LINHA DE COSTA 	NORMAL À LINHA DE COSTA 
FAIXA DE MARÉ	MICROMARÉ	MICRO A MESOMARÉ	MESOMARÉ A MACROMARÉ	MACROMARÉ (EXTREMAS FAIXAS DE MARÉ)
PADRÃO DE CIRCULAÇÃO	PARCIALMENTE MISTURADO	PARCIALMENTE MISTURADO A BEM ESTRATIFICADO		HOMOGÊNEO (VERTICAL A LATERALMENTE)
PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS		SEDIMENTOS LAMOSOS AREIA FLUVIAL AREIA LITORÂNEA 		
SEÇÃO AXIAL	N.M 			

**Figura 3.3** - Classificação dos estuários baseada em parâmetros morfológicos, sedimentológicos e oceanográficos, segundo Reinson (1992).

Com base no padrão de circulação, considerou-se o estuário Potengi com característica do Tipo B (Estuários Moderadamente ou Parcialmente Misturados), propostos por Pritchard & Carter (1971) e Dyer (1986) (Figura 3.4), apresentando uma mistura parcial entre os corpos de água salina e doce, com gradiente de salinidade do leito até a superfície da água. Esta classificação foi utilizada devido ao Potengi apresentar um regime de mesomaré característico desse tipo de estuário, onde segundo Pritchard (1989), ocorre a mistura parcial entre os corpos de água salina e doce, através do efeito de turbulência de maré, destruindo a interface da cunha salina, produzindo um gradiente de salinidade que se faz do leito do rio para a superfície da água, por mecanismos de advecção e difusão, bem como com base nos parâmetros oceanográficos físicos como salinidade e densidade que foram calculados quantitativamente pela equação razão de fluxo (R/P).

A energia da maré envolvida nesse processo deve ser suficientemente grande para realizar trabalho tanto contra o atrito nos limites geométricos do estuário, quanto contra a ação estabilizadora do empuxo, produzindo turbulência interna. Os vórtices turbulentos gerados terão a sua energia dissipada realizando trabalho contra as forças estabilizadoras de empuxo, ocasionando a erosão dos gradientes verticais de salinidade por meio da mistura entre a água doce e a água do mar. Em consequência, a energia potencial da coluna de água aumenta devido ao aumento da salinidade (densidade) da camada superficial. Para que a camada acima da haloclina transporte um volume de água igual ao descarregado pelo rio, ele deve aumentar consideravelmente. Simultaneamente, o transporte de água do mar estuário acima nas camadas mais profundas também aumenta, desenvolvendo-se um movimento em duas camadas e de sentidos opostos (Figura 3.4).

Desta forma, como o movimento das marés é importante dentro do estuário, os fenômenos de turbulência provocam mistura de água na vertical (Figura 3.4). Este fenômeno favorece a diluição das águas junto ao fundo e cria um gradiente de salinidade para montante. A interface entre os escoamentos de sentidos opostos torna-se progressivamente mais profunda até ao ponto onde o escoamento de fundo se anula. Para montante deste ponto o escoamento faz-se na totalidade em direção à foz do estuário, embora possa apresentar oscilações devido à ação da maré. Em altura de cheias, este tipo de estuários apresentará propriedades da estrutura de cunha salina, dependendo da importância da descarga fluvial em relação à maré.



**Figura 3.4** - Circulação e distribuição de salinidade média num estuário parcialmente misturado (Modificado de Dyer 1986).

Os movimentos bidirecionais que ocorrem na coluna de água são bem menos intensos do que os movimentos oscilatórios das correntes de maré. Como os movimentos estão superpostos, os primeiros somente podem ser obtidos por meio de média temporais durante intervalos de um ou mais ciclos completos de maré.

A distribuição vertical das isohalinas ao longo do estuário mostra perfis semelhantes, mas os gradientes verticais na haloclina intensificam-se estuário abaixo (Figura 3.4). A geometria do fundo submarino e a ocorrência de movimentos transversais ou secundários podem alterar a configuração típica. Devido ao aumento da energia potencial da coluna de água estuário abaixo, as superfícies isobáricas inclinam-se de forma ascendente na camada superficial, e de forma oposta nas camadas de fundo, em resposta às forçantes da circulação estuarina. Os movimentos também poderão sofrer influência da força de Coriolis, principalmente nos sistemas bastante largos e em regiões onde o componente predominante da maré é diurno.

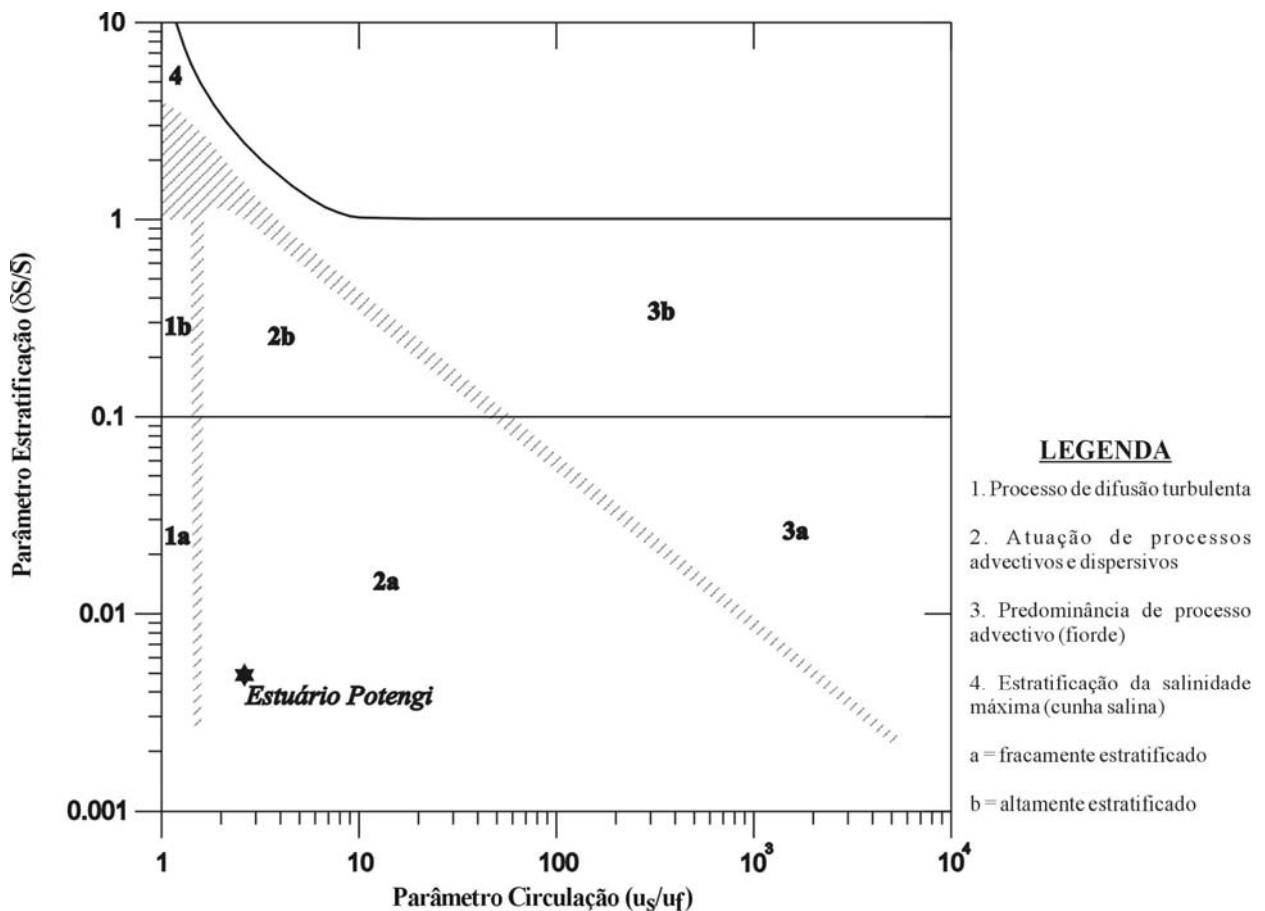
O método mais confiável e preciso de classificação do estuário Potengi, foi o diagrama cartesiano ortogonal, denominado Diagrama Estratificação-circulação, deduzido por Hansen & Rattray (1966) e considerado por vários autores (Dyer (1973, 1986, 1997); Officer (1976); Pritchard (1989); dentre outros) como o melhor método para a classificação dos estuários. Seus fundamentos teóricos foram confirmados com a introdução de parâmetros alternativos por Fischer (1972); Prandle (1985) e Scott (1993).

Os eixos coordenados desse diagrama são dois números ou parâmetros adimensionais: o parâmetro estratificação ( $\delta S/\bar{S}$ ), onde  $\delta S = S_f - S_s$  é a diferença entre os valores estacionários das salinidades de fundo ( $S_f$ ) e de superfície ( $S_s$ ) e  $S$  é o valor estacionário da salinidade média na coluna de água, e o parâmetro circulação

determinado pela razão  $u_s/u_f$ , onde  $u_s$  é o valor da corrente residual na superfície. Quando a descarga fluvial não é adequadamente conhecida, em vez de  $(u_f)$  utiliza-se o valor médio (no espaço e no tempo) da salinidade na coluna de água  $\langle \bar{u} \rangle$ , definida formalmente por  $[\langle u \rangle = (1/h) \int (1/\Delta t) \int (u dt) dz]$ , com  $\Delta t$  igual a um ou mais períodos de maré.

Para aplicação do Diagrama Estratificação-circulação no estuário Potengi (Figura 3.5), considerou-se uma homogeneidade lateral ao longo do canal estuarino. Sendo assim, as quantidades  $S_f$ ,  $S_s$ ,  $\bar{S}$ ,  $u_s$  e  $u_f$  (ou  $\bar{u}$ ) que definem os parâmetros estratificação e circulação foram independentes do tempo e calculados como valores médios durante intervalo de tempo de 2 ciclos completos de maré.

Observa-se que a classificação do canal estuarino do rio Potengi neste diagrama (Figura 3.5) é do tipo 2 (parcialmente misturado), enquadrando-se no diagrama como do Tipo 2a (moderadamente estratificado) durante a fase de sizígia, com o balanço de sal dominado pelos processos advectivo e dispersivo.



**Figura 3.5** - Diagrama Estratificação-circulação proposto por Hansen & Rattray (1966) classificando quantitativamente o estuário Potengi, durante a fase de maré de sizígia, em que a estratificação é representada pela média da estratificação vertical da coluna d'água, em que o valor de 0.1 indica a transição entre **a** e **b**, adotado por conveniência.



Considerando-se os estuários como entidades complexas, dependentes de grande número de parâmetros, variáveis em diferentes escalas temporais, torna-se por vezes difícil a classificação segundo determinado critério, principalmente se o objetivo final for a comparação com outros sistemas. O estuário do rio Potengi, por exemplo, apresenta particularidades morfológicas que controlam certos parâmetros hidrodinâmicos. Assim, ao aplicar-se determinado critério classificativo este dificilmente traduzirá a totalidade do estuário.

## **CAPÍTULO 4:**

### **ANÁLISE HIDRODINÂMICA E FÍSICA DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREA ADJACENTE**

#### **4.1. ESTUDO DAS ONDAS E DO REGIME DE VENTOS**

Durante os períodos de trabalhos de campo e análises das fotografias aéreas, conjuntamente com as imagens dos sensores ETM+ do Landsat 7 (órbita/ponto 214-064 de 04 de agosto de 2001), observou-se que as ondas aproximam-se das porções mais internas da costa do Rio Grande do Norte entre a praia de Ponta Negra e foz do rio Ceará-Mirim com a mesma direção predominante dos ventos alísios (SE) (Figura 4.1).

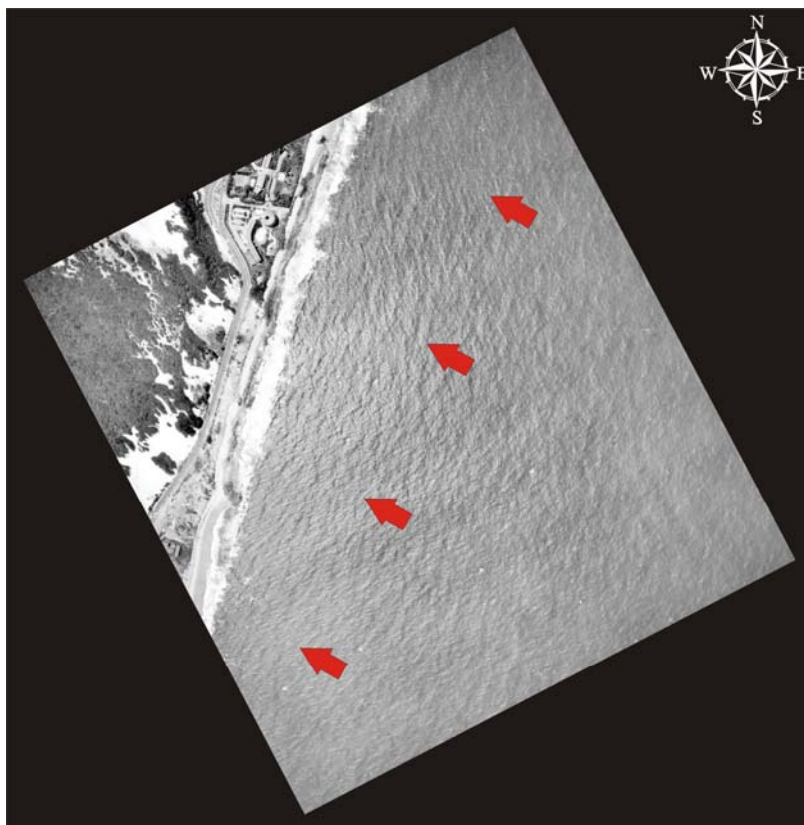
Nas baixas latitudes, devido à grande insolação existente, fazem com que as temperaturas sejam maiores e conseqüentemente com pressão menor em função da ascendência vertical do ar atmosférico dilatado. Nesta região, as massas de ar em movimento (ventos) são sempre dirigidos das regiões de pressão alta para as de baixa pressão, sofrendo desvios do paralelismo do eixo norte-sul, em direção noroeste ou sudeste (latitude sul e norte, respectivamente), devido ao movimento de rotação da terra.

Nas regiões tropicais e equatoriais do Brasil, os ventos mais freqüentes são os provenientes do quadrante Este, oriundos do anti-ciclone semi-permanente do Atlântico Sul. Foram, desta forma, coerentes com os dados obtidos da Estação Climatológica da UFRN - Natal, que apresentaram ventos predominantes do quadrante Este, com freqüência Este-Sudeste, com velocidades médias mensais sempre em torno de 4 e 4.5 m/s.

Apesar da forte imposição das correntes de marés, as ondas geradas através de ventos representam um importante agente na dinâmica do estuário Potengi, propiciando a mistura das águas e a ressuspensão constante dos sedimentos de fundo e das margens provocando, por vezes, processos erosivos nas mesmas.

Os ventos, ao atingirem a superfície da água no estuário do rio Potengi e áreas adjacentes, são responsáveis pela formação de ondas, com características que vão depender da velocidade, intensidade, tempo de duração e direção destes ventos em relação a geografia do estuário. São importantes ainda na formação das ondas a direção dos fluxos de marés, profundidade das águas sobre a qual o vento atua e as condições meteorológicas ocasionais e sazonais (pressão atmosférica, pluviosidade, etc.).

A partir das medições do período (T) e altura das ondas (L) ao longo da linha de costa, observou-se que as ondas na área estudada apresentam um período de 13s e alturas de até 80cm.



**Figura 4.1** - Fotografia aérea mostrando a propagação da onda em direção à costa do quadrante SE, influenciada pelos ventos alísios que apresentam a mesmo sentido.

A superfície da água no estuário Potengi e áreas oceânicas adjacentes, mesmo em condições de ventos fracos, caracteriza um sistema relativamente agitado, sobretudo pela ação das correntes de marés, com a presença freqüente de ondulações irregulares, definindo claramente um regime de fluxo turbulento.

Apesar da forte imposição das correntes de marés, as ondas geradas pelos ventos representam um importante agente na dinâmica do estuário Potengi, o qual propicia a mistura das águas e a ressuspensão praticamente constante dos sedimentos de fundo nos bancos e margens. Além disso, estas ondas atuam na interação entre o sistema hidrodinâmico e as margens, promovendo ataques erosivos e mesmo criando situações de sedimentação em locais específicos.

#### **4.2. AS MARÉS NO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREAS ADJACENTES**

As marés que ocorrem no estuário Potengi e áreas adjacentes são de natureza semi-diurna (apresentam duas marés altas e duas marés baixas durante um dia lunar, com período de maré de 12 hs e 25 min), com amplitude máxima em torno de 2.83m, amplitude média de 1.32m no período de sizígia e 1.33m no período de quadratura

(Anexo 02), caracterizando um regime de mesomaré segundo a classificação de Davis (1977).

A figura 4.2 mostra comparações entre os níveis de maré simulados pelo *software* PACMARE e os níveis medidos na estação maregráfica instalada no Trapiche da Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte. Verificou-se que tanto as marés simuladas durante o período de sizígia como de quadratura apresentaram um bom nível de concordância entre os resultados do modelo hidrodinâmico e as marés medidas, apresentando no máximo uma pequena diferença na amplitude de maré de 25cm.

Na área estudada, as correntes de maré (Figura 4.3) predominam na circulação do estuário Potengi e na plataforma continental, até junto ao litoral. Existindo também o predomínio de correntes de maré reversas, as quais agem perpendiculares à costa, com velocidades máximas superiores em média a 1.8 nós nas estações situadas na foz do rio Potengi. Para o N, predominam as correntes residuais ou permanentes, as quais são formadas principalmente pelas correntes de deriva litorânea.

As correntes induzidas pelo fluxo do rio Potengi são restritas à região estuarina e vários fatores climáticos afetam a quantidade e a sazonalidade da descarga. As correntes induzidas pelos ventos alísios na direção SE e E transportam grandes quantidades de sedimentos pelíticos a arenosos da plataforma continental interna, em direção à costa e são responsáveis pela orientação das ondas, que atingem a linha de costa com um ângulo de 45°, estabelecendo um fluxo paralelo à linha de costa, gerando as correntes de deriva litorânea “*longshore currents*” que transportam sedimentos no sentido S-N.

#### 4.2.1. A MARÉ DINÂMICA

##### 4.2.1.1. Aspectos Gerais

A maré dinâmica pode ser definida como a variação periódica do nível da água do mar, quase sempre acompanhada por correntes horizontais, resultado da influência de forças astronômicas. A atração exercida principalmente pela Lua e pelo Sol, sobre a massa d'água Oceânica propicia o surgimento das marés (Franco 1981). As maiores marés mensais coincidem normalmente com os períodos de Lua Cheia e Lua Nova (marés de sizígia), enquanto que aquelas de menor amplitude acompanham as posições de Quarto Minguante e Crescente (maré de quadratura).

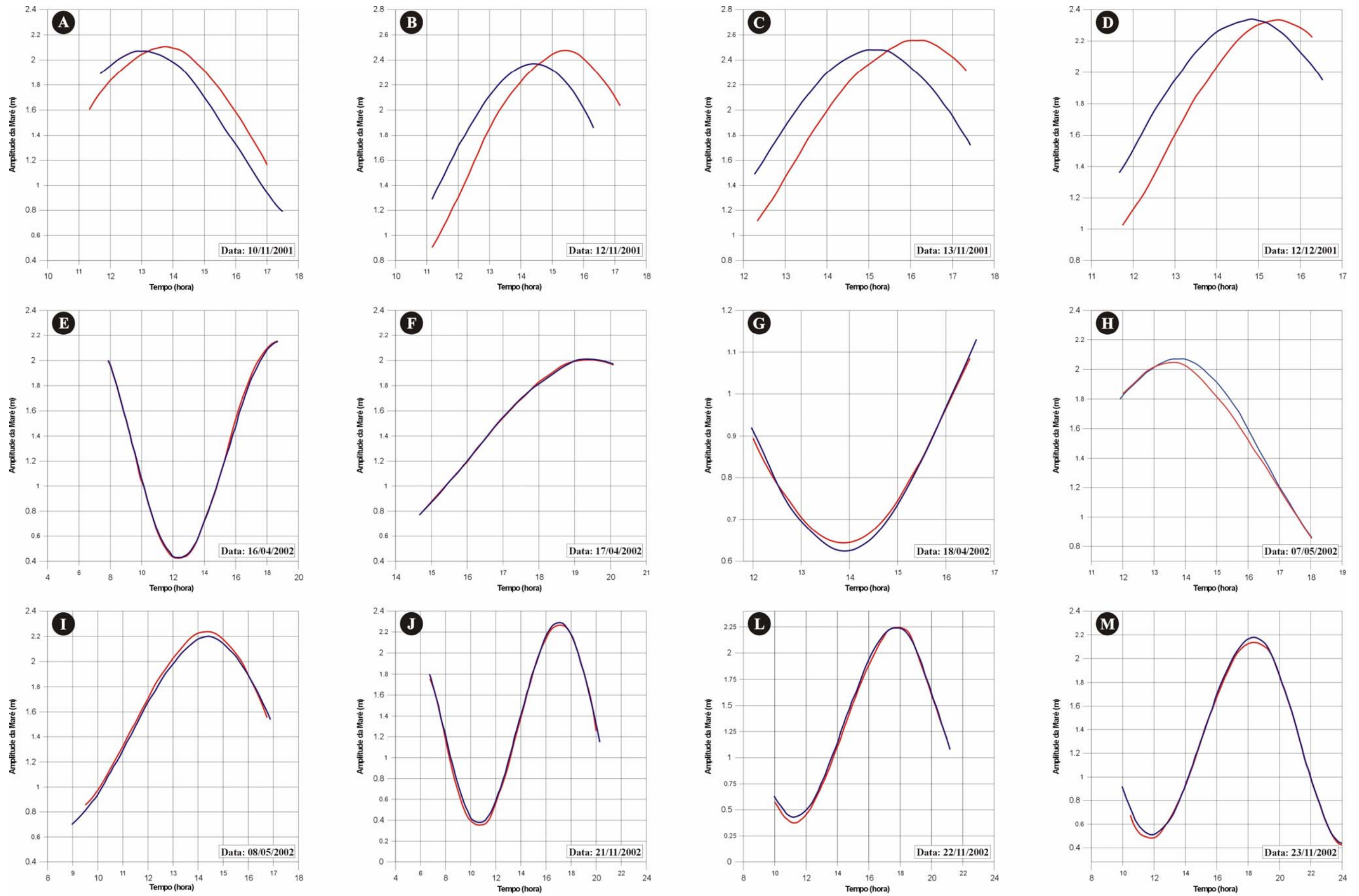
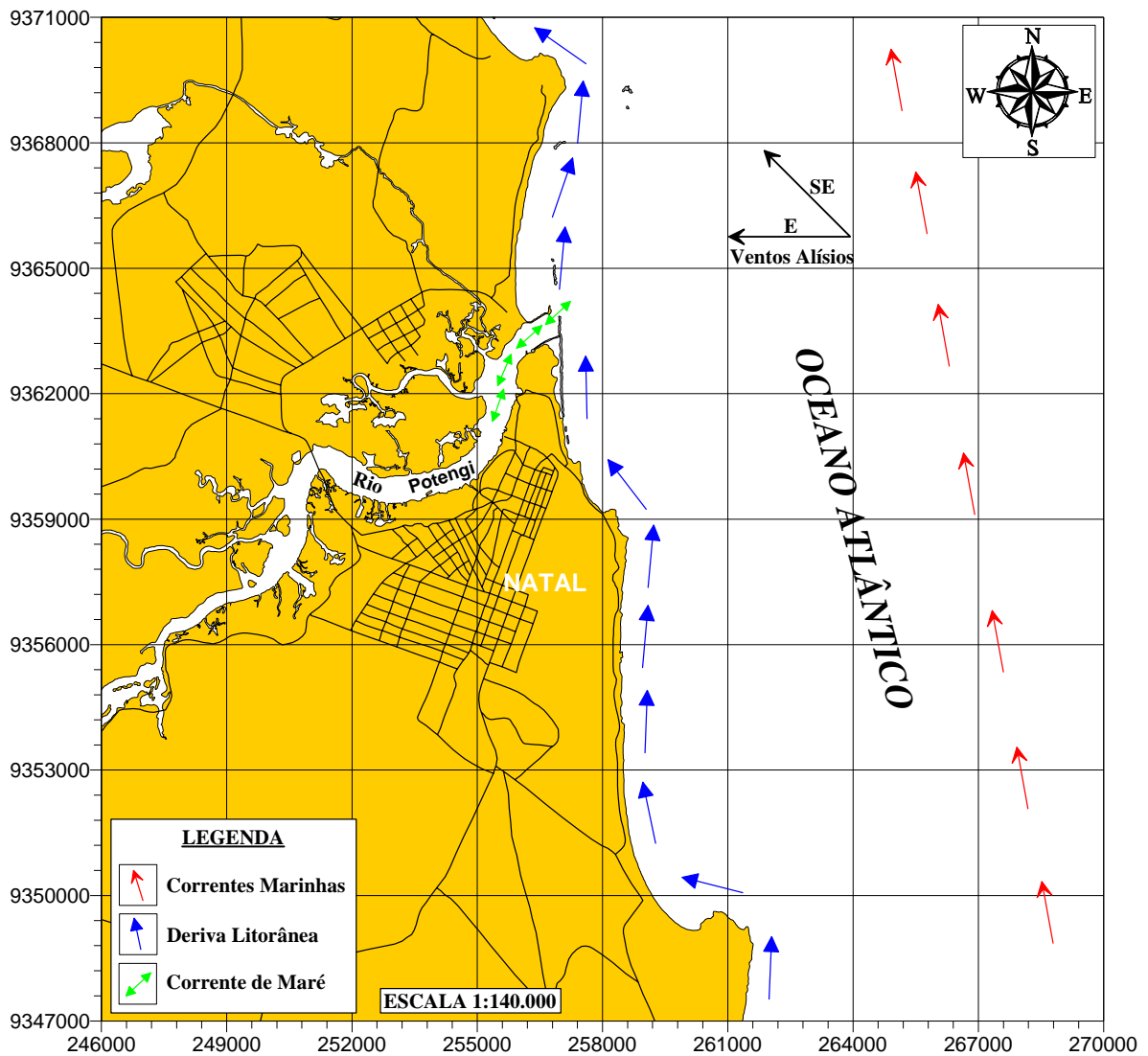


Figura 4.2 - Comparação de níveis de maré medidos e simulados com o software PACMARE, no ano de 2001 e 2002, para as datas correspondentes.



**Figura 4.3** - Mapa com as principais direções dos ventos alísios, correntes de maré, deriva litorânea e as correntes marinhas.

#### 4.2.1.2. Características das Marés Dinâmicas no Estuário

Os principais parâmetros das marés dinâmicas no estuário Potengi encontram-se reunidos no anexo 02 elaborado a partir das leituras de maré realizadas na estação maregráfica instalada na Capitania dos Portos do Rio Grande do Norte (Figura 2.10), conjuntamente com os dados de amplitudes de marés diárias referentes a 1 (ano) e 8 (meses) de medições, que foram simuladas mediante o *software* PACMARE, com base na análise das correntes de maré para o Porto de Natal.

Durante os anos de 2001 e 2002, as amplitudes médias das oscilações nas marés de sizígia e quadratura no Porto de Natal foram de 1.32m e 1.33m, respectivamente, o que resulta num valor médio de 1.325m de amplitude.



Para o ano de 2001, a amplitude máxima registrada foi de 2.77m, no dia 09/03/2001, enquanto que a mínima foi de -0.1m, no dia 08/02/2001, ambos em condições de maré de sizígia.

Ao longo do ano de 2002 a amplitude máxima registrada foi de 2.83m, no dia 28/03/2002, enquanto que a mínima foi de -0.1m, no dia 27/02/2002, ambos em condições de maré de sizígia. Em outros períodos, excepcionalmente, as marés no Porto de Natal podem apresentar amplitudes acima destas medidas, tal como ocorreu em 1979, quando alcançou 2.92m no dia 27/02/1979 (Cunha 1982).

Comparando-se a amplitude média das marés para os anos de 2001 e 2002 observa-se que permaneceu a mesma em torno de 1.325m e os meses que tiveram as amplitudes máximas e mínimas foram março e fevereiro, respectivamente.

Estes valores de análise da corrente de maré simulados pelo *software* PACMARE para os anos de 2001 e 2002, foram referidos ao nível médio de 133.01cm, referente a carta náutica nº 802 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (D.H.N) para o Porto de Natal.

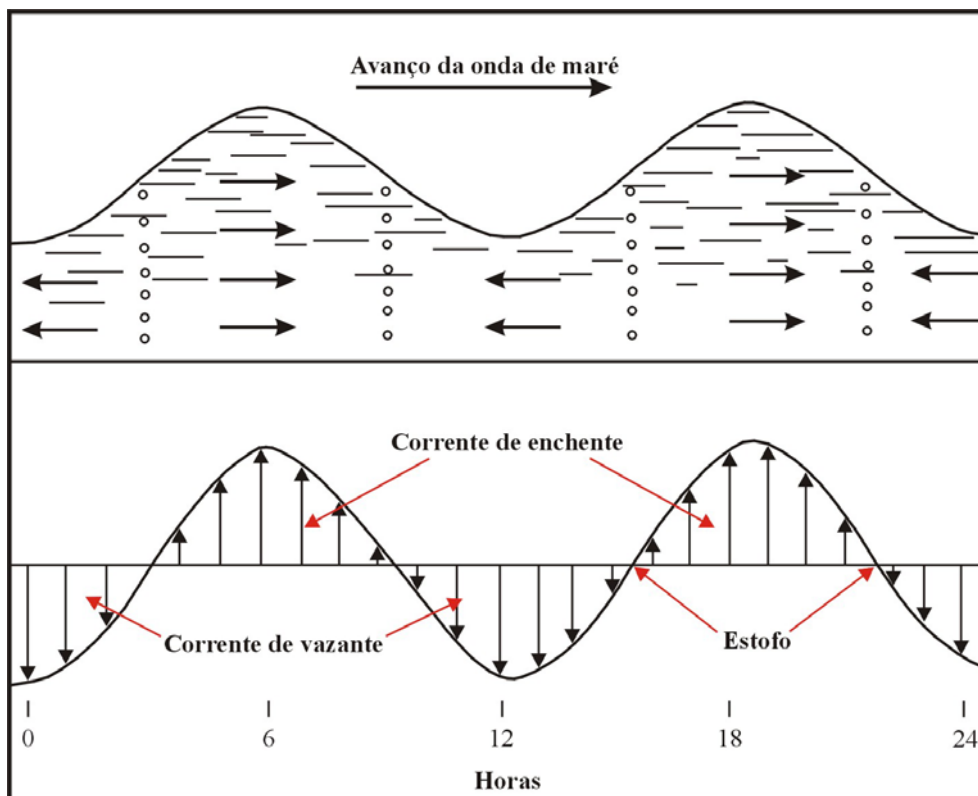
Baseado na resistência das correntes de marés, os sistemas de marés podem ser classificados em dois tipos: (1) Simétrico, que apresentam mais ou menos correntes de marés de mesma intensidade; e (2) Assimétrico, que demonstra uma predominância de uma das correntes de marés, isto é, distingue-se uma corrente de maré dominante e outra subordinada. O período entre as duas marés dominantes é semi-diurno. A maioria dos sistemas de marés apresentam um padrão assimétrico, onde o padrão dominante produz formas de fundo de grande escala e estáveis (como *dunas* grandes a muito grandes), com forte assimetria.

No estuário Potengi, onde o atrito de fundo produz uma acentuada assimetria nas curvas de marés, a subida do nível d'água leva cerca de 7 horas em contraste com a descida que dura em média 6 horas, notadamente nas marés de sizígia, fato este comum em estuários de águas rasas como no caso estudado. Outro aspecto a ser mencionado, é o registro de oscilações de baixo período (Franco 1981), da ordem de 45 minutos, associado às estofas de baixa-mar, que comumente aparecem nos maregramas dos períodos de 10 a 13 de novembro de 2001, 16 a 18 de abril de 2002, 07 e 08 de maio de 2002 e de 21 a 23 de novembro de 2002. Tais oscilações podem ser explicadas por diferenças de pressão nas extremidades da bacia estuarina (Franco 1981).

### 4.2.1.3. Estudo das Correntes de Maré

Correntes de marés são movimentos de água horizontais associados com a subida e descida da superfície do mar. As marés consistem de ondas progressivas simples, que devem ser consideradas ondas de águas rasas, devido ao seu grande comprimento de onda. No caso das marés, a crista da onda é a maré alta e a calha é a maré baixa. O movimento orbital das partículas causado pelas marés é elíptico, formando círculos fortemente aplainados com seus longos eixos paralelos ao fundo oceânico. Isto é, a movimentação da água associada à maré consiste de uma movimentação horizontal, com pequena movimentação vertical envolvida (Gross 1987).

A corrente de maré reversa é comum apenas em áreas interiores. Assim, as correntes de marés podem ser comparadas com movimentos de águas associados à passagem de ondas progressivas (Figura 4.4). Assim, quando a crista da onda (fluxo de água) flui em direção à costa, se dá a corrente de enchente, e quando a calha da onda move-se em direção à costa, isto corresponde à corrente de vazante. Sempre que se dá a modificação da direção da corrente, observa-se o que se conhece pelo nome de estofo de maré “*slack water*”, onde não há corrente. Infelizmente, as ondas de maré raramente são ondas progressivas simples, havendo uma série de complicadores.



**Figura 4.4** - Relacionamento da maré com a corrente de maré em uma maré idealizada, consistindo de uma onda de maré progressiva simples (modificado de Gross 1987).

Através do estudo da hidrodinâmica do estuário Potengi, observou-se um intenso processo erosivo na sua margem esquerda próximo à praia da Redinha, associado às áreas mais profundas, provocado pelas fortes correntes de marés, e verificou-se que a vazão apresenta um comportamento homogêneo.

Estes dados foram analisados com o objetivo de fornecer subsídios para o estudo do transporte de derramamentos de manchas de óleo e de sedimentação na área do Porto. Foram obtidos durante a maré de sizígia, cabendo ressaltar, que os mesmos não foram coletados simultaneamente nas estações fixas em intervalos de 2 em 2 horas, realizados a partir de 1m da superfície da água até o fundo (Figura 4.6).

#### **4.2.1.4. Velocidade das Correntes**

A partir de dados de direção e velocidade das correntes foram elaboradas cartas de previsões das correntes de maré para o estuário Potengi, a cada 2 horas antes e depois da preamar (Figura 4.5). Ressalva-se que os valores aqui apresentados representam tão somente as correntes resultantes do efeito da maré com fluxo normal do rio, não levando em consideração as situações anormais de vento. As setas indicam as direções e os números os valores das velocidades da corrente, expressas em nós e décimos de nó, e se referem à situação de sizígia média, o que indica podermos encontrar valores ainda maiores.

As velocidades máximas registradas foram mais altas durante a maré de sizígia, na enchente, a cerca de 2 a 3m da superfície. Analisando-se os dados de corrente (Anexo 03), as águas da superfície apresentaram velocidades maiores que as águas do fundo, isto ocorre devido ao atrito causado pelas massas d'água do fundo com o leito estuarino.

Comparando-se os valores das velocidades medidas com a amplitude da maré (Anexo 03), durante a maré de sizígia, verifica-se que no estuário Potengi as velocidades em enchente são maiores do que em vazante. Os valores máximos atingidos na situação de enchente apresentada são de cerca de 2.1 nós.

Estes dados apresentados servirão posteriormente para simular acidentes com derramamentos de óleo no estuário Potengi, já que na zona do Porto de Natal encontra-se um terminal petrolífero, sendo este sujeito a derrames acidentais de óleo.

#### 4.2.2. A MARÉ SALINA

A maré salina se constitui na penetração da água oceânica no estuário em direção oposta ao fluxo fluvial. A ordem de grandeza e o mecanismo dessa penetração são fatores que definem o tipo de estuário e refletem diretamente o padrão de circulação do mesmo (Schubel 1971). Normalmente é considerada mais importante que a maré dinâmica, pois é responsável pelos principais processos físicos-químicos, biológicos e oceanográficos, nos estuários.

Segundo Ottmann (1968), os principais fatores que interagem na penetração da maré salina, são as oscilações das marés, a morfologia do estuário, a vazão de água doce fluvial, a evaporação e a precipitação pluviométrica na bacia estuarina.

No estuário Potengi foi observado, a partir da medição da condutividade, que entre a Ponte do Igapó e a sua foz, as águas do estuário apresentam características predominantemente oceânicas.

#### 4.3. ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ÁGUAS DO ESTUÁRIO POTENGI E ÁREA OCEÂNICA ADJACENTE

A temperatura e a salinidade do meio marinho, exercem uma forte influência na distribuição das populações marinhas bem como no comportamento do ambiente. A detecção de processos físicos oceanográficos que atuam na área e que seriam relevantes para a produção e o aproveitamento dos recursos vivos aí existentes.

Com o objetivo de caracterizar as variações das propriedades físicas das águas do estuário Potengi, foram efetuadas medições de temperatura, salinidade e densidade. Nesta etapa, os trabalhos foram conduzidos em 6 estações fixas no canal principal de navegação, onde foram coletos e medidos os dados “*in situ*” a cada hora (Figura 4.6).

Os valores médios, mínimos e máximos à superfície dos parâmetros físicos como temperatura, salinidade e sigma-t das águas do estuário Potengi estão apresentados na tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Valores máximos, mínimos e médios de temperatura (°C), salinidade (psu) e densidade (Kg/m<sup>3</sup>) à superfície.

VALORES	TEMPERATURA °C	SALINIDADE (PSU)	DENSIDADE (Kg/m <sup>3</sup> )
MÁXIMO	28.89 °C	37.43 psu	24.18 Kg/m <sup>3</sup>
MÍNIMO	27.74 °C	32.57 psu	20.40 Kg/m <sup>3</sup>
MÉDIA	28.11 °C	36.32 psu	22.96 Kg/m <sup>3</sup>



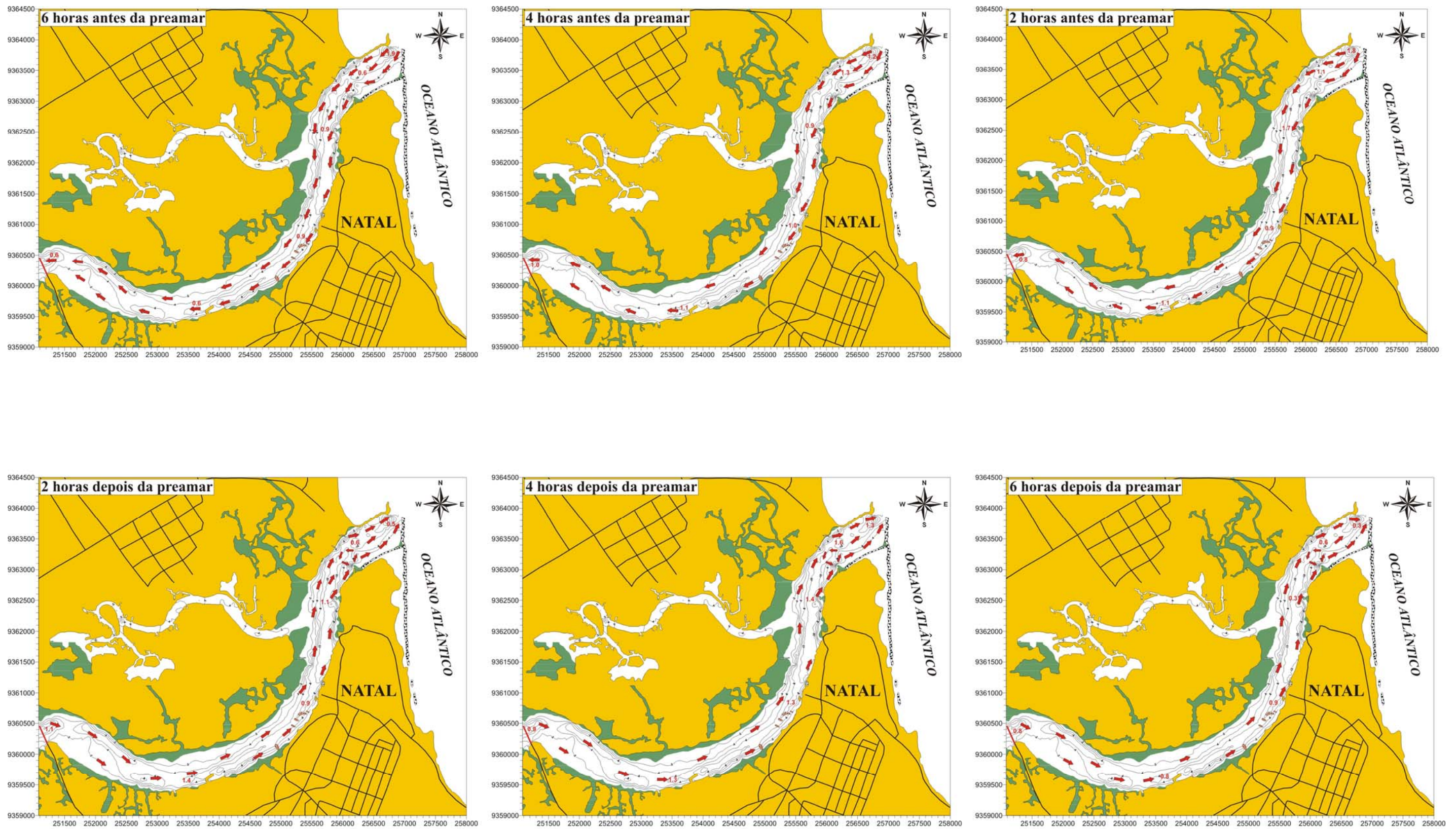
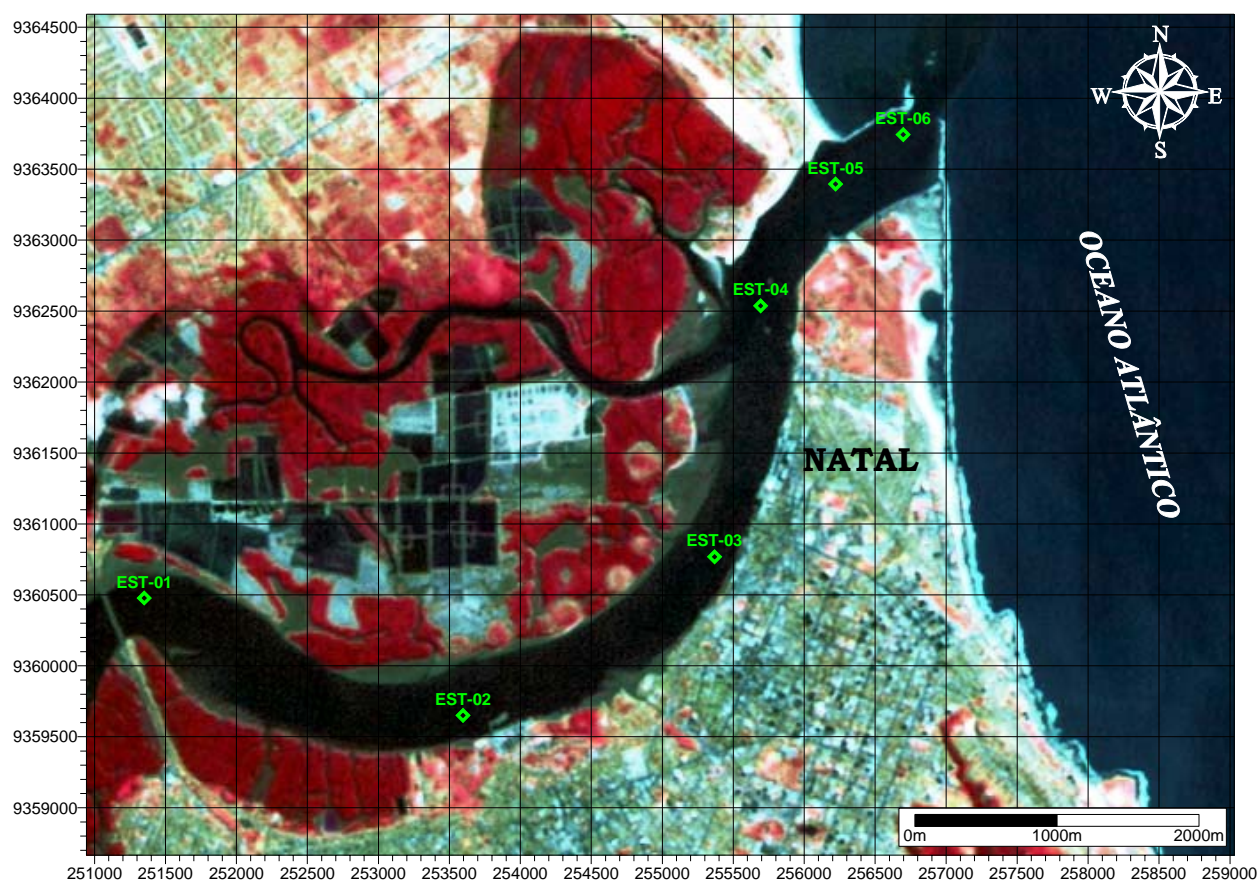


Figura 4.5 - Cartas de correntes de maré mostrando a direção e velocidade em nós no canal principal de navegação a cada 2 horas antes e depois da preamar.





**Figura 4.6** - Localização das estações fixas ao longo do canal estuarino do rio Potengi.

#### 4.3.1. TEMPERATURA DA ÁGUA

A temperatura é uma grandeza física, que caracteriza o equilíbrio térmico de um sistema, e/ou equilíbrio térmico de um sistema com outro, sendo expressa em graus Celsius (°C).

De modo geral, há uma relação indireta entre a temperatura e a densidade da água, devido à excitação dos átomos nas moléculas da água. Quando a temperatura sobe, a densidade decresce. Isto também resulta no poder crescente de evaporação quando a temperatura aumenta, já que a temperatura é uma das propriedades físicas de maior importância, pois é o principal parâmetro que determina a densidade da água.

A temperatura da água constitui um fator controlador para a vida e para os processos químicos que se realizam no ambiente aquático. É responsável, ainda, pela determinação dos padrões que controlam as taxas de metabolismo e crescimento do fitoplâncton que representa a base de toda a cadeia ecológica ligada aos estuários (Santos 1986).

A temperatura da água exerce uma influência direta sobre os processos fisiológicos dos animais, plantas, e a atividade bacteriana, além de fatores ambientais tais como: a solubilidade dos gases, viscosidade e densidade das águas. O aumento da temperatura da água do mar pode ocasionar em muitas vezes variações do nível do mar, resultando em processos erosivos. Por outro lado, a salinidade é um parâmetro hidrológico muito importante na distribuição dos organismos de uma maneira geral, tornando-se até uma barreira ecológica para os organismos considerados estenoalinos.

Associada ao vento, a temperatura atua como agente determinante dos padrões de circulação estuarina, influenciando ainda na velocidade das reações químicas, na solubilidade e disponibilidade de gases do corpo d'água. Segundo Cunha (1982), a temperatura das águas estuarinas é função das condições meteorológicas e da profundidade do estuário.

Os parâmetros de temperatura e de salinidade foram correlacionados com a análise integrada de dados oceanográficos e meteorológicos na região, os quais relevantes para a captura sustentável dos recursos vivos existentes. As estruturas térmicas e salinas são consideradas como um suporte para a vida do ambiente marinho, e Costa (1991), destaca que o conhecimento destes parâmetros são requisitos básicos para todos os modelos ecológicos.

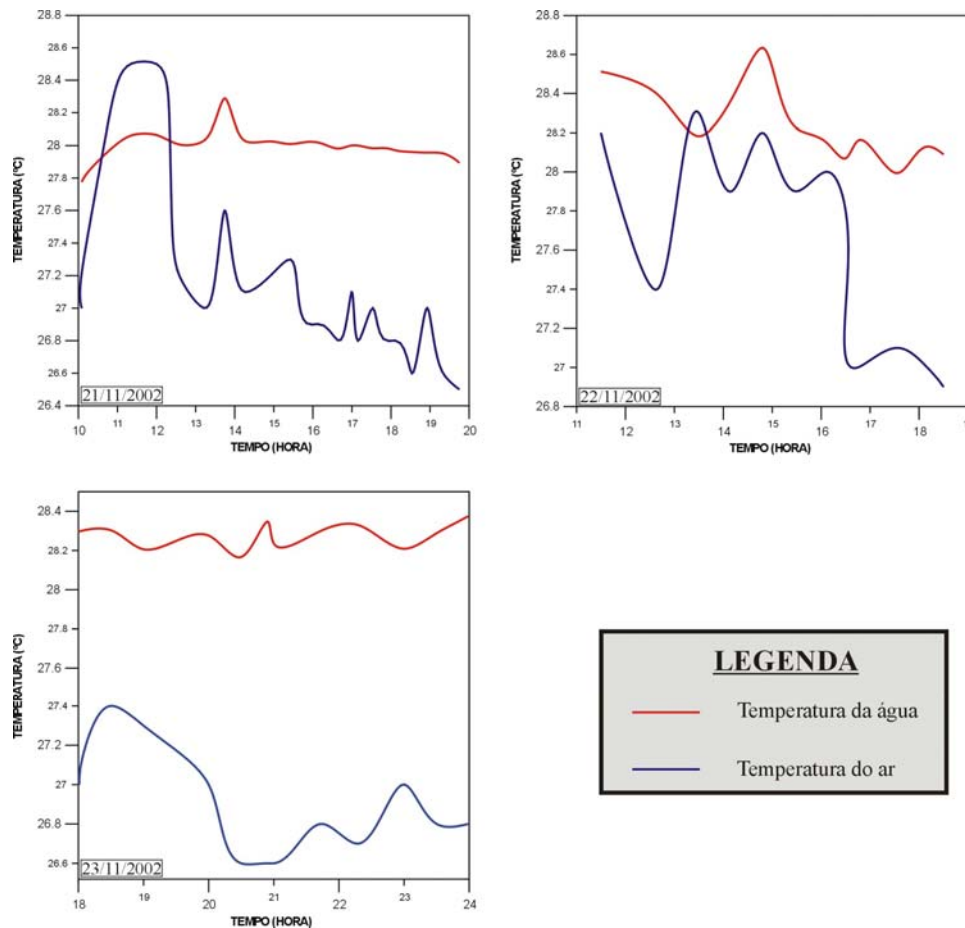
Os dados levantados neste trabalho para o estuário Potengi demonstram que a temperatura da água e suas oscilações são independentes da ação das marés (Anexo 03).

Comparando-se as curvas de variação horária da temperatura da água com as curvas de temperatura do ar para os dias correspondentes, (Figura 4.7) nota-se que estas temperaturas apresentam valores relativamente próximos, todavia com defasagens horárias. Enquanto os valores de temperatura máxima do ar situam-se em torno de 26.5-28.5°C, os valores de temperatura máxima de águas dificilmente alcançam valores acima de 28.6°C. Então, conclui-se que a temperatura superficial d'água está diretamente relacionada com a temperatura do ar, ou seja, apresenta um aumento, junto com o aumento da temperatura do ar. O calor oriundo da insolação é melhor dissipado no estuário nos momentos de baixa-mar quando a lâmina d'água é menor.

A estratificação térmica das águas do estuário se estabelece dentro de uma faixa de temperatura de no máximo 0.8°C entre a superfície e o fundo, podendo variar mais amplamente com o horário e a profundidade do local (Anexo 03), demonstrando que a



superfície da água está sujeita às variações de temperaturas diversas, em quanto o fundo mostra-se mais estável. Essa estratificação térmica se acentua principalmente no período vespertino e no início da manhã. Durante a noite a partir das 21 horas pode haver uma inversão térmica da estratificação, quando a temperatura das águas superficiais mostra-se menor que a do fundo (Anexo 03).



**Figura 4.7** - Curvas de variações da temperatura do ar para as datas correspondentes aos dias de medições de temperatura da água.

No estuário Potengi, quando a baixa-mar coincide com o horário no qual ocorrem as temperaturas máximas do ar, geralmente entre 12-15 horas, a temperatura das águas alcança seu valor máximo (Anexo 03).

A distribuição superficial e vertical da temperatura (Anexo 03 e Figura 4.8a), apresentou pequenas variações em suas condições hidrológicas, altas temperaturas e salinidade, com características típicas de regiões oceânicas de baixas latitudes, sem influência de águas fluviais, sendo estas as mesmas condições verificadas por Frazão *et al.* (2001) na Plataforma Continental do Maranhão adjacente à foz do rio Mearim.

Com relação à distribuição vertical deste parâmetro no perfil estudado (Figura 4.8a), foi observada no estuário Potengi, uma distribuição bastante uniforme, sem variações térmicas, podendo-se relacionar este fato ao processo de turbulência da água, o qual produz a distribuição do calor por toda a massa d'água.

Porém, em direção à foz foi verificada uma diminuição de temperatura em toda a coluna d'água, isto está diretamente relacionado a quantidade de material particulado em suspensão na água, já que o sedimento em suspensão contribui para o aumento da temperatura e ao gradiente do fundo estuarino do rio Potengi, onde as zonas com menor coluna de água são influenciadas pelas altas insolações diárias acarretando os altos valores de temperatura da água (Figura 4.8a).

#### 4.3.2. SALINIDADE DA ÁGUA

A propriedade mais óbvia da água do mar é seu gosto salgado ou salinidade. Isto é devido às muitas substâncias dissolvidas na solução dos oceanos, especialmente cloreto de sódio (NaCl ou o sal comum). Esses sais dissolvidos derivaram da erosão química das rochas da crosta terrestre. Sua concentração é expressa em partes por milhão (ppm), partes por mil (‰) e unidade prática de salinidade (psu). Os rios têm cerca de 0.1 (psu) de salinidade e a água do mar geralmente tem 35 (psu). Há uma grande variação do teor de salinidade da água do mar com relação às baixas salinidades na foz dos grandes rios.

As medidas realizadas no estuário Potengi, dentro dos objetivos deste trabalho, mostram que a salinidade obtida a partir da condutividade varia de acordo com a maré, onde os picos de salinidade ocorrem acompanhando as estofas de preamar (Anexo 03).

A partir da distribuição superficial e vertical da salinidade durante a maré de sizígia (Anexo 03 e Figura 4.8b), observou-se a pouca influência das águas oriundas do rio Potengi, que apresentam uma variação de 4.86 psu (mínimo de 32.57 psu e máximo de 37.43 psu) com uma média de 36.32 psu, ocorrendo um aumento em direção à foz; a distribuição da concentração deste parâmetro é controlada principalmente pela pequena descarga de água doce proveniente dos rios Potengi e Jundiaí.

A figura 4.8b mostra a distribuição vertical da salinidade apresentando-se parcialmente estratificada, observando-se somente a presença de águas oceânicas em toda a coluna d'água, o que está relacionado com a menor influência fluvial, demonstrando que na região estudada, ocorre a predominância de características oceânicas.

A salinidade é um parâmetro diretamente proporcional à velocidade do som ao longo de toda a coluna de água (Anexo 03). O conhecimento do valor médio da velocidade do som é muito importante para os levantamentos geofísicos como a batimetria e o sonar de varredura lateral, pois o conhecimento deste parâmetro ajuda a obter uma melhor precisão e qualidade no registro, já que o feixe acústico viaja ao longo da coluna d'água com uma velocidade do som conhecida. A velocidade do som média utilizada para os levantamentos geofísicos no estuário Potengi foi de 1543.18 m/s, devido às altas salinidades encontradas nas águas do rio Potengi.

#### 4.3.3. DENSIDADE

A água pura tem uma densidade de  $1.0 \text{ g/cm}^3$  a  $4^\circ\text{C}$ , a temperatura da densidade máxima. Há vários fatores que causam variação na densidade da água, como a temperatura, salinidade e pressão, que podem causar mudanças substanciais. A distribuição espacial e temporal da densidade da água é de grande importância no entendimento do ambiente oceânico. A salinidade e a temperatura permitem identificar a massa d'água (diagrama T-S), e a densidade permite definir a que profundidade essa massa d'água entra em equilíbrio.

A água da camada em que a densidade aumenta rapidamente com a profundidade é chamada de pycnoclina e é muito estável. Em outras palavras, é necessário muito mais energia para deslocá-la verticalmente, para cima ou para baixo, do que numa região, em que a densidade varia lentamente com a profundidade. Uma consequência é que a turbulência, principal responsável pelas misturas das massas de águas, é incapaz de penetrar na camada estável.

A pycnoclina, embora demasiadamente fraca para impedir a imersão de um corpo muito mais denso que a água, oferece um forte bloqueio à passagem de água ou de suas propriedades na direção vertical, tanto para cima, como para baixo.

A distribuição de densidade nos ecossistemas aquáticos, é diretamente proporcional à salinidade, e inversamente proporcional à temperatura. No estuário Potengi a densidade superficial e do fundo é diretamente proporcional ao valor de salinidade superficial e de fundo, independente da variação horária (Anexo 03).

A figura 4.8c mostra a distribuição vertical de densidade, sendo possível verificar-se que, no estuário Potengi, os altos valores de salinidade coincidiram com valores

elevados de densidade. Notando-se com isto, que a salinidade está influenciando mais fortemente a distribuição da densidade, do que a temperatura na área estudada.

#### **4.4. DIAGRAMAS DE MISTURA DO ESTUÁRIO POTENGI**

De acordo com Miranda *et al.* (2002), os *diagramas de mistura* são muito úteis para avaliar quando a concentração de um dado componente ou substância presente na massa de água estuarina admitem ou não fonte ou sumidouro no interior do estuário ou na região costeira adjacente. Esse diagrama nada mais é do que um sistema cartesiano ortogonal no qual a concentração da propriedade é correlacionada com a salinidade (concentração de sais dissolvidos), cuja fonte principal é a região costeira adjacente e tem um intervalo de variação bem definido ao longo do estuário ( $0 < S \leq S_0$ ).

O clássico Diagrama T-S introduzido na literatura oceanográfica por Björn Helland-Hansen, em trabalhos publicados nos anos de 1916 e 1918, para estudar a distribuição e mistura de massas de água oceânicas, pode ser considerado como o primeiro diagrama de mistura introduzido na pesquisa oceanográfica. Trata-se de um diagrama cartesiano ortogonal tendo por ordenada a temperatura (concentração de calor) e na abscissa a salinidade, servindo de base para o diagrama de mistura da oceanografia estuarina.

A temperatura e a salinidade das massas de água estuarinas respondem mais rapidamente aos processos de advecção e difusão turbulenta do que às trocas de calor sensível e latente, evaporação e precipitação (processos de interação ar-mar) através de sua superfície livre.

Embora as propriedades físicas da água como temperatura e salinidade, apresentem variabilidades temporais devido a outras forçantes, predominam os processos de advecção e de difusão turbulenta para alterar localmente a concentração de calor e de sal. Nessas condições, pode existir uma concentração bem definida no Diagrama T-S, desde que sejam utilizados todos os pares (S,T) amostrados na coluna de água em experimentos conduzidos durante ciclos completos e consecutivos de maré. O Diagrama T-S do conjunto de todos pares (S,T) assim amostrados é denominado Diagrama T-S espalhado, podendo ser utilizado como diagrama de mistura para identificar se a zona de maré no rio, a zona de mistura ou a região costeira adjacente apresentam fontes ou sumidouros de calor.

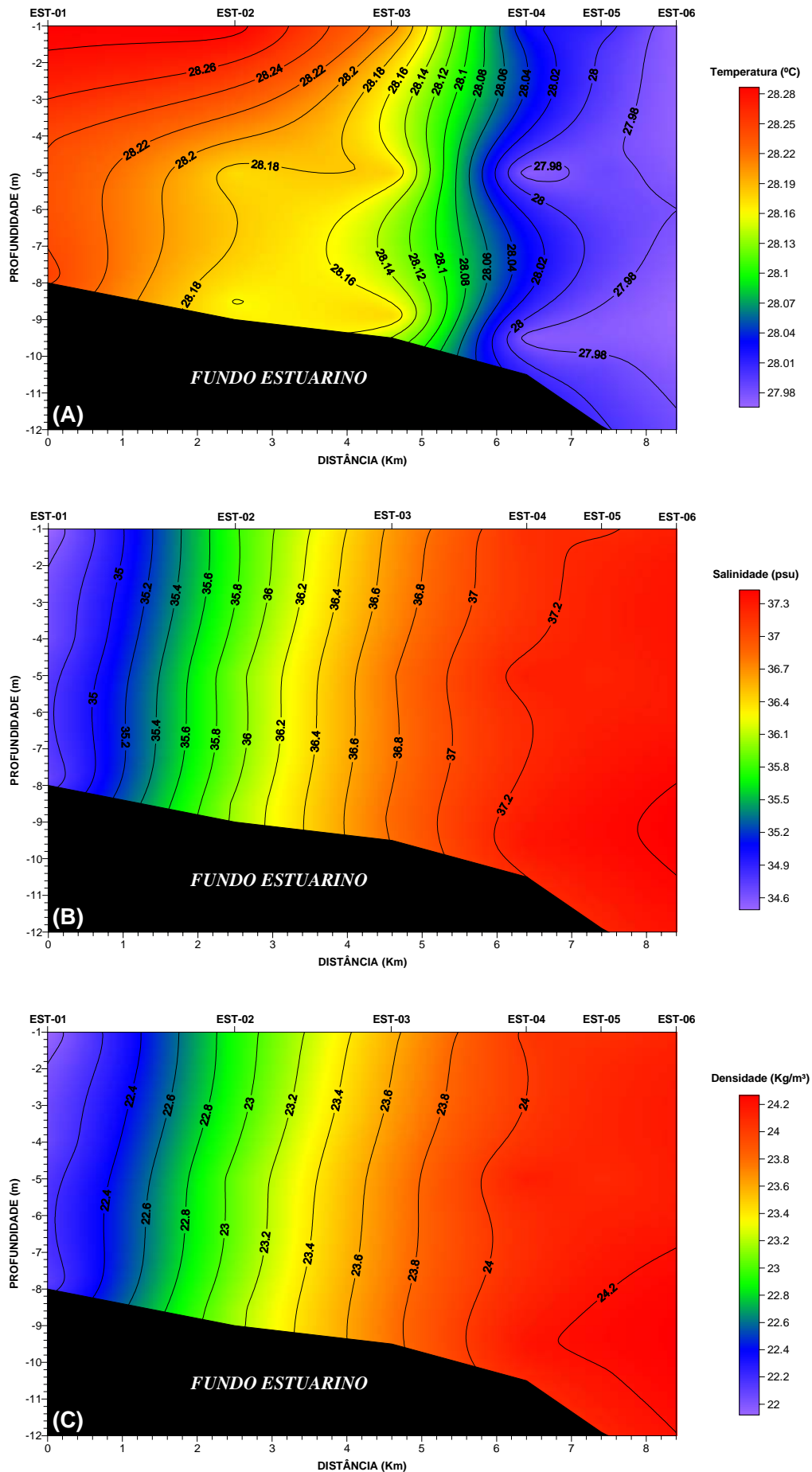
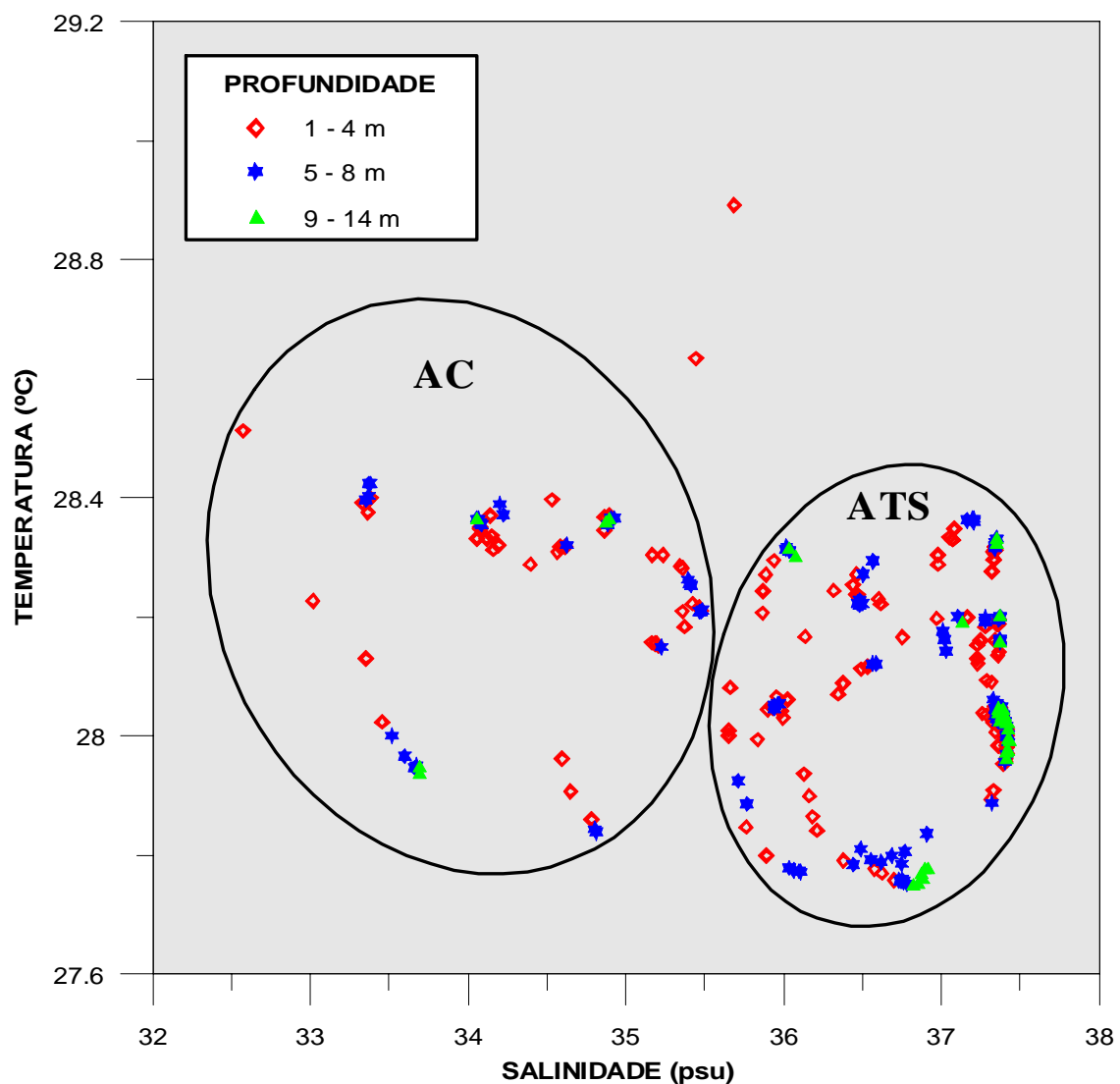


Figura 4.8 - Distribuição vertical da temperatura (A), salinidade (B) e densidade (C) no rio Potengi.

O Diagrama T-S do canal estuarino do Potengi com os dados hidrográficos amostrados durante um ciclo de 13 horas de maré de sizígia, a 8.4 Km da foz, mostra um pequeno espalhamento da massa de água estuarina.

Este diagrama (Figura 4.9), mostra a presença de dois agrupamentos que caracterizam a massa d'água tropical de superfície (ATS) e massa d'água costeira (AC). A massa d'água tropical de superfície (ATS), foi identificada nas estações 4, 5 e 6 localizadas próximo a foz do estuário Potengi, apresentando altos valores de salinidade e temperatura, em torno de 36-37psu e 28-28.4°C, respectivamente. Estes altos valores de salinidade, indicam que nesta zona do estuário ocorre apenas a presença de águas oceânicas. A massa d'água costeira (AC) ou de mistura ao longo do estuário entre a Ponte do Igapó e o Porto de Natal, foi observada nas estações mais a montante do estuário, onde ocorre a mistura entre a água fluvial e a oceânica.



**Figura 4.9** - Diagrama T-S espalhado do rio Potengi, mostrando dois agrupamentos que caracterizam a Massa de Água Tropical de Superfície (ATS) e a Massa de Água Costeira (AC).

## **CAPÍTULO 5:**

### **ANÁLISE DOS DADOS GEOFÍSICOS E DOS SEDIMENTOS RECENTES**



## 5.1. ASPECTOS GERAIS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os dados obtidos através de um estudo sistemático de sensoriamento remoto acústico, associado à coleta de sedimentos no leito do rio Potengi, tendo como resultado final a distribuição de sedimentos, tipos e geometria das formas de leito do estuário Potengi. O principal método acústico usado neste trabalho foi o Sonar de Varredura Lateral “*Side Scan Sonar*”, conjuntamente com a ecosonda de feixe vertical (ver capítulo 2).

No decorrer das últimas décadas, o estudo intensivo das feições sedimentares de fundo nos diferentes ambientes aquosos, marinhos e continentais, promoveram um aumento considerável do conhecimento e compreensão dos tipos e escalas da morfologia sedimentar, principalmente em áreas onde as correntes de fundo são fortes e persistentes (Flood 1983).

Levantamentos realizados com o sonar de varredura lateral, em diferentes ambientes aquáticos e em diferentes partes do globo, revelaram a complexidade da distribuição dos sedimentos superficiais e demonstraram a inadequação da classificação do fundo do mar baseada inteiramente em amostras pontuais de sedimentos (Bennett *et al.* 1992). Ao contrário dos dados obtidos a partir da amostragem pontual de sedimentos, os levantamentos com sonar de varredura lateral produzem dados espacialmente contínuos sobre a natureza da superfície do leito, em termos de níveis acústicos de feixes refletidos, fornecendo um potente meio de avaliar a distribuição das diferentes características subaquáticas, bem como a transição entre elas. Entretanto, a coleta de sedimentos é imprescindível para a interpretação dos sonogramas registrados pelo sonar de varredura lateral.

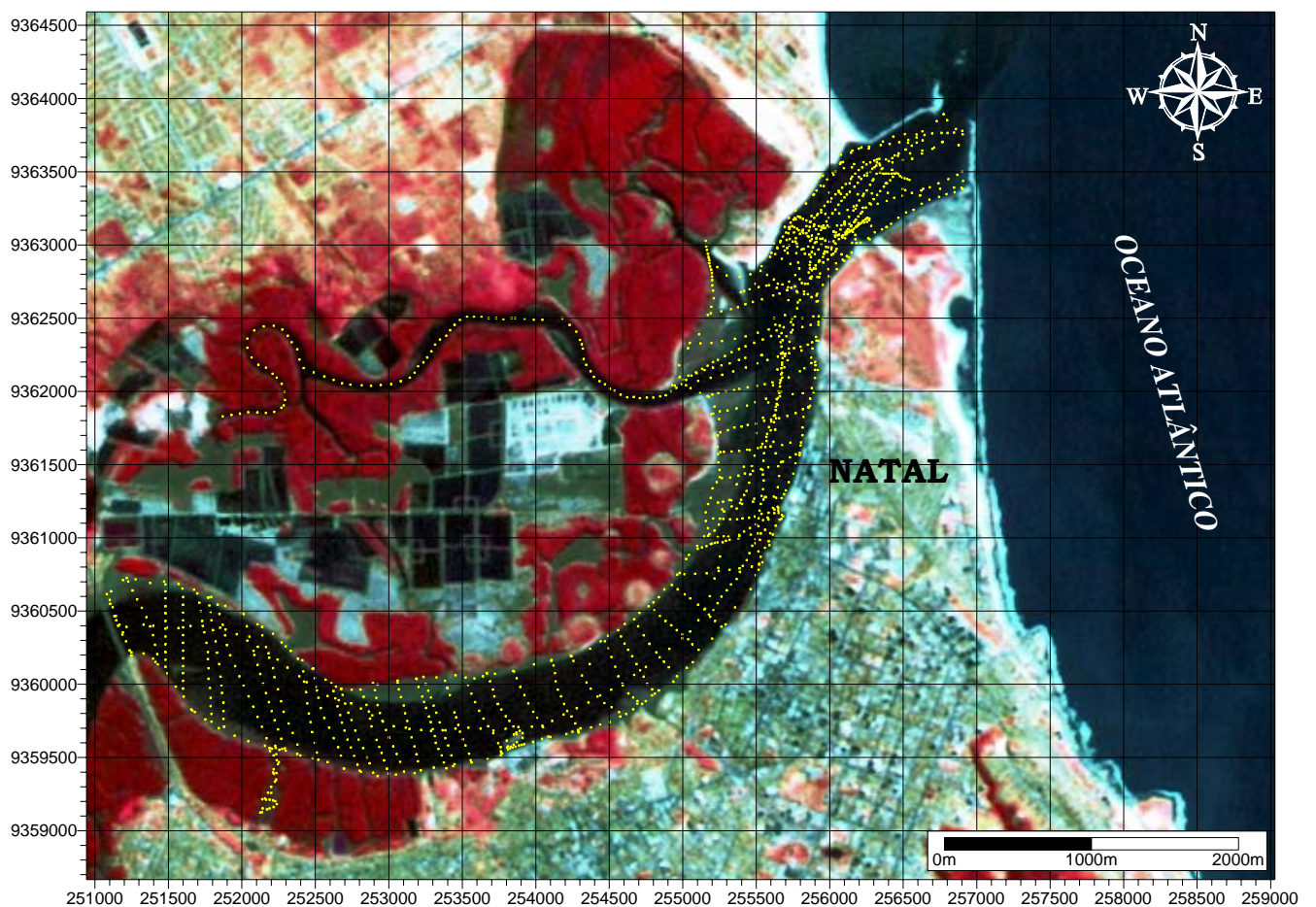
O levantamento com sonar de varredura lateral tem sido utilizado para observar feições de grande escala, quanto para mapear elementos menores de rugosidade, em vários tipos de sedimentos. A mudança de padrão do sonograma corresponde tanto a uma mudança no tipo de sedimento, como a efeito de contraste como, por exemplo, ao longo das margens dos canais. Contudo, as várias intensidades de tons registradas num sonograma resultam da força do sinal refletido e do ângulo de incidência da onda acústica. A intensidade dos tons também está relacionada à irregularidade do fundo, que por sua vez depende da densidade, porosidade e tamanho do grão dos sedimentos. Os sonogramas mostram apenas as relações relativas entre as intensidades de tons e as

características do sedimento, de modo que, em termos gerais, a rocha aparece mais escura, seguida pelo cascalho, depois a areia, enquanto os sedimentos lamosos de grão fino aparecem em tons mais claros (Hunter *et al.* 1982).

Neste estudo, os sonogramas foram interpretados tanto (1) quanto à variedade e distribuição espacial da intensidade de tons registrados, para escolher os locais de amostragens de acordo com a distribuição espacial, quanto (2) pela distribuição das dimensões das formas de fundo. O levantamento sonográfico foi realizado conjuntamente com o batimétrico objetivando uma melhor identificação das diferentes alturas das formas de fundo subaquosas de acordo com Frazão & Vital (2002a).

## 5.2. ANÁLISE DO ESTUDO BATIMÉTRICO

No estuário Potengi foram realizados 89 perfis batimétricos transversais e longitudinais ao eixo do canal, com equidistância aproximada de 50 metros, formando uma malha regular com aproximadamente 20.000 pontos (Figura 5.1).



**Figura 5.1** - Localização dos perfis batimétricos transversais e longitudinais à calha do rio Potengi.

O processamento e a análise dos dados batimétricos, obtidos entre a Ponte de Igapó e a foz do rio Potengi, teve como resultado a elaboração de uma carta batimétrica de contorno, apresentando isóbatas em metros (Figura 5.2) e de uma carta batimétrica com efeito de imagem sombreada (Figura 5.3). Para efeito de melhor visualização, o estuário foi subdividido em 5 sub-áreas, com elaboração de blocos diagramas.

As figuras 5.4 a 5.8 mostram a morfologia do fundo do rio Potengi, possibilitando a visualização e interpretação em 3D das principais feições de fundo. As interpretações a seguir, foram obtidas a partir desses produtos, conjuntamente com dados observados em campo.

As zonas de maiores profundidades se encontram junto às margens côncavas do estuário, enquanto nas margens convexas 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. Estes bancos arenosos são geralmente capeados por sedimentos finos, resultando numa extensa superfície plana, emersa durante a baixa-mar.

Estas feições ocorrem no segmento meandrante e próximo à foz do estuário Potengi, sobre o qual desenvolve-se a planície de inundação colonizada por mangue e gramíneas. Na parte côncava dos meandros, as margens são erosivas e na parte convexa ocorrem os depósitos de barra em pontal (Figura 5.2).

Canais secundários, de dimensões bastante reduzidas em relação ao principal, são também encontrados e parecem ocorrer em resposta à atuação das correntes de marés, formando pequenos bancos longitudinais e canais conjugados. Isto é confirmado pelos seus perfis em forma de V e pelas suas associações com as saídas das gamboas onde as correntes são mais intensas, como é mostrado no perfil batimétrico da seção (I-J), próximo à confluência da gamboa do Jaguaribe com o rio Potengi (Figura 5.10).

Ao longo do estuário, o comportamento morfológico se modifica caracterizando zonas distintas (Cunha 1982). A profundidade, largura e a forma dos canais mostram diferentes níveis de atuação dos mecanismos dinâmicos do ambiente.

Neste estudo, a morfologia de fundo para o estuário revelou a presença de duas zonas morfológicas distintas quanto a suas feições principais: a) Zona do Canal Principal e b) Alto Fundo do Estuário.



# CARTA BATIMÉTRICA DO ESTUÁRIO POTENGI

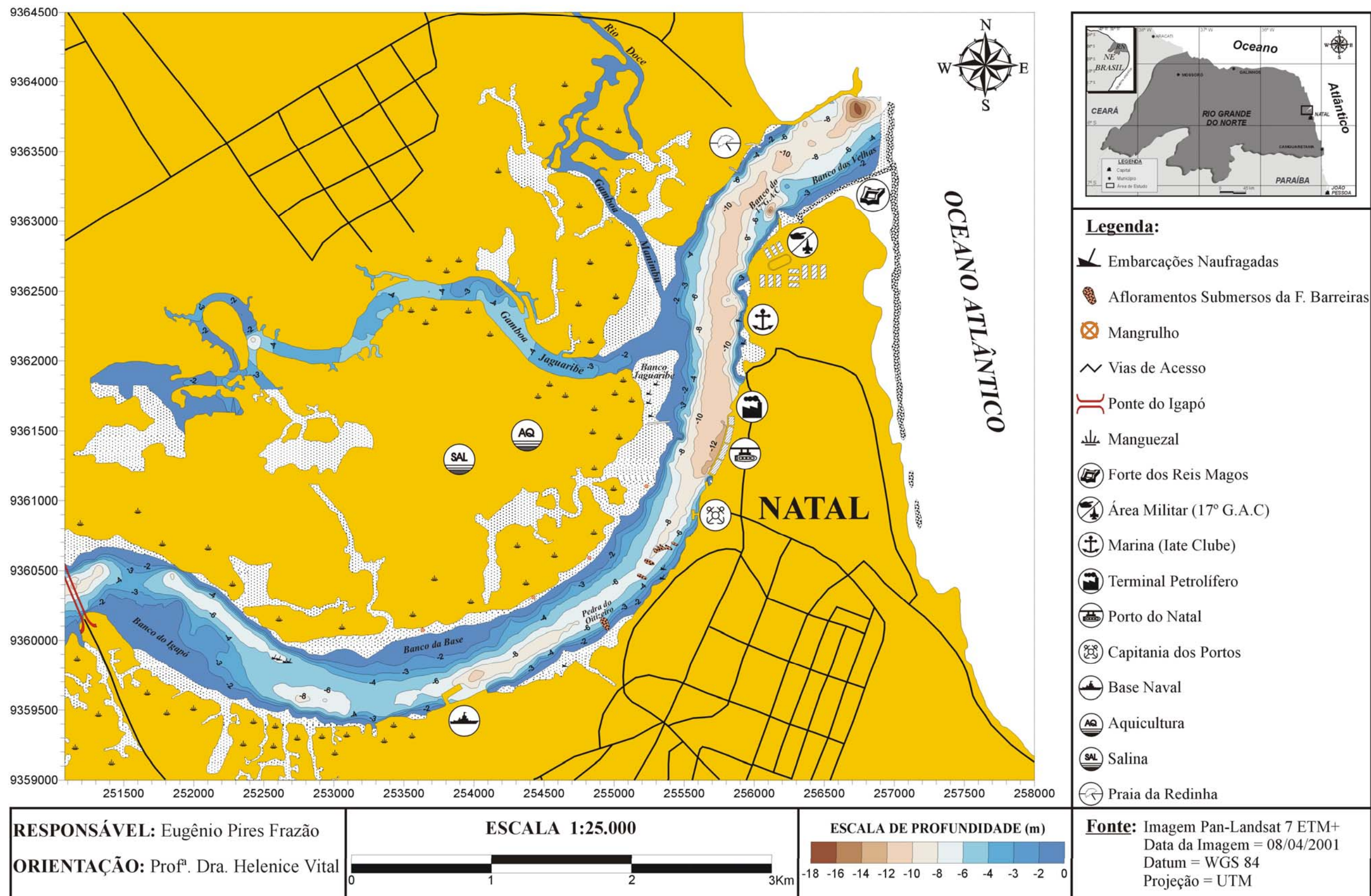
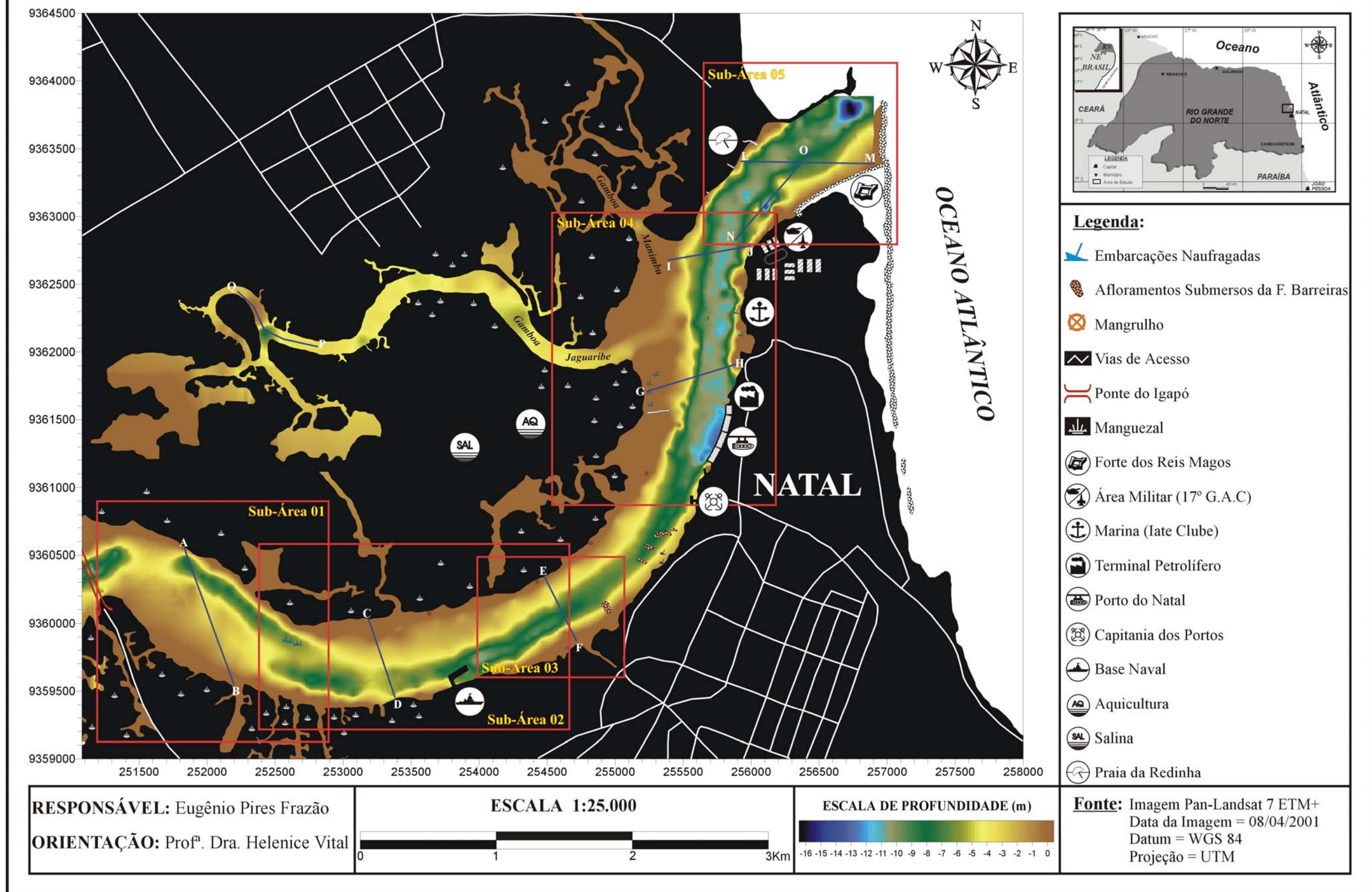


Figura 5.2 - Carta batimétrica do estuário Potengi, mostrando as zonas de bancos e do canal principal de navegação, sendo que os referidos dados foram corrigidos com nível de redução de 1.24m.



# CARTA BATIMÉTRICA DO ESTUÁRIO POTENGI COM EFEITO IMAGEM



**Figura 5.3** - Carta batimétrica do estuário Potengi, submetida ao filtro de imagem sombreada para ressaltar as principais morfologias do fundo, mostrando 8 seções perpendiculares às zonas de bancos. Subáreas 01 e 05 referem-se a localização dos blocos diagramas mostrados nas figuras 5.4 a 5.8.

### **a) Zona do Canal Principal**

O canal principal apresenta em média 170 metros de largura e profundidades entre 8 e 10 metros, constituindo-se claramente na continuação da linha de talvegue do rio Potengi que acompanha sua margem. Pequenas depressões, entre 9 e 11 metros de profundidade, marcam o fundo do canal (Figuras 5.4 a 5.8). 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 em regime turbilhonar.

Um vale amplo, limitado por taludes abruptos junto às margens (Figuras 5.2 e 5.8), pode ser observado próximo à foz, onde a influência marinha é 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 dos rios Jundiá e Potengi, quanto à menor influência das correntes de maré.

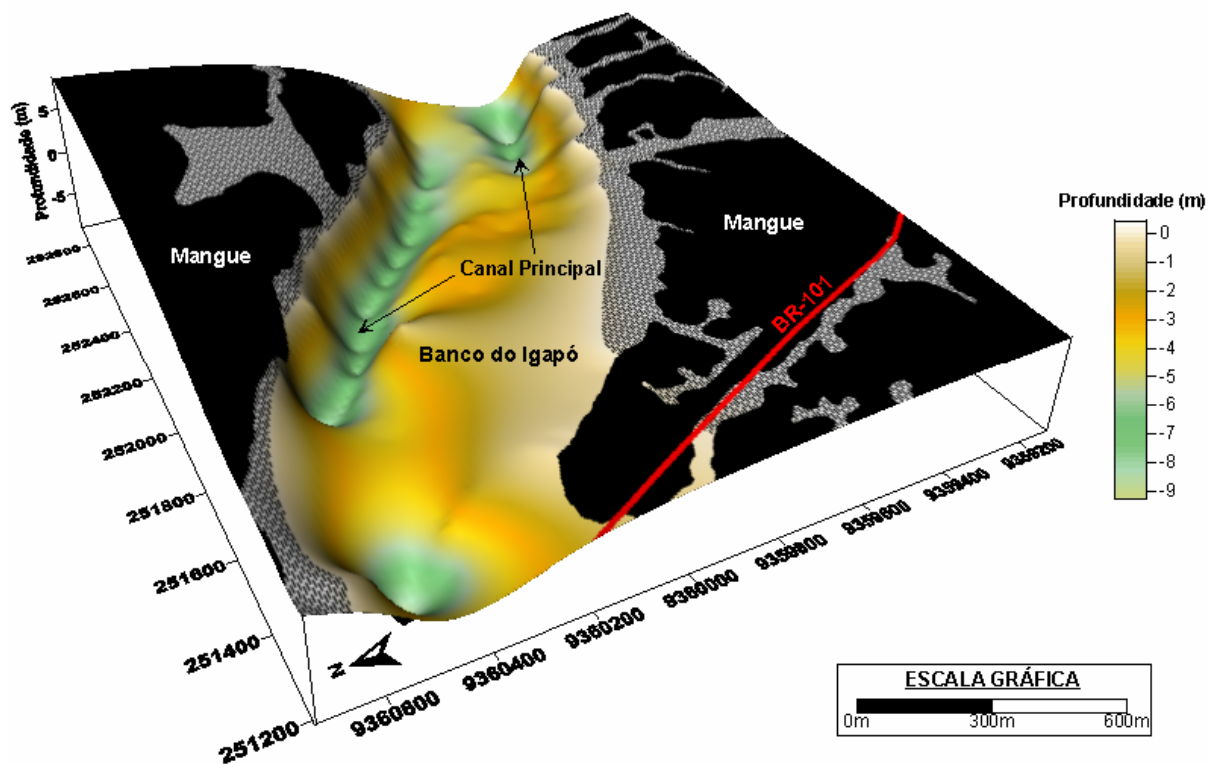
### **b) Alto Fundo do Estuário**

Esta zona contorna toda a margem do rio Potengi, e pode ser definida a partir das isóbatas menores que 4m. Desta forma, os altos fundos ao longo do estuário são caracterizados pelos bancos arenosos e planícies lamosas. Cinco bancos principais destacam-se nesta zona. O primeiro e maior de todos acompanha a margem direita do estuário localizado entre a Ponte do Igapó e a Base Naval (Figura 5.2), aqui denominado de Banco de Igapó. Apresenta cerca de 1.3 km de comprimento por 650m de largura na sua porção mais pronunciada. A formação do banco, provavelmente, é consequência da diminuição da energia das correntes de maré.

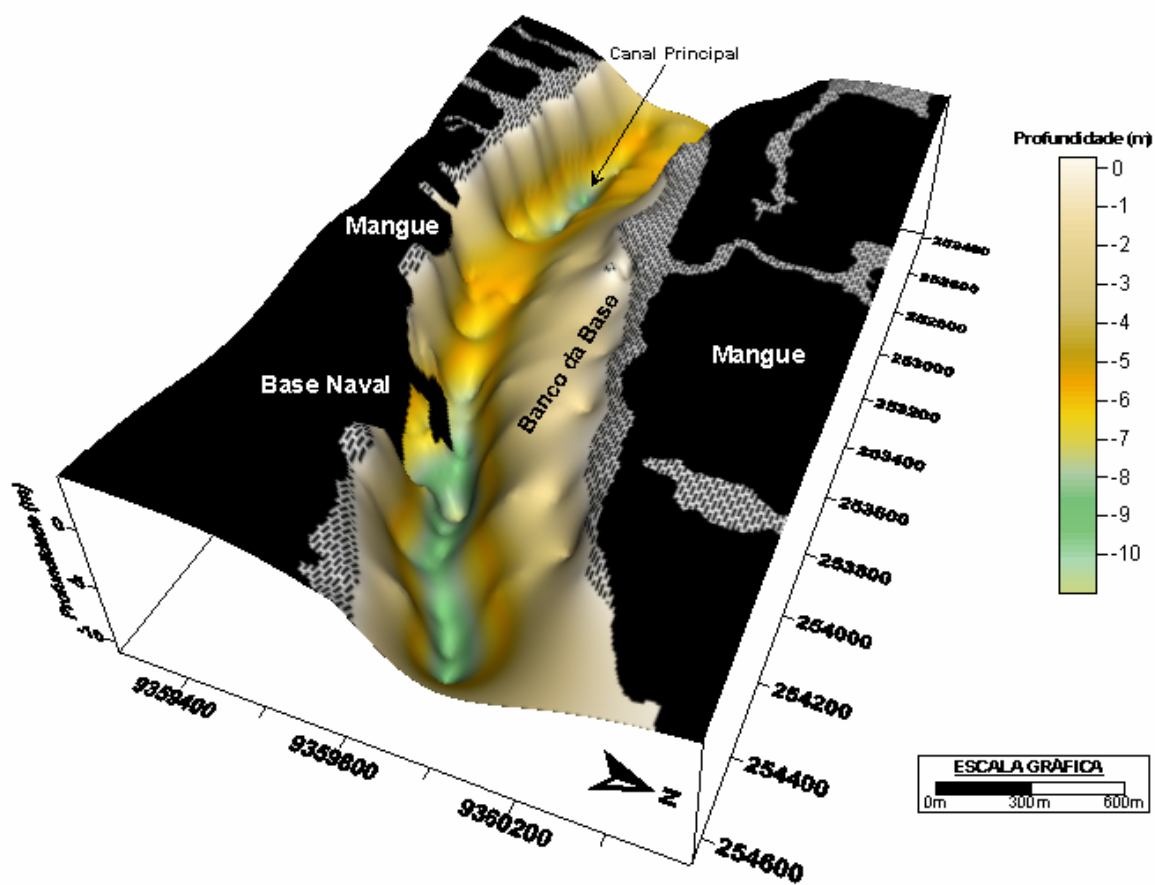
No bloco-diagrama da sub-área 01, observa-se que o Banco do Igapó apresenta forma semicircular, sendo formado pela remobilização dos sedimentos erodidos na margem oposta. Apresenta um mergulho suave em direção ao canal principal de navegação (Figura 5.4). A seção (A-B) mostra a grande quantidade de material sedimentar que é depositado na margem direita formando o Banco do Igapó (Figura 5.9).

Os outros dois bancos, que se sobressaem com profundidades menores que 3m, são denominados Banco da Base (sub-área 2, Figura 5.5) e Banco do Jaguaribe (sub-área 4, Figura 5.7), ambos localizados na margem esquerda.





**Figura 5.4** - Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 01. Inclinação do bloco =  $33^\circ$  e rotação do bloco =  $117^\circ$ . Para localização ver figura 5.3.



**Figura 5.5** - Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 02. Inclinação do bloco =  $41^\circ$  e rotação do bloco =  $255^\circ$ . Para localização ver figura 5.3.

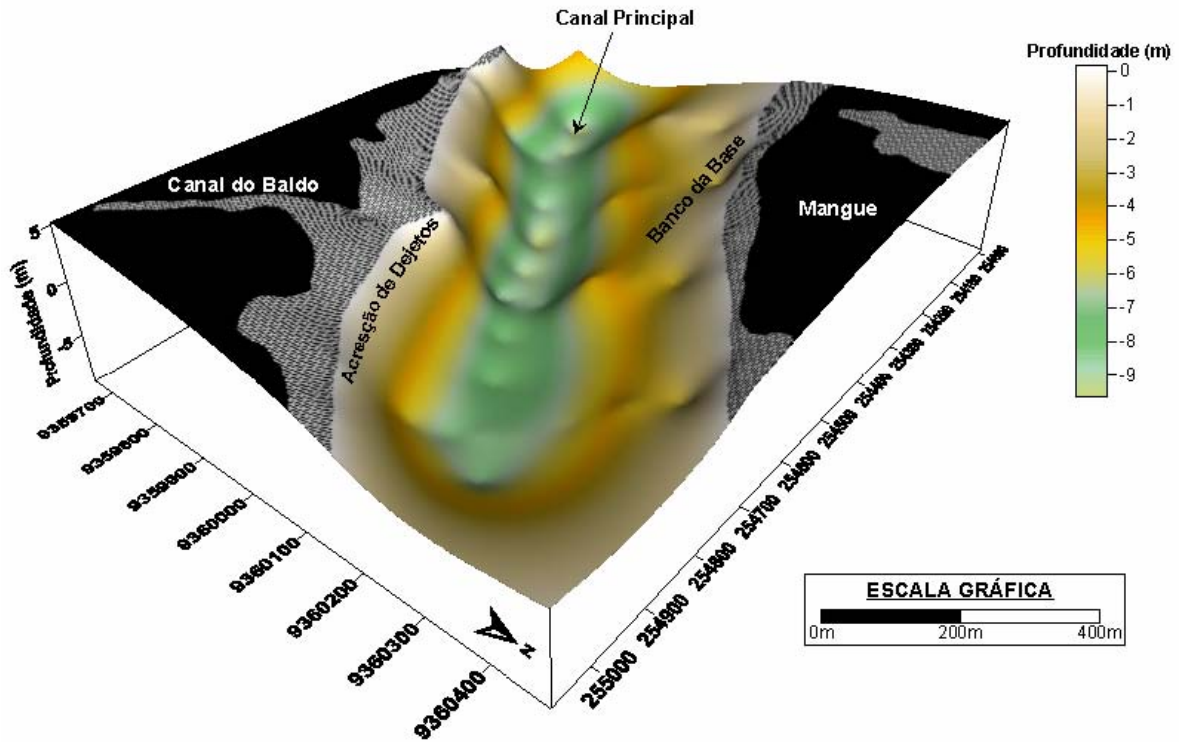


Figura 5.6 - Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 03. Inclinação do bloco = 35° e rotação do bloco = 231°. Para localização ver figura 5.3.

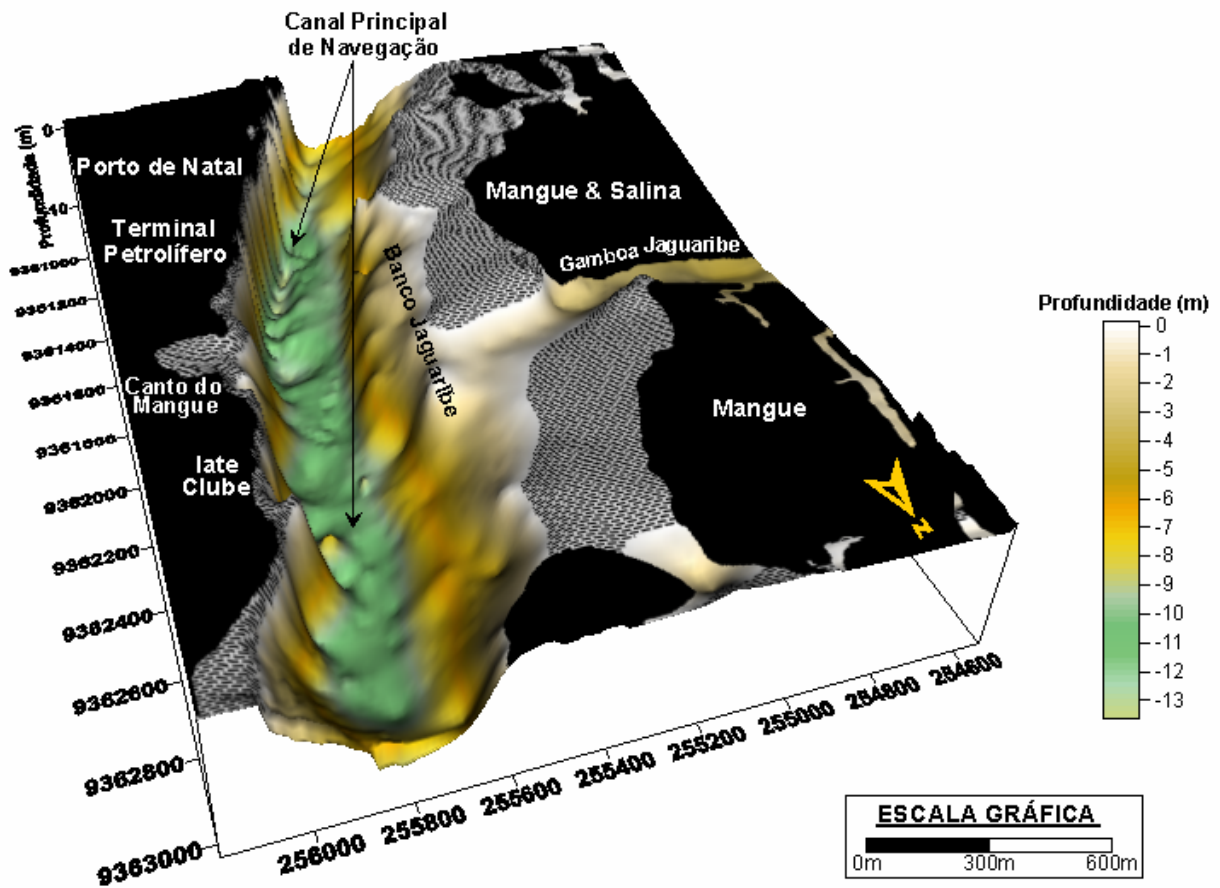
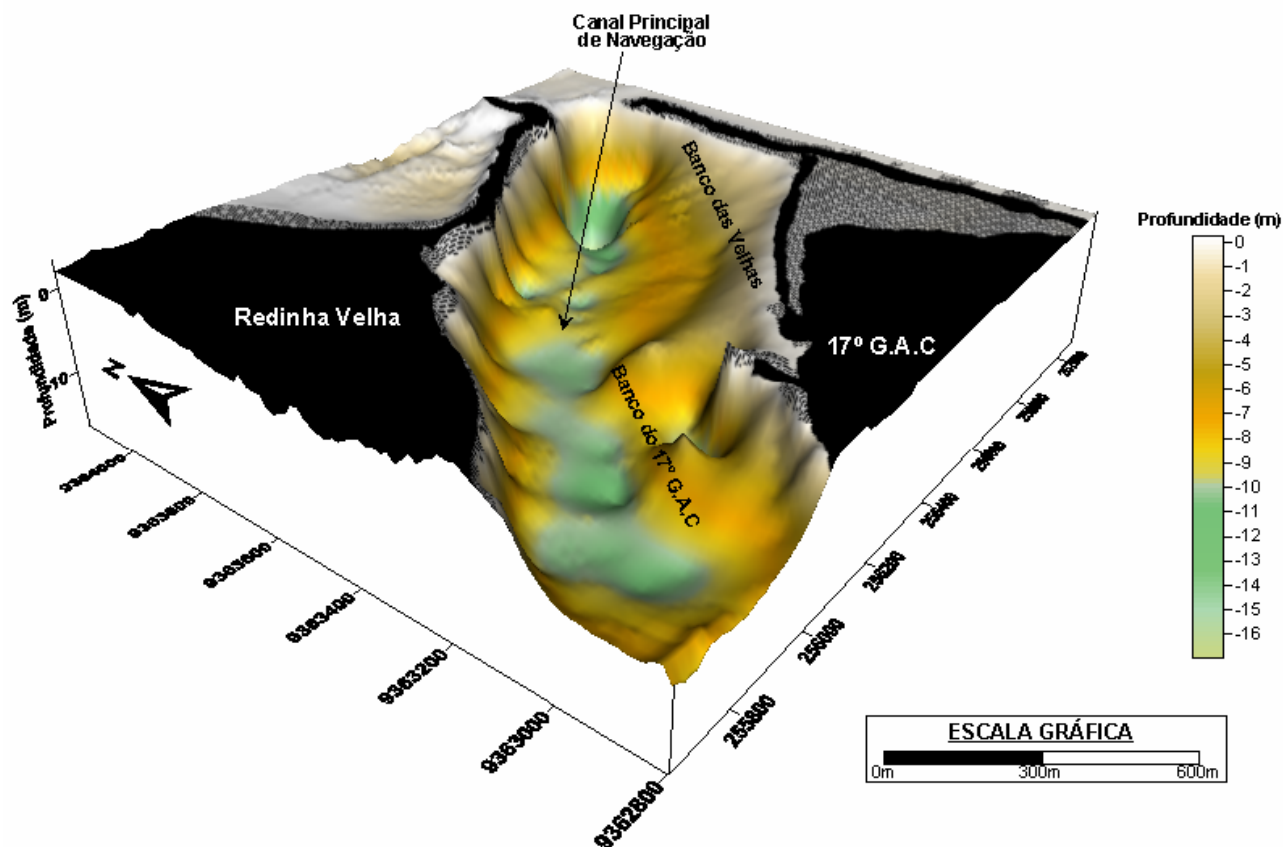


Figura 5.7 - Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 04. Inclinação do bloco = 38° e rotação do bloco = 198°. Para localização ver figura 5.3.



**Figura 5.8** - Bloco diagrama ressaltando feições morfológicas do fundo da sub-área 05. Inclinação do bloco = 30° e rotação do bloco = 52°. Para localização ver figura 5.3.

O Banco da Base, com 2Km de comprimento por 416m de largura, está posicionado no eixo central do estuário Potengi. A figura 5.5 mostra em 3 dimensões o Banco da Base, localizado no segmento meandrante do estuário e o prolongamento da linha de talvegue do rio Potengi, que acompanha sua margem direita. Amostras coletadas neste banco indicam que o mesmo é coberto por sedimentos arenosos. Através do perfil batimétrico da seção (C-D), observa-se o acúmulo de sedimentos formando o Banco da Base (Figura 5.9).

Na sub-área 3 (Figura 5.6) encontra-se o Canal do Baldo, localizado na margem direita do rio Potengi. A partir do Canal do Baldo, são lançados no rio Potengi dejetos “*in natura*”. Os dejetos acumulam-se na saída deste canal, provocando o assoreamento do canal principal de navegação. Na margem esquerda, em frente ao canal, ocorre sedimentação natural, sendo esta a continuação do Banco da Base. Desta forma, a intensa contribuição de material sólido proveniente dos dejetos do esgoto da Cidade de Natal, na margem direita, associada à sedimentação natural na margem esquerda, tendem a

assorear e preencher a zona do canal principal, como pode ser observado na Figura 5.9 na seção (E-F).

O Banco Jaguaribe, situado na sub-área 4, encontra-se na margem esquerda do estuário, na confluência da Gamboa Jaguaribe com o rio Potengi, em frente ao Porto de Natal. Apresenta 487m de comprimento e 390m de largura (Figuras 5.2 e 5.7). Na seção (G-H), transversal a calha do rio (Figura 5.9), é possível observar a migração do banco em direção ao canal principal, reduzindo a largura do canal principal de navegação nesta região para 220m de largura.

O Banco do 17° G.A.C, localizado na margem direita do estuário (Figuras 5.2 e 5.8), sub-área 5, provavelmente foi formado devido à presença do espigão do 17° G.A.C com aproximadamente 200m de comprimento. Aparentemente, o espigão construído como anteparo artificial para conter a erosão ao longo da margem, provocou a acumulação de sedimentos devido a forçantes turbilhonares, formando o Banco do 17° G.A.C. Analisando-se os dados de direções e intensidades das correntes, observamos que o vórtice gerado pelo espigão forma uma depressão fazendo com que os sedimentos remobilizados da praia da Redinha migrem em direção ao canal principal.

Observa-se na seção longitudinal (N-O) a presença de uma depressão de aproximadamente 15 metros (Figura 5.10). Estudos de correntes realizados neste local, permitem deduzir que esta depressão foi escavada pelas intensas correntes de maré, principalmente de vazante, que quando encontram o anteparo artificial geram um fluxo turbulento, formando um vórtice por detrás (Figura 5.11). O surgimento deste escoamento turbulento depende da velocidade da corrente, densidade da água e do tamanho do obstáculo. Este vórtice apresenta movimentos circulares no sentido horário (Figura 5.11), provocando a escavação da depressão em decorrência do aumento da pressão atrás do espigão e ao mesmo tempo, a redução drástica da pressão de arraste, proporcionando a remobilização de material arenoso e deposição ao redor da depressão (Figura 5.8).

O Banco das Velhas ocorre na margem direita próximo à foz do rio Potengi com 526m de comprimento e 154m de largura (Figuras 5.2 e 5.8). A seção (L-M), mostra o Banco das Velhas em perfil, com declive suave em direção ao canal principal (Figura 5.10).

O perfil batimétrico da seção (P-Q), localizada no interior da Gamboa do Jaguaribe, apresenta uma depressão com profundidade em torno 11 metros (Figura 5.10), relacionada por Cunha (1982) a paleofoz do rio Potengi.

### 5.2.1. EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO ESTUÁRIO

As discussões aqui incluídas resultam da análise das principais modificações morfológicas de fundo ocorridas no estuário Potengi, identificadas a partir de comparações entre a carta batimétrica nº802 (DHN 1973) e a elaborada para este trabalho (Figura 5.12).

#### a) Carta Batimétrica de 1973

O canal principal de navegação apresentava, no trecho entre a Base Naval e a foz do rio Potengi, uma largura média de 100m e profundidade média de 6 a 8 metros, podendo atingir até 10 metros no trecho entre a Capitania dos Portos e o terminal petrolífero.

Profundidades mais rasas, de 4 a 5 metros, eram encontradas próximo à foz do estuário Potengi. Destacava-se nesta região a presença de arenitos praias “*beachrocks*” submersos, denominados de Pedra da Bicuda. A presença destes arenitos praias constituía-se em uma barreira natural para o transporte de sedimentos fluviais em direção a *offshore*. Estes arenitos evidenciam antigas linhas de costa.

Porém, em frente ao espigão do 17° G.A.C, observa-se uma menor acumulação de sedimento ao redor dele, embora já exista a formação do Banco do 17° G.A.C na margem direita.

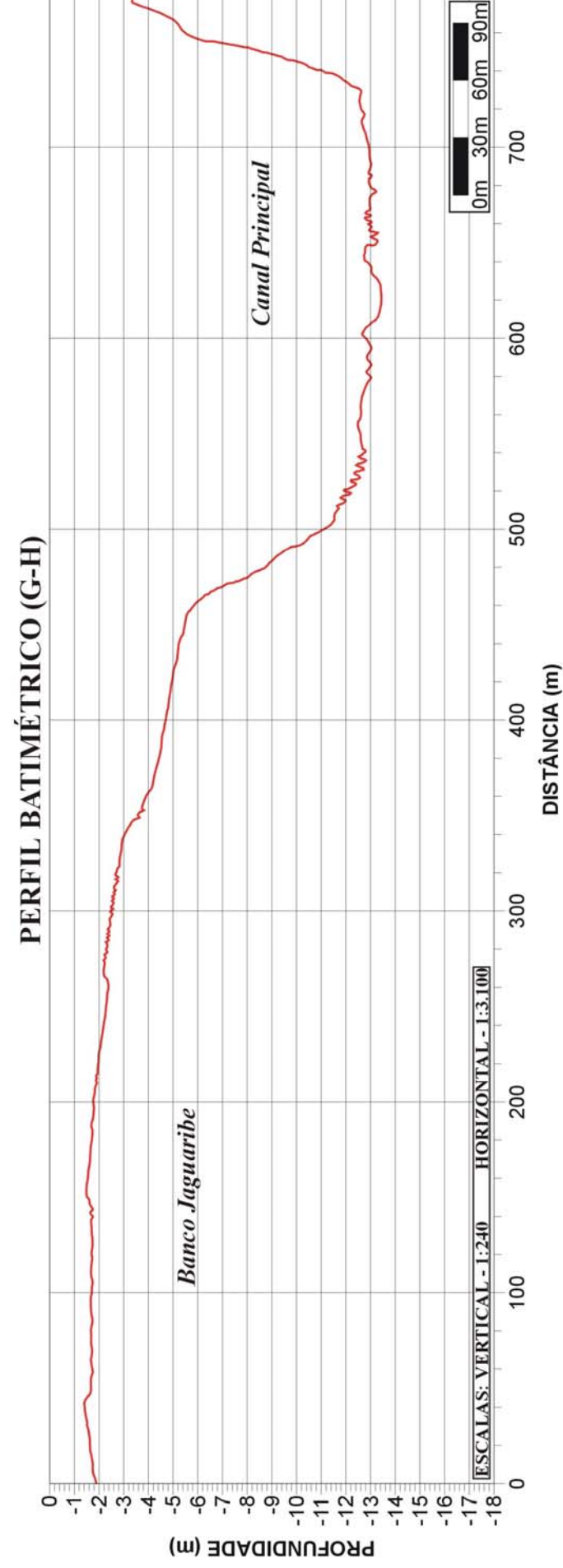
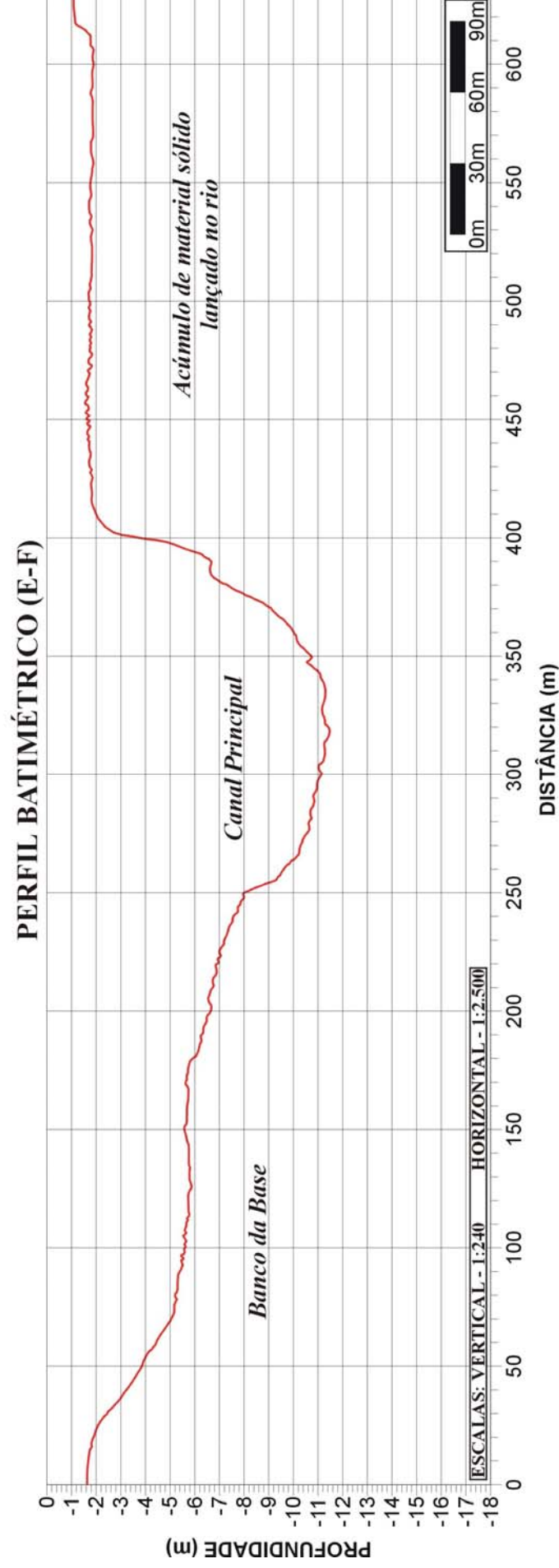
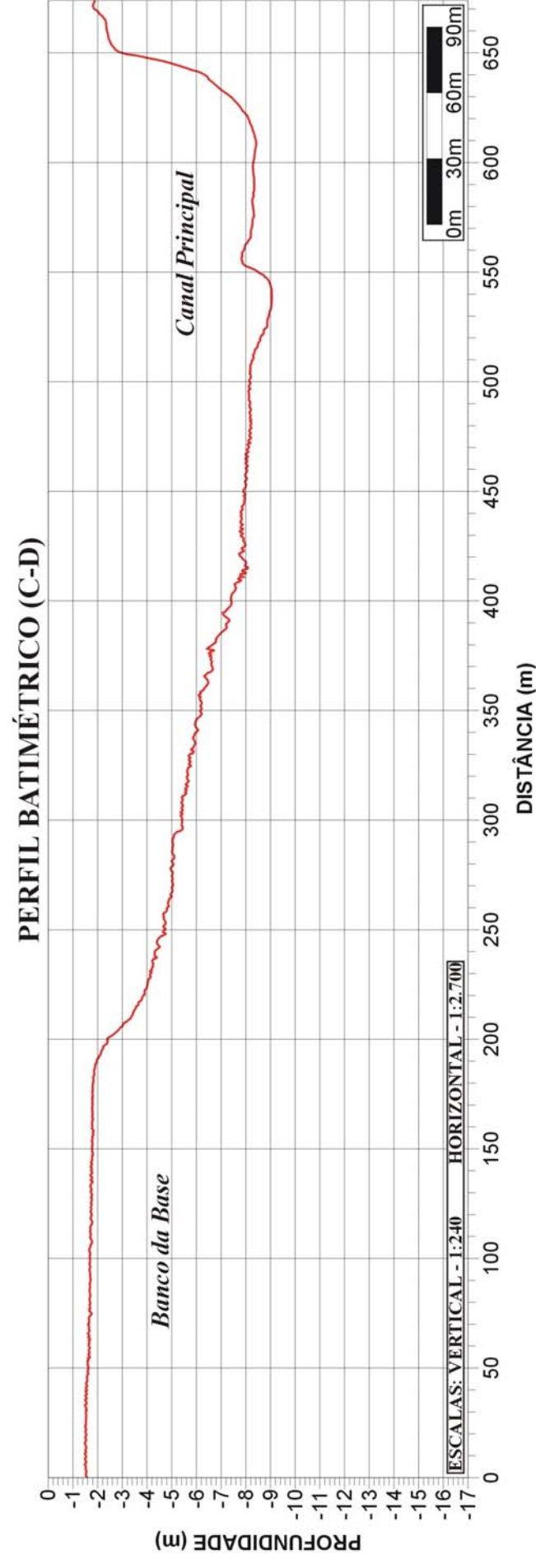
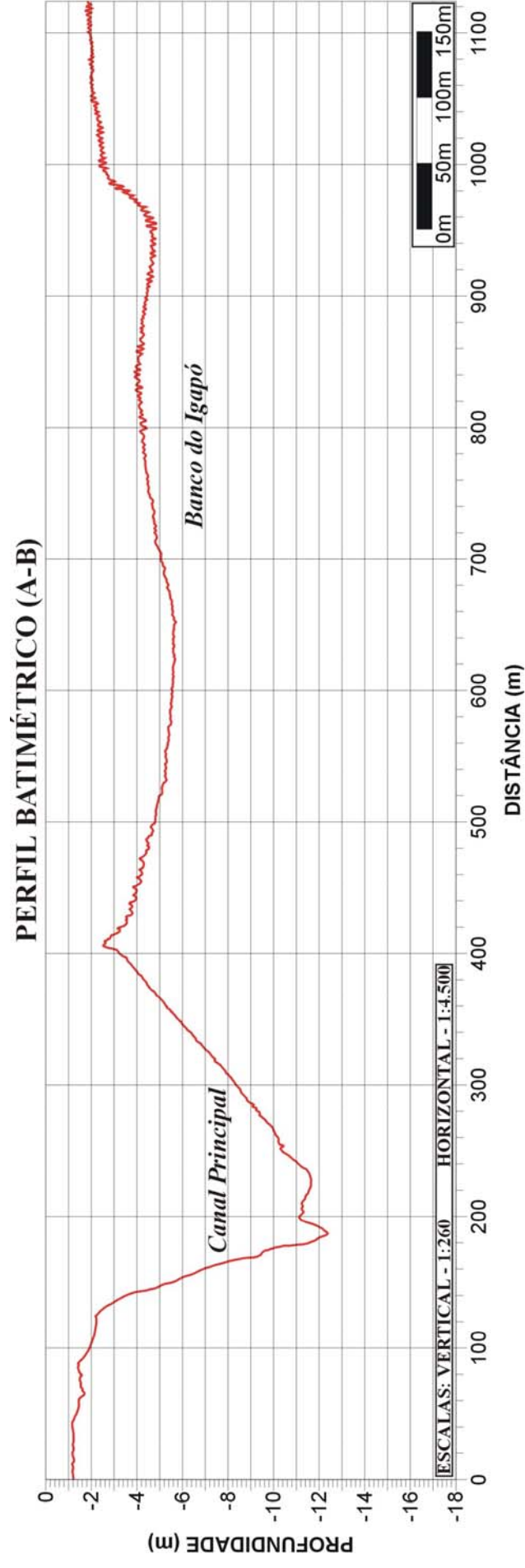
#### b) Carta Batimétrica Elaborada de 2002

Na zona do canal de navegação observa-se um aumento da largura média do canal passando para 170m, devido às inúmeras dragagens ocorridas durante os últimos 29 anos. Estas dragagens tornaram o canal de acesso ao Porto de Natal, com profundidades em média de 10 a 12 metros, cerca de 2 metros mais profundo que no ano de 1973.

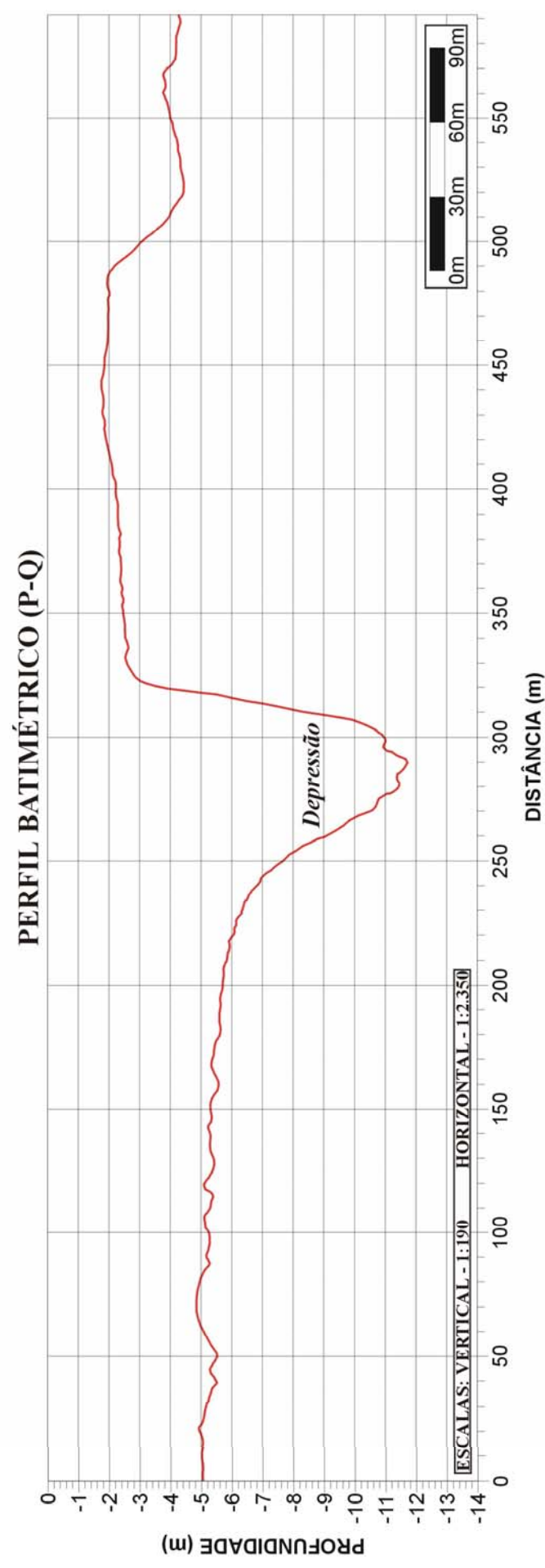
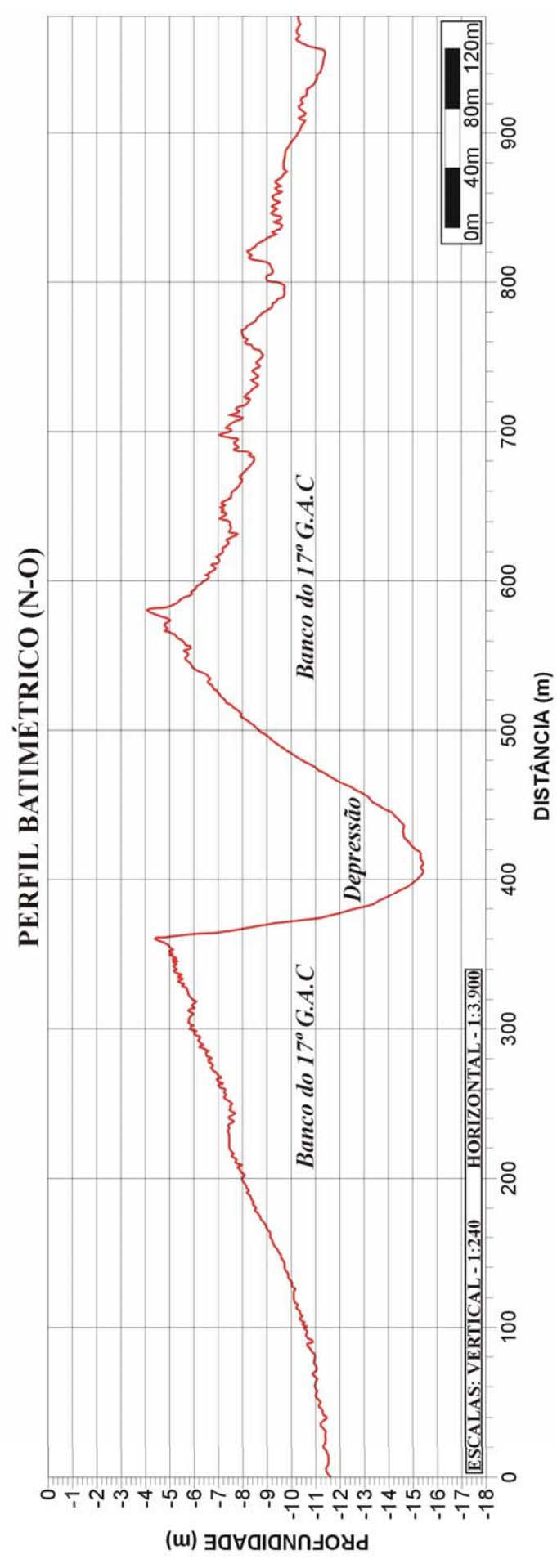
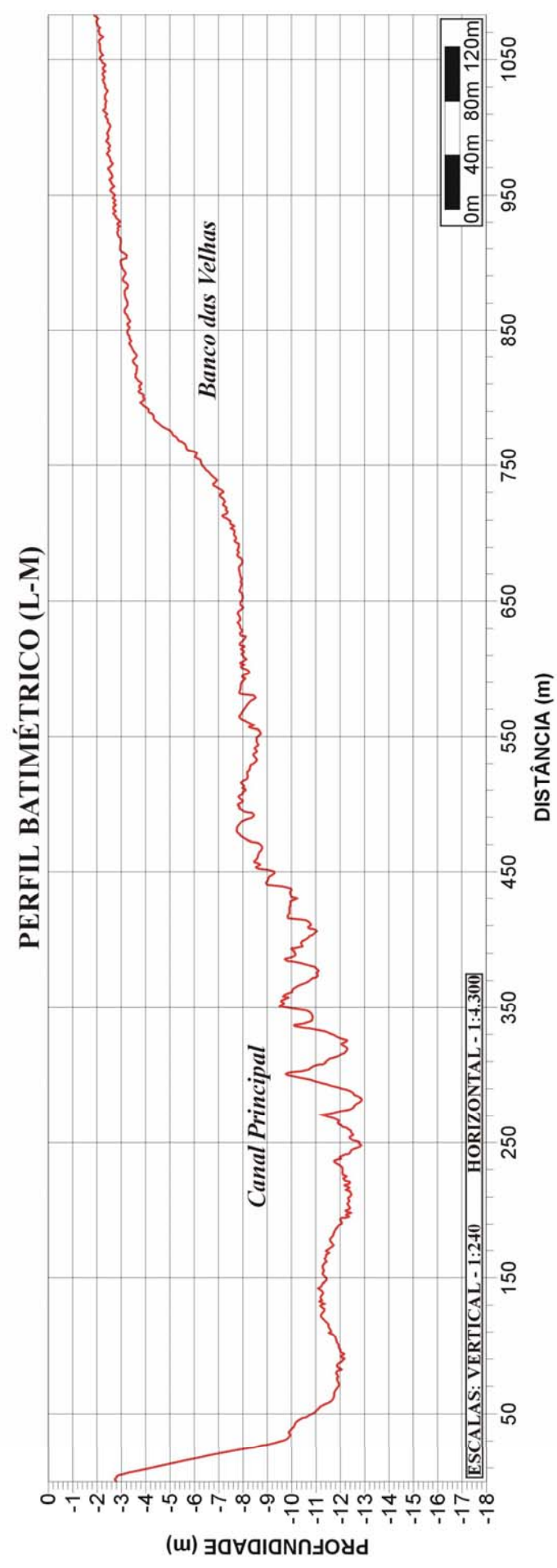
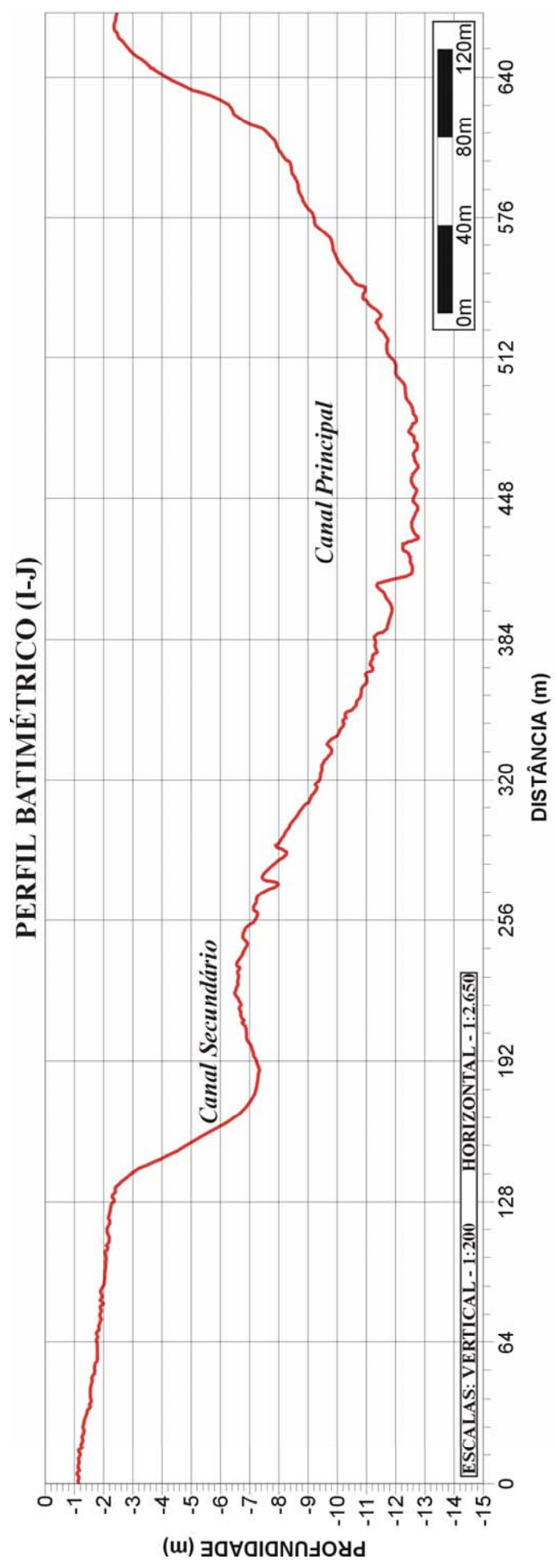
Ao lado do Cais do Porto ocorreu um aumento da profundidade para 12 metros, que há 29 anos apresentava uma profundidade de apenas 9 metros.

O Banco da Base permaneceu praticamente sem alterações, migrando um pouco em direção ao canal principal de navegação, devido ao acréscimo de material.



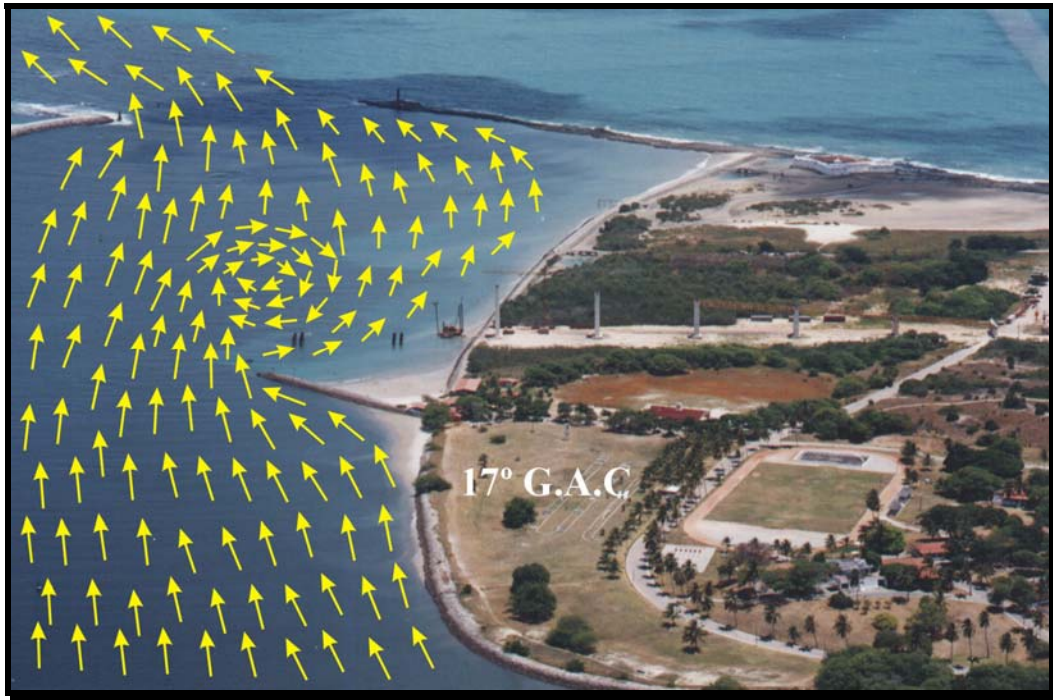


**Figura 5.9** - Perfis batimétricos transversais à calha do rio Potengi, sendo que a seção (A-B) é perpendicular ao Banco do Igapó, (C-D) ao Banco da Base, (E-F) um grande acúmulo de material sólido, que são lançados "in natura" no rio e (G-H) migração do Banco Jaguaribe em direção ao canal principal do Porto de Natal.



**Figura 5.10** - Perfis batimétricos transversais (I-J e L-M) e longitudinais (N-O e P-Q) ao rio Potengi, sendo que na seção (I-J) ocorre um pequeno canal secundário formado pela gamboa do Jaguaribe, (L-M) remobilização de sedimento na margem esquerda enquanto ocorre deposição na margem oposta, (N-O) mostra a depressão causada pelo vórtice criado pelo espigão do 17º G.A.C e (P-Q) depressão de 11m na gamboa do Jaguaribe, reforçando a hipótese da mesma tratar-se de uma paleofoz do rio Potengi..





**Figura 5.11** - Anteparo artificial (espigão) proporcionando um fluxo turbulento durante a maré de vazante, responsável pelo crescimento e acumulação de sedimentos na parte submersa do Banco do 17° G.A.C. (Foto: Vital, nov. 2001).

Comparando-se com o ano de 1973, o Banco do 17° G.A.C apresentou um crescimento em direção à zona do canal, provavelmente devido ao vórtice formado na corrente de vazante no espigão, ocasionando o assoreamento e migração do canal para a margem esquerda, propiciando erosão na praia da Redinha (Figura 5.13) e dificultando a navegação.

Na batimetria de 2002 não se observa mais a existência da Pedra da Bicuda, pois a mesma devido dificultar a entrada e saída das embarcações de grande porte, foi dinamitada. Atualmente, no mesmo local existe um amplo canal apresentando uma profundidade média de 8 metros.

Através desses dois mapas podemos observar as modificações naturais e antrópicas que influenciaram a morfologia do fundo durante diferentes épocas.

### **5.3. FORMAS DE LEITO SEDIMENTARES**

No estuário Potengi, as *dunas subaquáticas* foram detectadas tanto com a ecossonda, quanto com o sonar de varredura lateral. Entretanto, devido à varredura lateral, este último apresenta a vantagem de possibilitar o cálculo das formas de leito longitudinais e transversais.

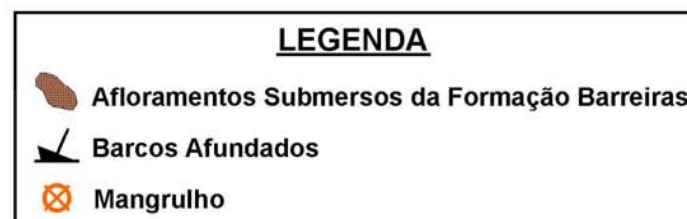
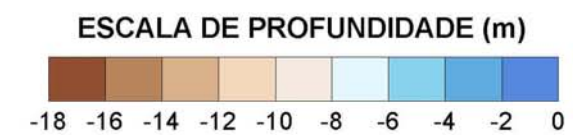
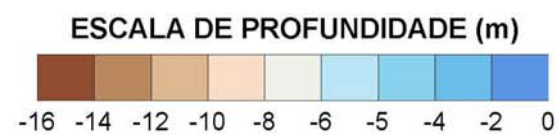
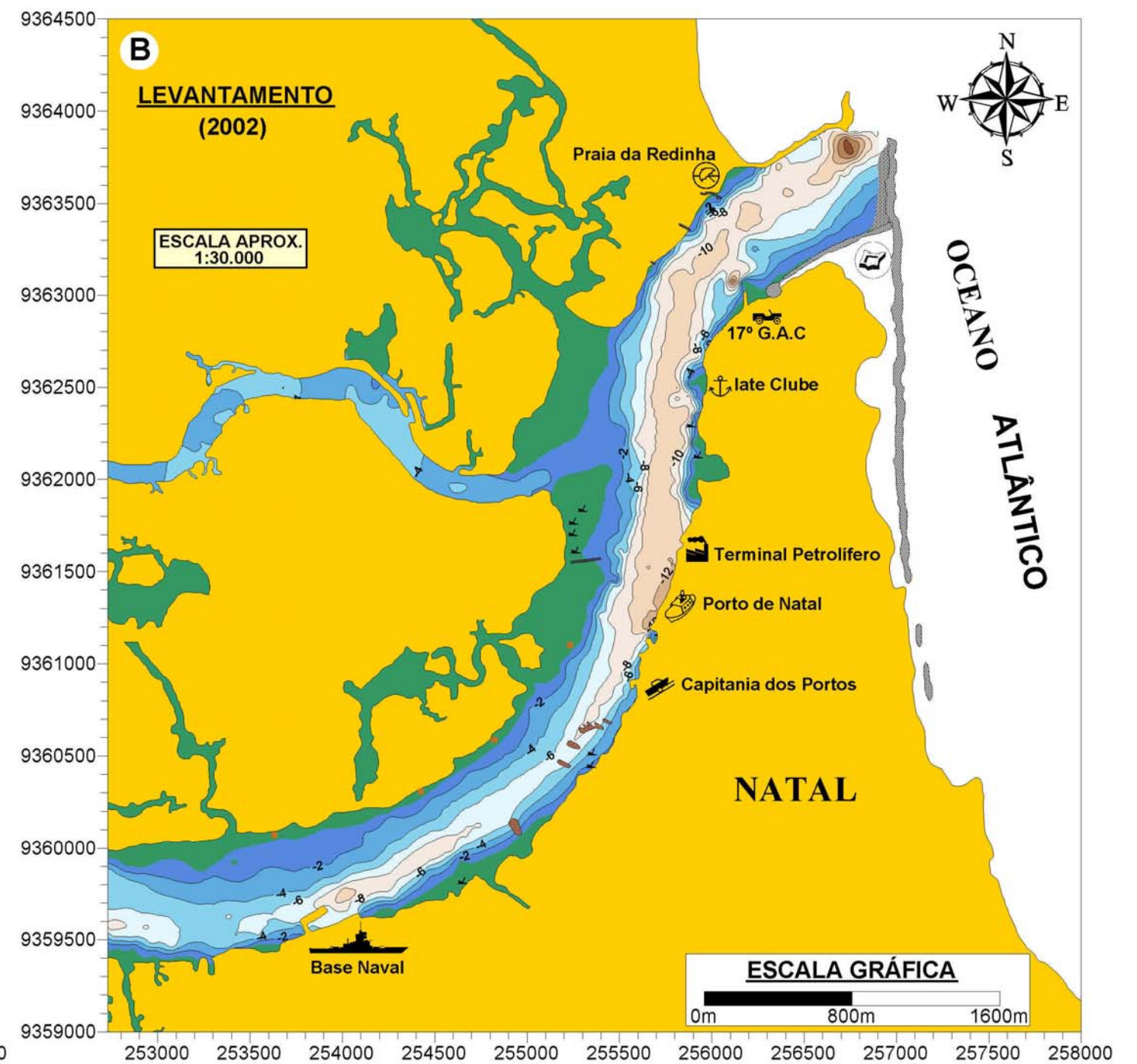
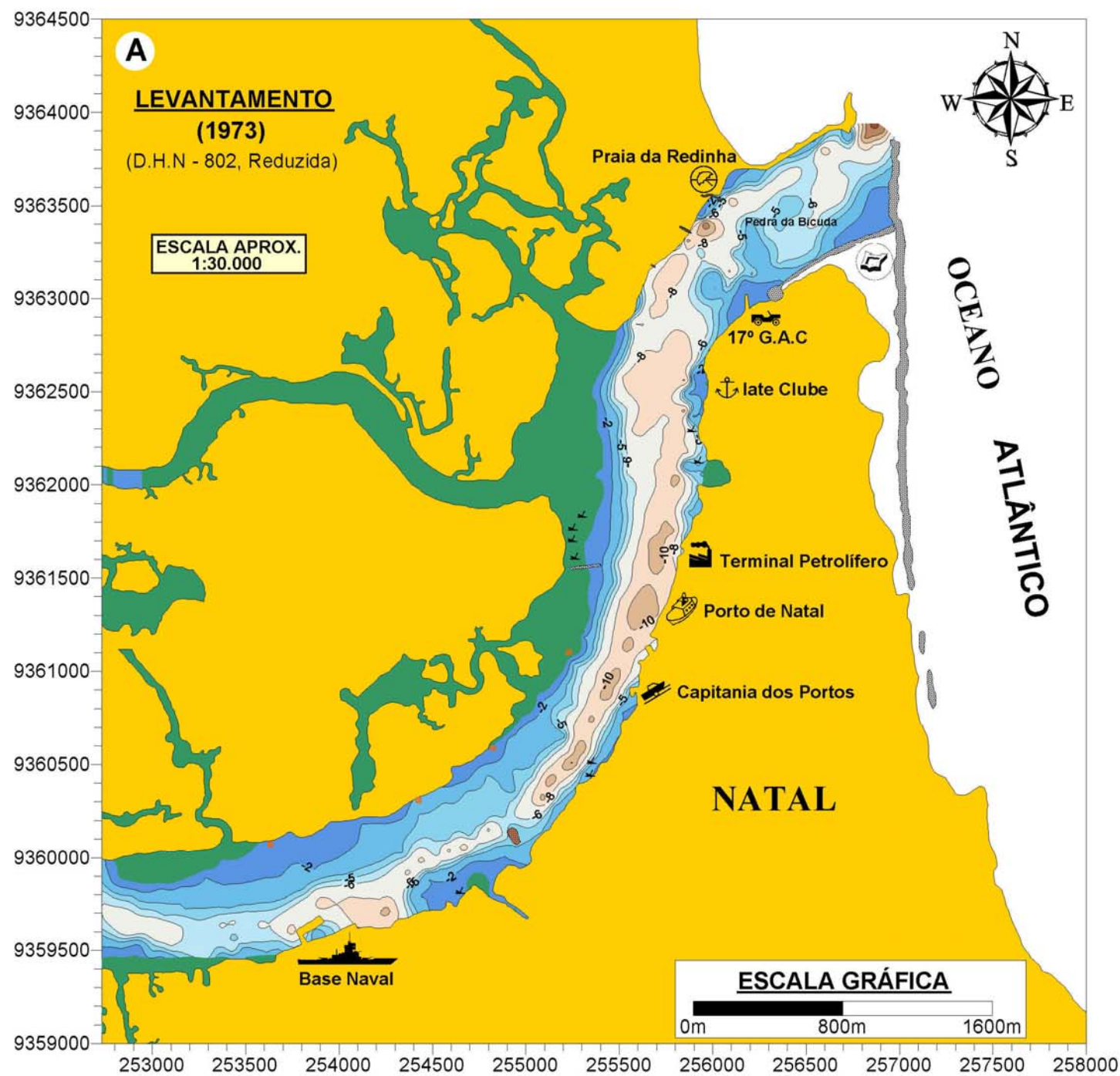


Figura 5.12 - Cartas batimétricas do estuário do rio Potengi referentes aos anos de 1973 (A) e 2002 (B).





**Figura 5.13** - Praia da Redinha sofrendo um intenso processo de erosão devido ao deslocamento do canal principal de navegação em direção a sua margem, provavelmente causado pela intensa acreção do Banco do 17° G.A.C, em consequência da construção e localização do espigão (Fotos: Frazão, nov. 2001)

Os resultados agora apresentados foram obtidos a partir de pesquisas com o sonar de varredura lateral ao longo do rio Potengi. O propósito destas investigações é obter informações sobre a possível relação entre tipos de leitos e as condições hidrográficas atuais na área.

Segundo Ashley (1990), as grandes formas de leito estão presentes em ambientes recentes arenosos onde as profundidades da água são maiores que 1m, os sedimentos são mais grossos que 0.15 mm (areia muito fina) e as velocidades médias de corrente são maiores que 0.4 m/seg ou 0.7 nós.

Estudos experimentais parecem apoiar os argumentos, geralmente aceitos, de que as formas de leito de fluxo transversal, de grande escala, são uma entidade distinta, separada dos *ripples* que têm comprimentos geralmente inferiores a 0.6 m (Yalin 1964; Allen 1968; Kennedy 1969; Harms *et al.* 1982).

Ambientes em que o movimento da água é rápido o suficiente para que o fundo desenvolva formas de leito em larga escala recaem em três ambientes naturais: marinhos, estuários dominados por marés e rios. Embora os processos físicos característicos destes ambientes de alta energia sejam muito semelhantes, as diferenças entre eles são suficientes para produzir variedades distintas das formas de leito de fluxo transversal em larga escala (Ashley 1990).

Nos estuários, as correntes de maré são variáveis; elas aumentam e diminuem de acordo com períodos de maré enchente e vazante no canal estuarino. Embora a direção do fluxo se inverta regularmente, os padrões do fluxo das correntes de enchente e vazante

geralmente não coincidem. Conseqüentemente, a água e o sedimento transportado podem seguir uma rota circular para o interior e para fora do estuário.

Isto leva a sistemas espacialmente variados, onde algumas partes do estuário são dominadas pela maré enchente e outras partes pela maré vazante. A irregularidade temporal e espacial do fluxo do transporte de sedimentos, associada aos níveis regularmente flutuantes da água, propicia a formação de uma variedade de morfologias de formas de leito.

Segundo Ashley (1990), quando se estuda as formas de leito de fluxo transversal em larga escala, faz-se necessário examinar a dinâmica dos fluídos relacionada à origem e migração das grandes formas de leito. Com base em estudos experimentais e observações de campo realizados nos últimos 40 anos, as formas de leito de fluxo transversal parecem funcionar como um elemento de resistência ao fluxo, que movem-se a partir da pressão exercida sobre o leito, sob o efeito do fluxo. No leito plano-paralelo ao fluxo, um padrão repetitivo de linhas convergentes e divergentes do fluxo interage com o leito sem coesão e produz zonas alternadas de erosão e deposição. A erosão ocorre nos locais onde a pressão da erosão provoca o aumento da velocidade das correntes descendentes, enquanto a deposição ocorre nos locais onde a pressão da erosão diminui a velocidade das correntes descendentes. Se este padrão do fluxo permanecer relativamente inalterado na terceira dimensão (perpendicular ao fluxo) e houver uma ausência de fortes turbilhões e remoinhos, a forma de leito produzida será de crista reta e deverá ser denominada como do tipo 2-D. Contudo, se a estrutura do fluxo variar significativamente na terceira dimensão e existirem remoinhos capazes de desgastar as depressões, então a forma de leito refletirá isso na formação de uma forma 3-D. Assim, observa-se que a tri-dimensionalidade do fluxo e a tri-dimensionalidade do leito interagem. As formas de leito em larga escala como “*dunas*”, encaixam-se em dois grupos: formas bi-dimensionais (2-D) que ocorrem com velocidades mais baixas e formas tri-dimensionais (3-D) que ocorrem com velocidades mais altas para um determinado tamanho de grão (Middleton & Southard 1986).

O termo duna foi recomendado por Ashley (1990) para classificar os vários tipos de formas de leito: 1) “duna” foi usada pelos primeiros pesquisadores que documentaram a posição das grandes formas de leito dentro do contexto do regime de fluxo (Gilbert 1914; Yalin 1964; Guy et al. 1966; Kennedy 1969); 2) “duna” não tem sido usado para

tantas diferentes configurações de leitos como *sandwave* ou *megaripple* e; 3) parece haver uma afinidade genética (embora com fluído) entre dunas eólicas e grandes formas de leito subaquáticas.

De acordo com Ashley (1990), o esquema de classificação das formas de leito, baseado nos critérios morfológicos de primeira ordem como o tamanho, subdivide as formas de leito das dunas em divisões arbitrárias facilmente lembradas de 5, 10, 100 e >100m a fim de diferenciar formas “pequenas”, “médias”, “grandes” e “muito grandes”. A forma é o outro dado de primeira ordem. As duas principais categorias da forma são 2-D e 3-D (Tabela 5.1).

Dois aspectos das formas de leito são considerados importantes, mas não devem ser incorporados formalmente no nome das formas de leito, quais sejam: 1) fatores relacionados com a sobreposição, tais como, tamanho e orientação mútua das duas formas de leito, simples e compostas (as “compostas” apresentam formas de leito sobrepostas; enquanto as “simples” não apresentam); e 2) granulometria e tipo de sedimento. Dados de terceira ordem são considerados “úteis” e devem ser fornecidos sempre que possível (Ashley 1990).

**Tabela 5.1** - Esquema de classificação recomendada pelo Simpósio do SEPM para formas de leito e acamamentos (Ashley 1990).

<b>DUNAS SUBAQUOSAS</b>				
<b>Dados de Primeira Ordem (necessários)</b>				
Tamanho	Pequenas	Médias	Grandes	Muito Grandes
Comprimento ⇒	0.6-5 m	5-10 m	10-100 m	>100 m
Altura * ⇒	0.075-0.4 m	0.4-0.75 m	0.75-5 m	>5 m
Forma ⇒	2-D (Bi-dimensionais)			
	3-D (Tri-dimensionais)			
<b>Dados de Segunda Ordem (importantes)</b>				
- Sobreposição ⇒ simples ou composta (tamanho e orientação relativa)				
- Características de sedimento (tamanho, tipo)				
<b>Dados de Terceira Ordem (úteis)</b>				
- Perfis da forma de leito (comprimentos e ângulos de inclinação do <i>stoss</i> e <i>lee</i> )				
- Deposição da camada (fração da camada coberta pelas formas de leito)				
- Estrutura do fluxo (características de tempo-velocidade)				
- Intensidade relativa dos fluxos opostos				
- História do comportamento de migração das dunas (acrecção vertical e horizontal)				
* Altura calculada usando-se a equação $H = 0.0677L^{0.8098}$ (Flemming 1988).				

### 5.3.1. FORMAS DE LEITO NO ESTUÁRIO POTENGI

A fácies sedimentar dominante, composta de areia e areia com cascalho esparso capeia a maior parte da área de estudo. Em termos gerais, o leito do estuário Potengi é caracterizado por *dunas* pequenas a grandes, com comprimentos de onda na razão de 2.87 - 95.12m, alturas de até 4.3m e com variada sinuosidade e sobreposição. A classificação de formas de leito aqui utilizada, segue as indicações de Ashley (1990), incluindo as revisões de Dalrymple & Rhodes (1995) baseadas na morfologia. De acordo com esta classificação, todas as formas de leito transversais em larga escala (excluindo os *ripples* e *antidunas*) ocupam uma posição similar na seqüência do regime de fluxo inferior, que posteriormente é modificada por dados tais como granulometria, forma e sobreposição. A ampla variedade de formas reflete as várias condições hidrodinâmicas, assim como o tipo de sedimentos. Na zona do canal principal, as *dunas* registradas foram principalmente de médias a grandes em relação ao comprimento de onda e altura, além de apresentarem outras feições de sobreposição simples e compostas.

De acordo com o diagrama de classificação do regime de fluxo (Figura 5.14), quando o *número de Froude* é  $<1$ , as forçantes atuantes no sistema são classificadas como de regime de fluxo inferior, originando formas de leito como os *ripples* e *dunas*, e quando *número de Froude* for  $>1$ , podemos considerá-lo como regime de fluxo superior, propiciando condições para a formação do *leito plano* e *antidunas*.

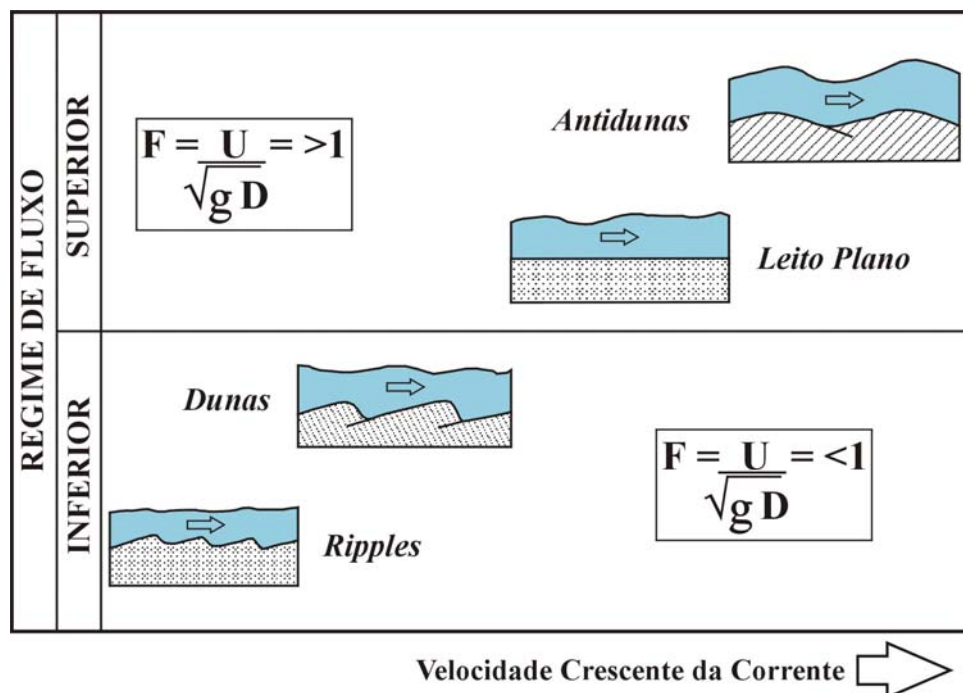


Figura 5.14 - Diagrama de regime de fluxo para determinação das formas de leito.

Onde **F** é o *número de Froude*, **U** a velocidade da corrente em m/s, **D** a profundidade em metros e **g** o valor da gravidade.

O comprimento das *dunas* registradas foi extraído diretamente dos sonogramas quando as cristas das *dunas* estavam paralelas à linha de levantamento, fazendo-se correções apropriadas da distorção através da linha, com a ajuda de marcas de escala diagramada que neste estudo foram separadas a cada 88 e 214 metros, para os equipamentos de varredura lateral da *Odom* e *EG&G*, respectivamente.

Para se obter a altura das *dunas* com os registros sonográficos adquiridos com o sensor da *EG&G* fez-se necessário medir a sombra acústica ( $L_s$ ) produzida, a altura do peixe rebocado acima do fundo ( $H_f$ ) e a distância inclinada do peixe rebocado até à *duna* ( $R_s$ ), pois ao contrário do comprimento de onda, a altura das *dunas* ( $H_i$ ) não pode ser medida diretamente dos sonogramas. Com a ajuda destas medidas, a altura de uma *duna* pode ser calculada como se segue:

$$H_i = \frac{H_f \times L_s}{R_s + L_s}$$

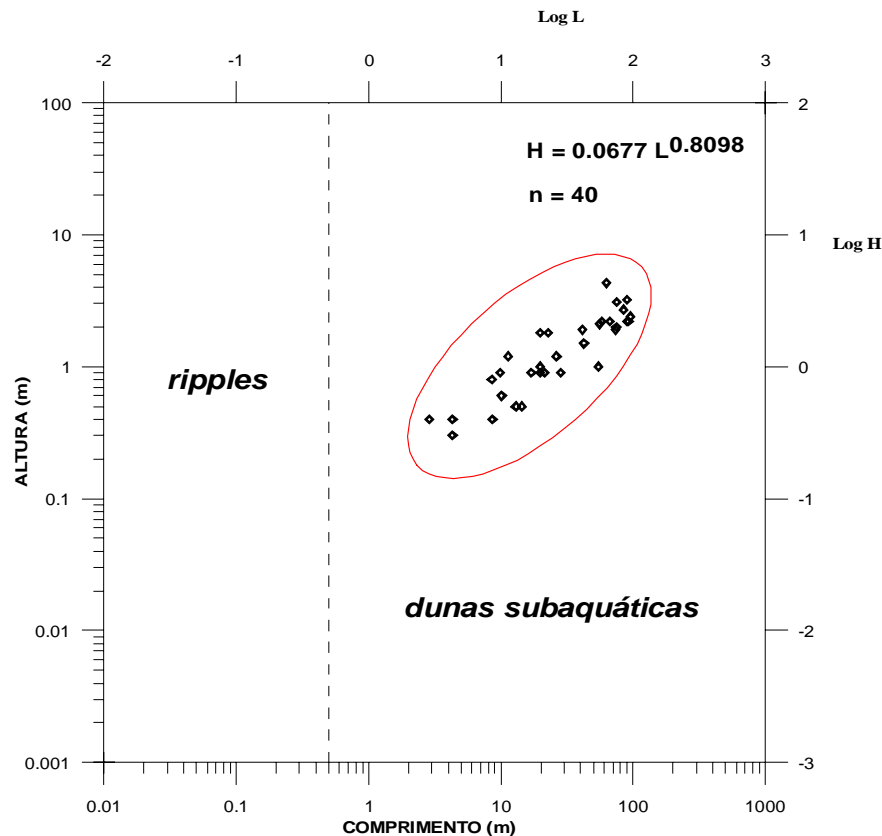
Contudo, isto só é possível se o registro sonográfico mostrar uma zona de grande reflexão com uma zona de sombras acústicas por trás.

Nos sonogramas registrados com o sensor da *Odom* modelo *HYDROTRAC*, operando na frequência de 200 kHz, a altura das formas de leito “*dunas*” foi medida diretamente do registro, a partir do primeiro retorno do sinal acústico do fundo, sendo necessárias apenas algumas correções devido ao ângulo de 45° criado entre o feixe acústico e o fundo, o chamado *ângulo de incidência*.

Aplicando-se o diagrama log-log da altura ( $H$ ) *versus* comprimento de onda ( $L$ ) proposto por Flemming (1988), tornou-se possível fazer a diferenciação entre as formas de leito tipo *ripples* e *dunas*, ambas de regime de fluxo inferior com base em uma série de 40 formas de leito, com comprimentos >1m e <100m (Figura 5.15). Os dados variam desde águas rasas de 3m até profundas de 16m, com fluxo bidirecional.

Analisando-se o gráfico abaixo, observou-se que ao longo do canal estuarino do rio Potengi, as menores formas de leito foram identificadas como *dunas* com pequeno comprimento de onda.





**Figura 5.15** - Diagrama de Flemming (1988) do log-log da altura (H) versus comprimento (L) de 40 formas de leito subaquáticas transversais ao fluxo no estuário Potengi.

A maioria das *dunas*, registradas pelos dois tipos de sonar de varredura lateral, revelou fortes assimetrias que são indicativas da dominância de correntes de enchente e vazante da maré. A assimetria das formas de leito ao longo do canal estuarino é um forte indicativo da influência marinha no estuário, sendo assim o principal controlador da sedimentação ao longo destes ambientes dominados por maré.

O levantamento com o sonar de varredura lateral revelou mudanças abruptas, até então não identificadas, na morfologia das formas de leito da área de estudo; tanto o comprimento das ondas das *dunas* como a altura especialmente, variaram em tamanho ao longo de distâncias de alguns metros, como também a sinuosidade das *dunas*. Estas mudanças abruptas são melhor ilustradas por meio de sonogramas. A figura 5.17 é um sonograma que apresenta a linha de levantamento longitudinalmente ao canal principal (localização mostrada na Figura 5.16) que mostra claramente mudanças da morfologia da forma de leito revelando *dunas* com pequenos comprimentos de ondas (2-3m), seguidas por *dunas* com médio comprimento de ondas de aproximadamente 5m. As mudanças na morfologia das formas de leito, mostradas na figura 5.17, estão relacionadas com mudanças na batimetria.

Mudanças abruptas na morfologia da forma de leito e no tipo de sedimento do fundo relacionadas com a variação na batimetria também foram registradas em outros locais. Por exemplo, o sonograma mostrado na figura 5.18, adquirido em frente ao Canal do Baldo com direção para NE, revela a presença de um leito plano, ocorrendo também *dunas* com pequeno e médio comprimento de ondas (4-10m). Este padrão relativamente plano é caracterizado por sedimentos finos provenientes do Canal do Baldo, típico de assoreamento do canal principal de navegação por partículas de resíduos sólidos lançados no rio Potengi.

Uma mudança igualmente abrupta, não só na morfologia das formas de leito mas também no tipo de sedimentos, revelada pelas intensidades de tons escuros e claros, é ilustrada na figura 5.19, com o sensor da *Odom*. Este registro mostra mudanças abruptas nas intensidades de tons, com tons mais escuros sendo causados por sedimentos consolidados, relacionados a afloramento submerso da Formação Barreiras e as intensidades de tons mais claras sendo causadas por sedimento mais fino.

A figura 5.20 apresenta *dunas* médias a grandes com comprimentos de ondas da ordem de 5-55m e alturas variando de 0.6 a 1.5m. Observa-se também que os grandes afloramentos rochosos da Formação Barreiras formam obstáculos que modificam as formas de leito do tipo *dunas*, que variam de tamanho, altura e direção devido as grandes variações na velocidade e direção das correntes.

Os sonogramas revelaram feições de escala muito pequena sobrepostas em *dunas* com grande comprimento de onda variando de 19 a 92m (Figuras 5.21 e 5.23). No segmento retilíneo do canal estuarino observa-se *dunas* com médio comprimento de ondas (Figura 5.22).

Comparando-se os sonogramas da figura 5.23 e 5.24, levantados com o sensor da *Odom* e *EG&G*, respectivamente, observa-se que no sonograma adquirido pela *Odom*, as formas de leito só foram possíveis de serem visualizadas em 2-D, enquanto com o sonar da *EG&G* a crista das *dunas* sinuosas podem ser visualizadas em 3-D. Por outro lado, a medição da altura das formas de leito é mais precisa e confiável com os registros adquiridos com o sensor da *Odom* do que com o sensor da *EG&G*, no qual altura é medida através da sombra acústica de cada feição (Figura 5.24).

Nos dois sonogramas podemos observar com clareza a depressão escavada no leito pelo vórtice criado pelo espigão do 17º G.A.C. Na figura 5.24, na zona da depressão,

podemos visualizar a morfologia do fundo influenciada e controlada pela movimentação circular do fluxo turbulento.

A figura 5.25 apresenta as maiores *dunas* identificadas ao longo do estuário entre Ponte do Igapó e a foz. Nesta região existem apenas *dunas* com grande comprimento de ondas variando de 66 - 92 metros e altura de 2.2 - 2.7 metros.

Finalmente, a figura 5.26 revela uma feição típica de assinatura acústica das rochas praias “*beachrocks*” tendo como características os tons escuros no registro e a sombra acústica gerada em tons mais claros. Na foz do estuário Potengi, além das rochas praias ocorrem sedimentos grossos com fragmentos de conchas calcárias.

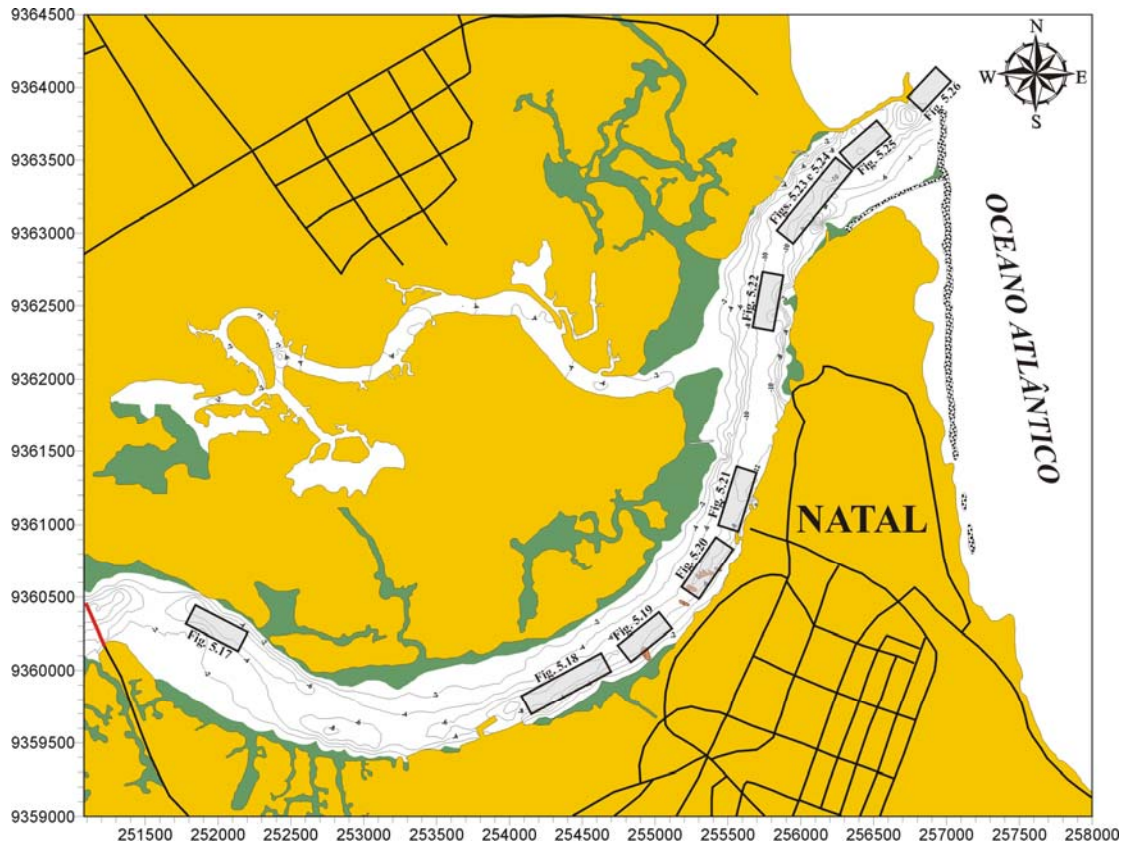
### 5.3.2. FORMAS DE LEITO NA PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE À FOZ DO RIO POTENGI

Formas de leito em grande escala ocorrem em plataformas continentais rasas, terrígenas ou carbonáticas e em plataformas epicontinentais que são afetadas por fortes correntes geostroficas, ondas de tempestades ocasionais e/ou correntes de maré. Próximo ao fundo, as velocidades atingem tipicamente 0.5 - 1.5 m/s (Mc Cave 1971; Harms et al. 1974; Flemming 1978; Field et al. 1981).

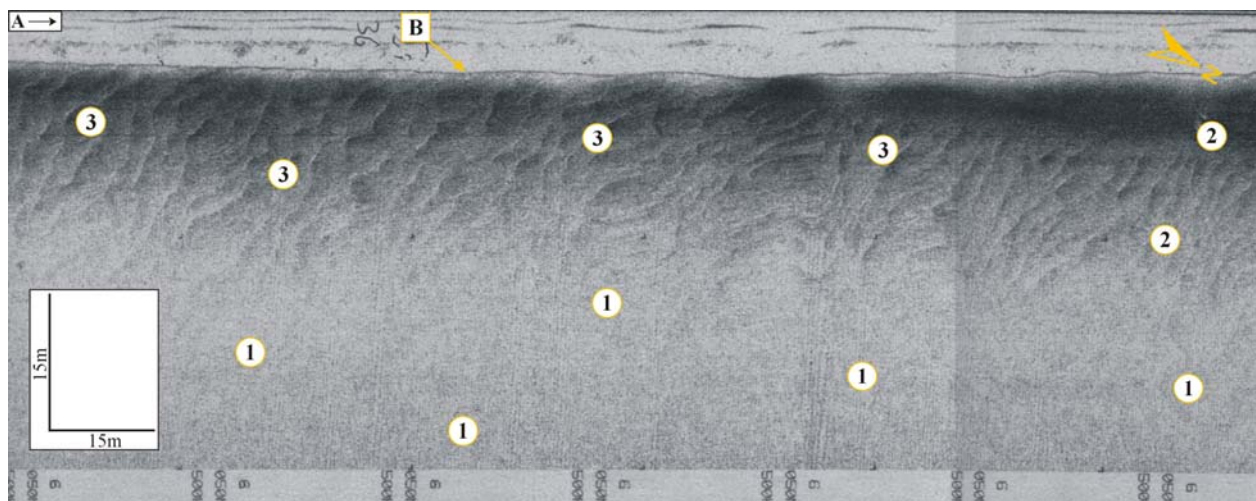
Perto da linha de costa, ondas rasas formam as dunas subaquáticas de grande escala que geram correntes oscilatórias e unidirecionais que podem produzir formas de leito 2-D ou 3-D com comprimento de onda máximo de 1-3 m. A simetria da forma de leito e a direção da migração refletem a dominância relativa das correntes em direção à costa “*onshore*” versus correntes em direção ao mar “*offshore*”.

As profundidades de água nas plataformas continentais permitem o desenvolvimento de formas de leito de dimensões variadas (Flemming 1978; Stride 1982; Harris et al. 1986). A geometria das grandes formas de leito reflete as forças relativas das correntes dominantes e opostas e, em alguns casos, a modificação das ondas. Sob a influência de fortes correntes unidirecionais, ou de correntes de maré bidirecionais onde os vetores do fluxo oposto são fortemente assimétricos, as formas de leito marinhas podem desenvolver avalanches de 30-35° (Harms et al. 1974; Flemming 1978, 1980, 1982). Contudo, sob a influência de correntes de maré bidirecionais mais simétricas, as formas de leito têm tipicamente declives mais suaves, geralmente menores que 10° mas ocasionalmente podendo ultrapassar os 20° (Stride 1982; Harris et al. 1986). As formas

muito grandes são relativamente estáveis, nas escalas de tempo de meses ou anos, devido ao volume de sedimentos nelas acumulado; já as formas menores sobrepostas são mais dinâmicas, respondendo às flutuações das marés diárias (Jones et al. 1965; Bokuniewicz et al. 1977; Allen 1980; Flemming 1980; Langhorne 1982; Stride 1982; Amos & King 1984; Harris & Collins 1985).

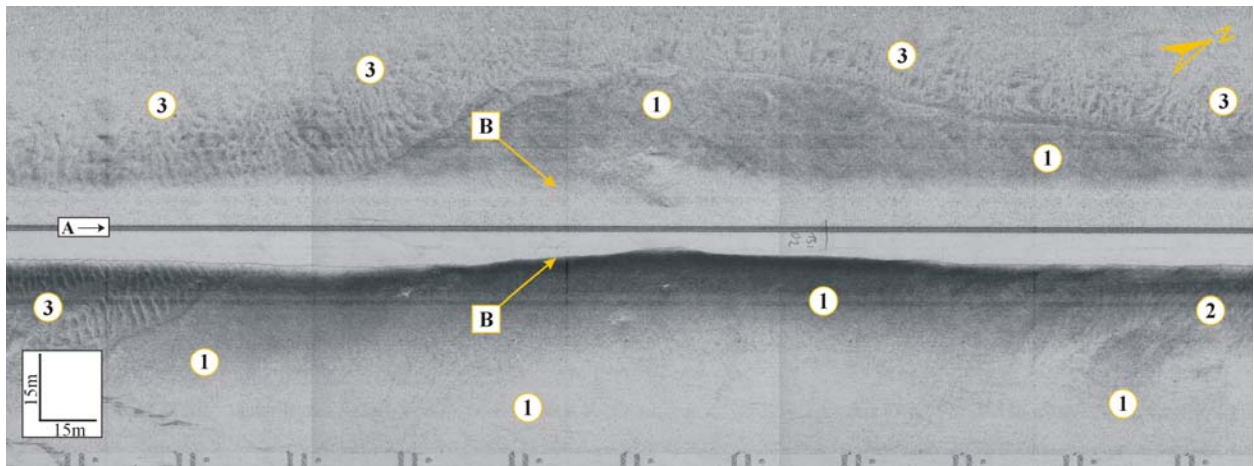


**Figura 5.16** - Batimetria simplificada da área de estudo e localização das figuras 5.17 a 5.26.

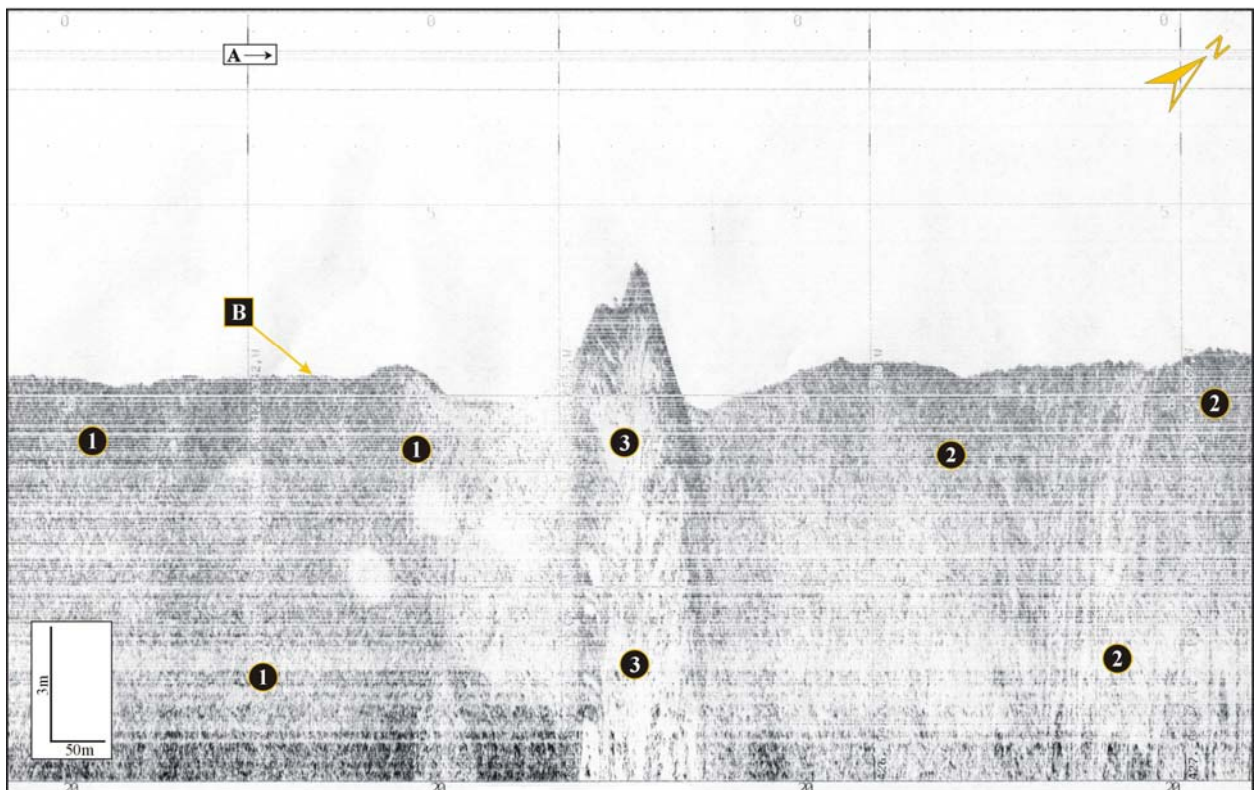


**Figura 5.17** - Sonograma registrado com o sonar de varredura lateral da EG&G, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) Dunas com pequeno comprimento de ondas e (3) Dunas com médio comprimento de ondas, para localização ver figura 5.16.

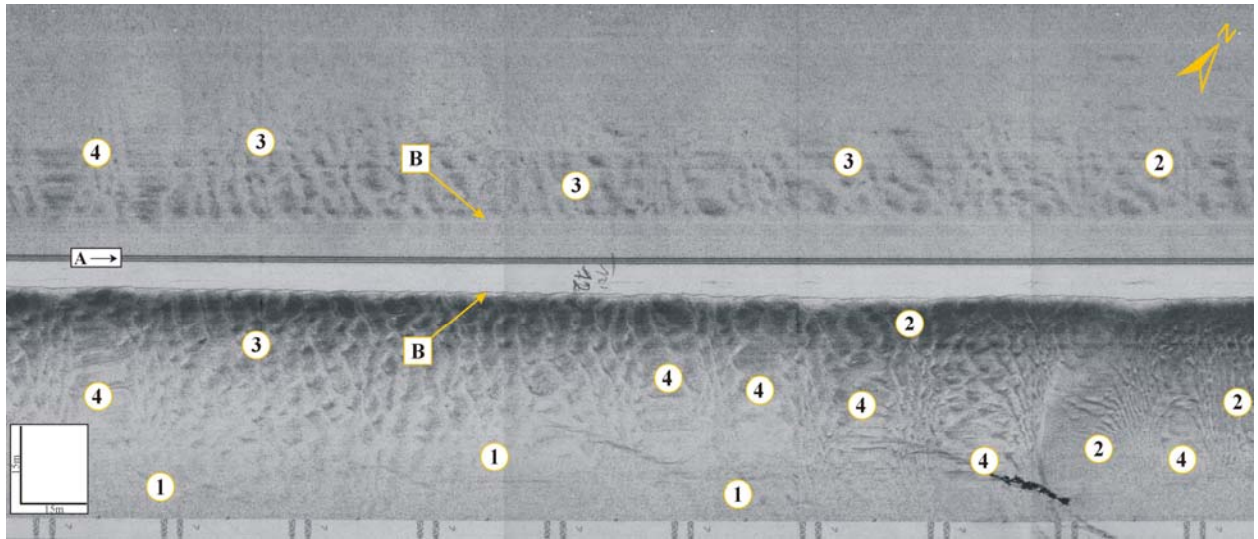




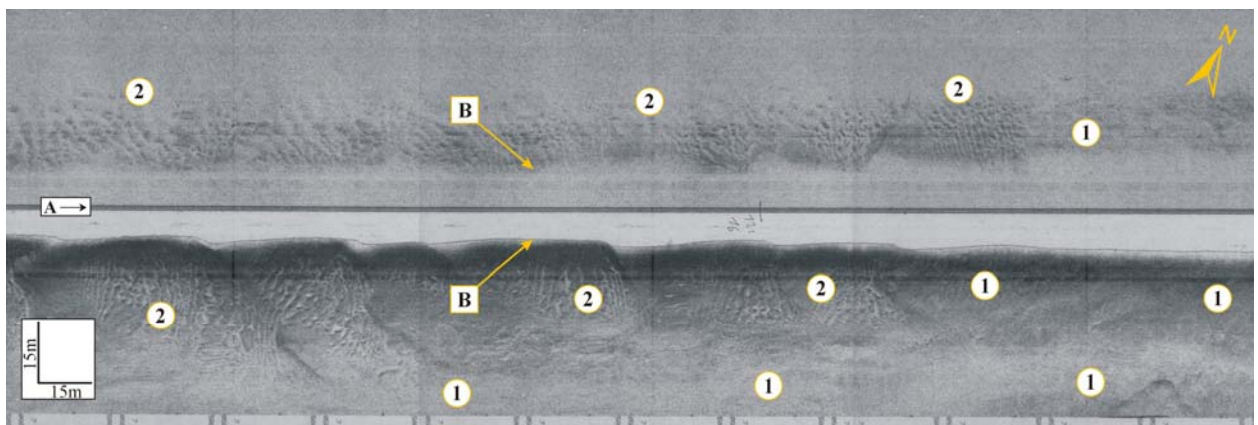
**Figura 5.18** - Sonograma registrado com o sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com a batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino proveniente dos dejetos sólidos lançados “*in natura*” no rio Potengi, (2) *Dunas* com pequeno comprimento de ondas e (3) *Dunas* com médio comprimento de ondas, para localização ver figura 5.16.



**Figura 5.19** - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da *Odom*, operando na frequência de 200 kHz, com *range* de 20m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) *Dunas* com médio comprimento de ondas e (3) Afloramento submerso da Formação Barreiras denominado na carta batimétrica como a Pedra do Oitizeiro, para localização ver figura 5.16.

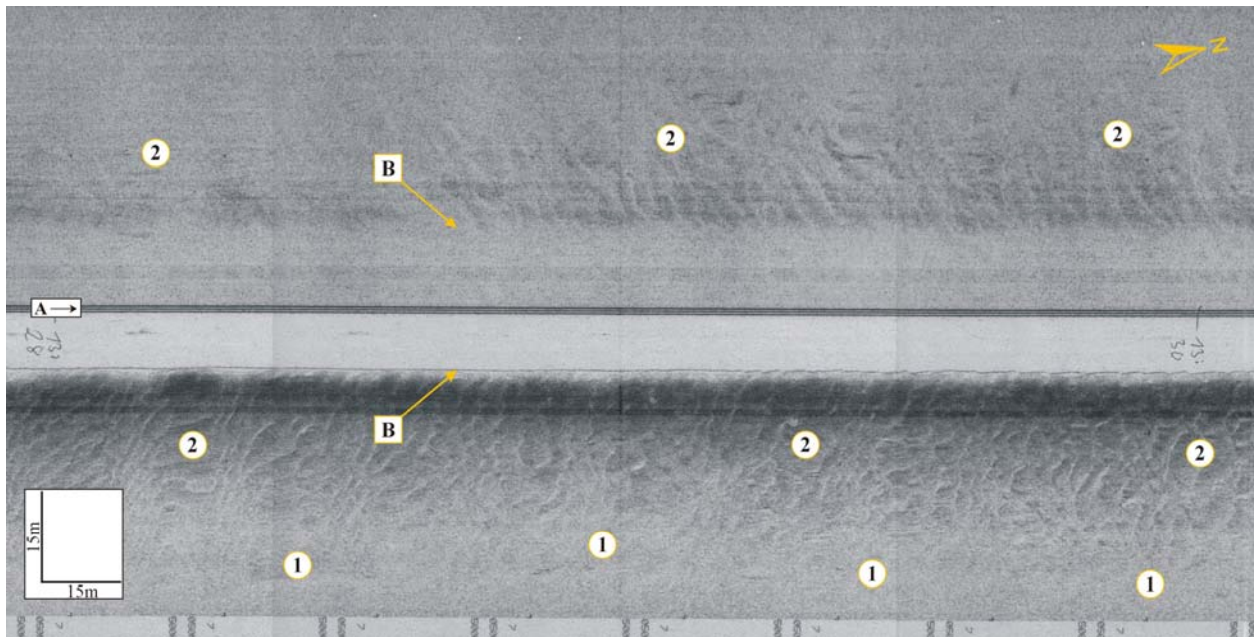


**Figura 5.20** - Sonograma registrado com o sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) *Dunas* com médio comprimento de ondas, (3) *Dunas* com grande comprimento de ondas e (4) Afloramentos submersos da Formação Barreiras, para localização ver figura 5.16.

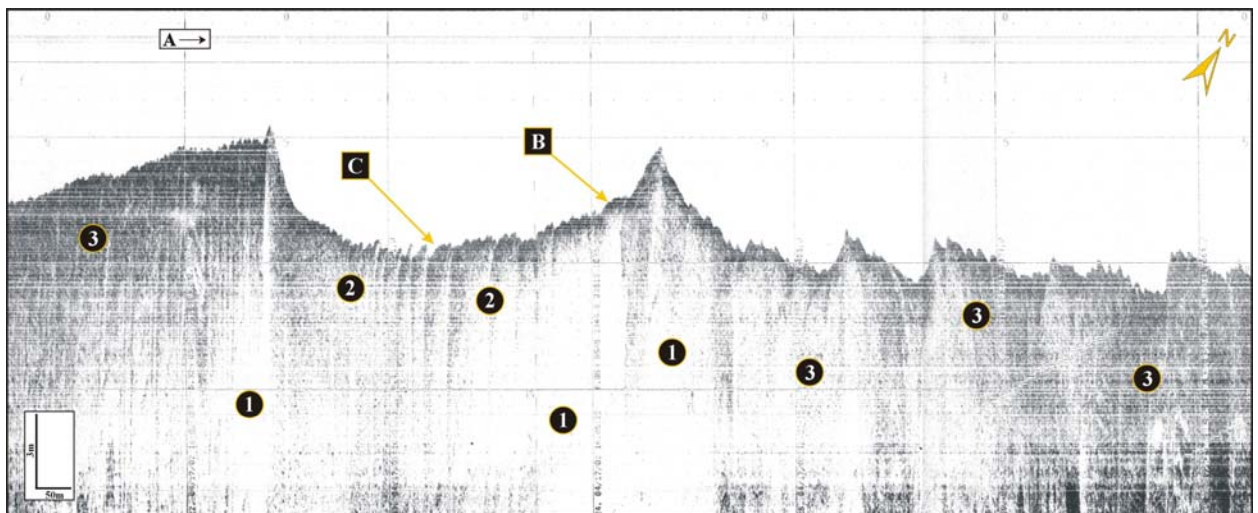


**Figura 5.21** - Sonograma adquirido com o sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito e tipo de sedimentos relacionados à batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) *Dunas* com grande comprimento de ondas, observando-se a ocorrência de sobreposição de formas de leito menores assimétricas em decorrência da ação das correntes de maré de enchente e vazante, para localização ver figura 5.16.



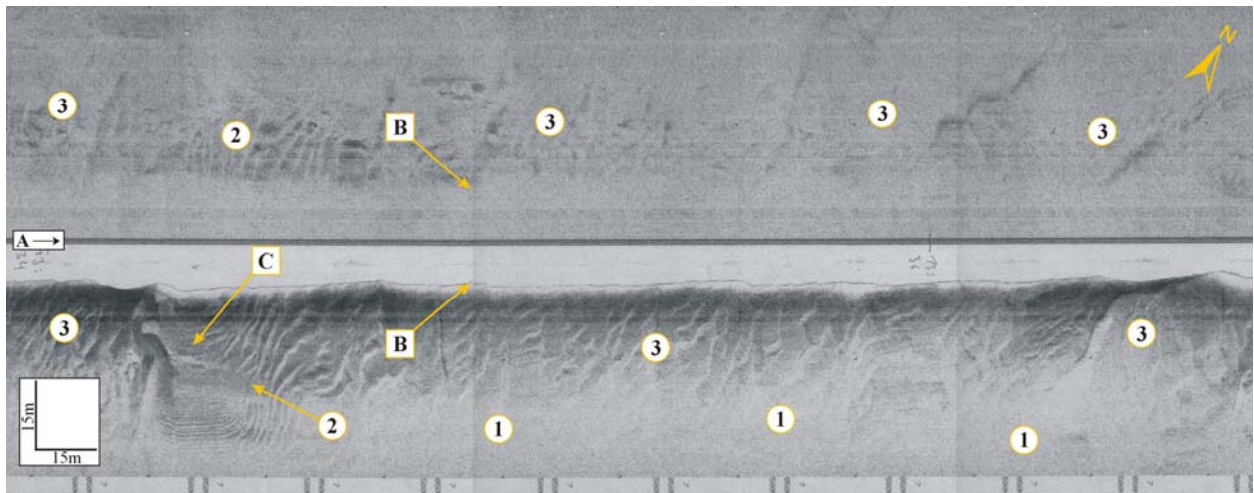


**Figura 5.22** - Registro sonográfico adquirido com o sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, apresentando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento fino e (2) *Dunas* com médio comprimento de ondas, para localização ver figura 5.16.

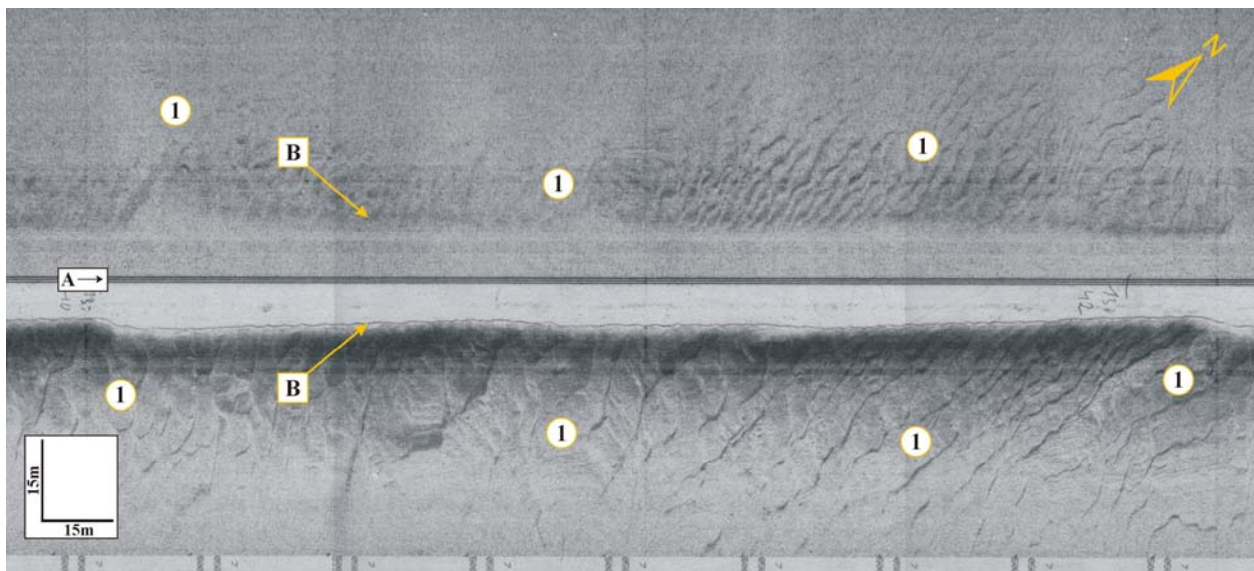


**Figura 5.23** - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da *Odom*, operando na frequência de 200 kHz, com *range* de 20m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (C) Depressão criada pelo vórtice de fluxo turbulento originado pelo espigão do 17° G.A.C, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) *Dunas* com médio comprimento de ondas e (3) *Dunas* com grande comprimento de ondas, apresentando outras morfologias de pequeno porte sobrepostas, para localização ver figura 5.16.

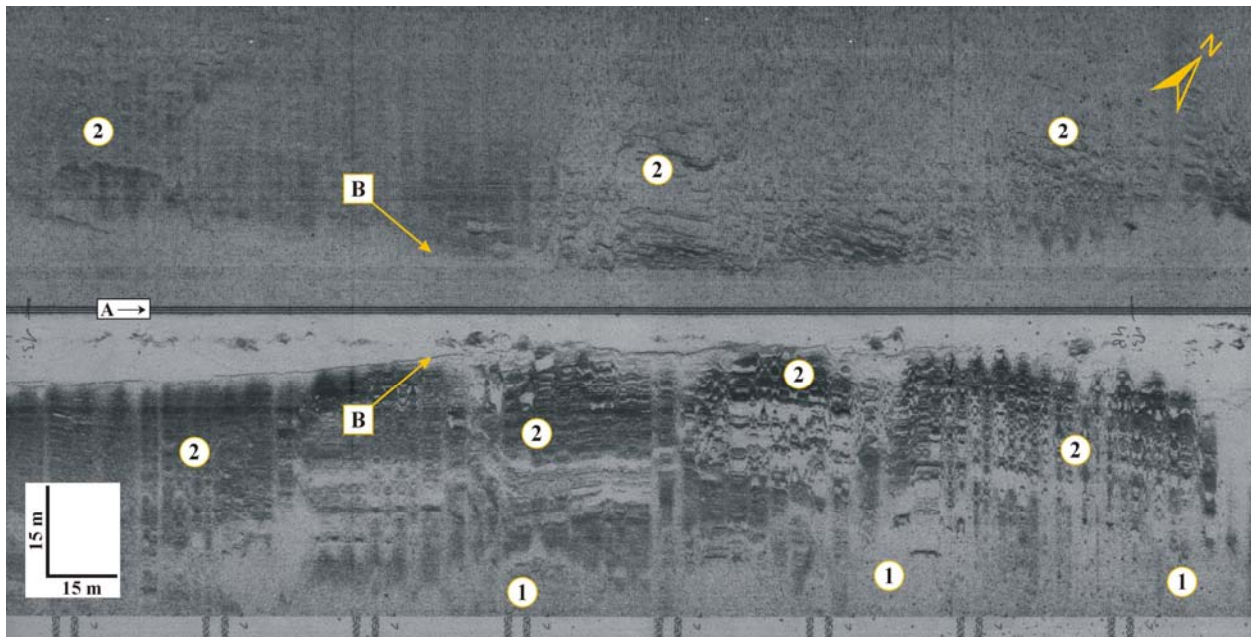




**Figura 5.24** - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (C) Assimetria irregularmente descontínua com forma circular originada pelo vórtice do 17° G.A.C, (1) Leito plano / sedimento fino, (2) *Dunas* com médio comprimento de ondas e (3) *Dunas* com grande comprimento de ondas, apresentando outras feições de fundo de pequeno porte sobrepostas, para localização ver figura 5.16.



**Figura 5.25** - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) *Dunas* com grande comprimento de ondas, apresentando outras feições de fundo de pequeno porte sobrepostas, para localização ver figura 5.16.



**Figura 5.26** - Sonograma adquirido através do sonar de varredura lateral da *EG&G*, operando na frequência de 500 kHz, com *range* de 50m, mostrando mudanças abruptas na morfologia da forma do leito relacionadas com mudanças na batimetria. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Leito plano / sedimento grosseiro e (2) Rochas praias “*beachrocks*” na foz do rio Potengi, reforçando a hipótese de que o rio não desaguava no local atual, para localização ver figura 5.16.

Através da imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 (2001) utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional *sunangle* ( $247^{\circ}\text{Az}$  e  $17^{\circ}$  de inclinação solar) foi possível identificar grandes formas de leito na plataforma continental interna e intermediária até uma profundidade de aproximadamente 30 metros (Figura 5.27). Analisando-se outras imagens, estas formas de fundo são bem estáveis na escala do tempo apresentando comprimentos de onda em torno de 350 metros, sendo classificadas como dunas com comprimento de onda muito grande, de acordo com Ashley (1990).

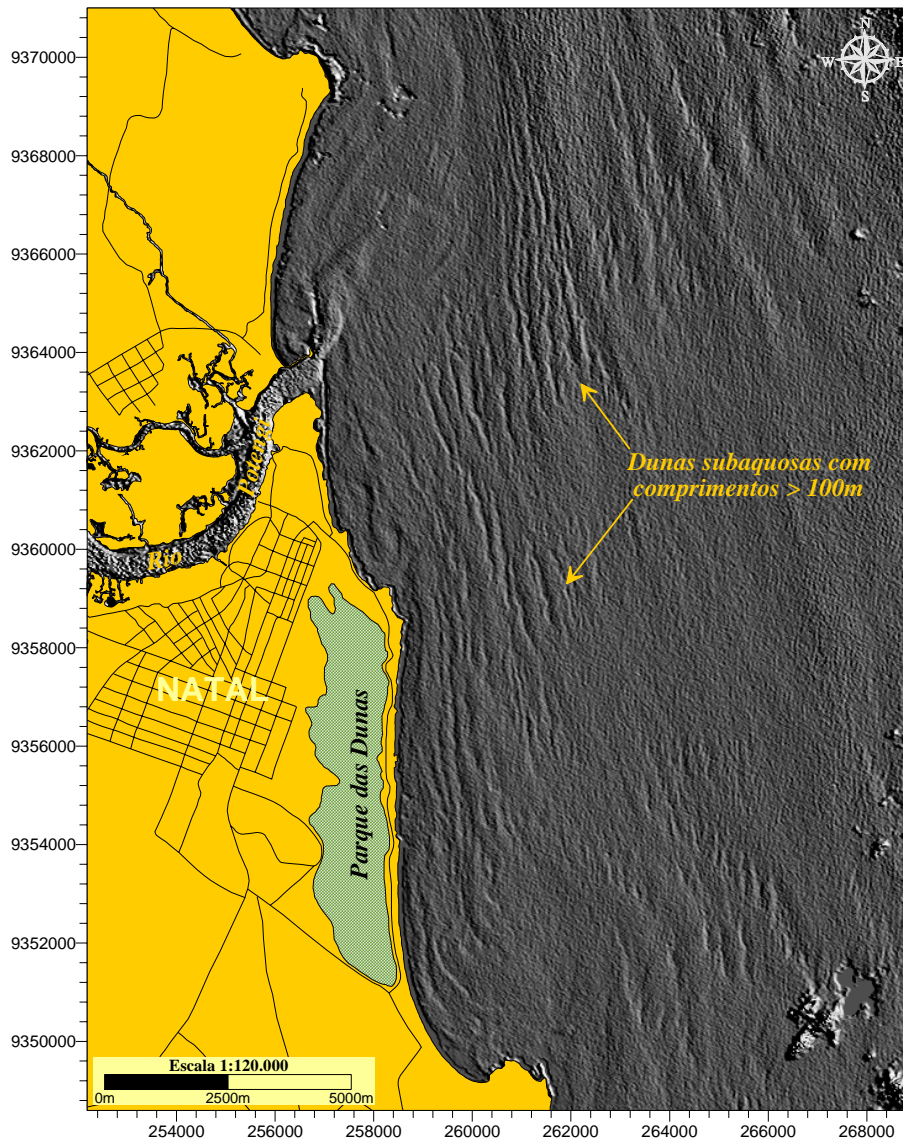
### 5.3.3. OUTRAS FEIÇÕES

Segundo Coutinho (1986), os estuários são locais onde se concentra um grande número de atividades urbanas e industriais que provocam modificações na geometria, nas margens e na qualidade da água. A resposta do meio estuarino a uma intervenção humana se manifesta sob forma de reações pouco conhecidas.

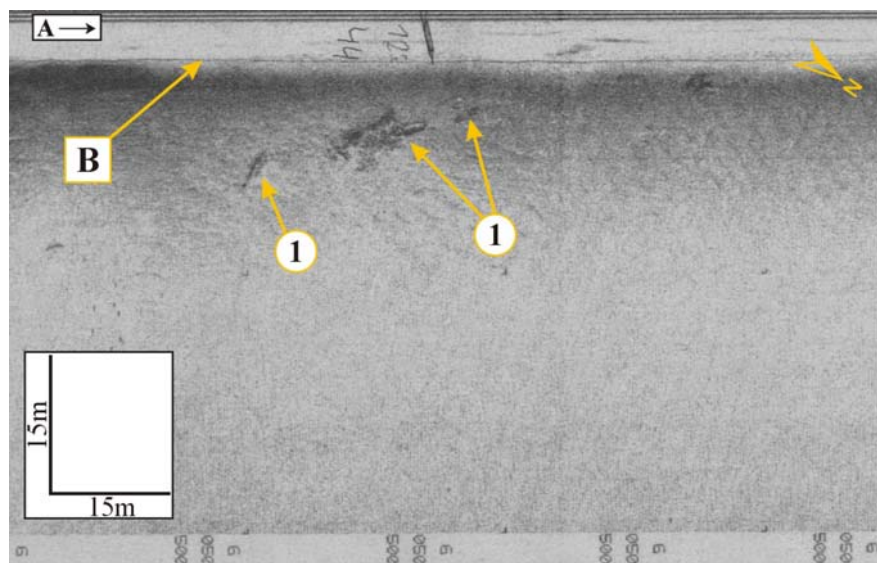
Na área estudada verifica-se que a ação antrópica é responsável, ainda que indiretamente, por uma série de outras modificações no leito estuarino.

A presença de embarcações naufragadas no estuário Potengi (Figura 5.28) e os espigões ou enrocamentos são elementos comuns nas margens do rio Potengi (Figura 5.29).

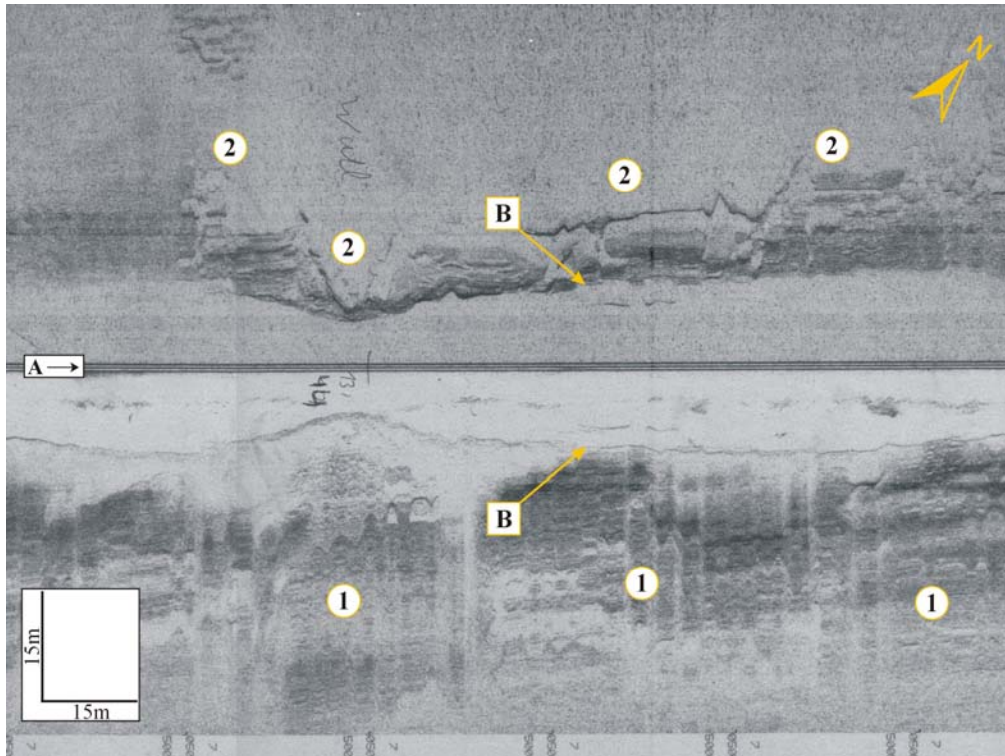




**Figura 5.27** - Imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 (2001) utilizando a banda 2 submetida ao filtro direcional *sunangle* ( $247^{\circ}$ Az e  $17^{\circ}$  de inclinação solar), mostrando formas de leito estáveis em grande escala.



**Figura 5.28** - Sonograma mostrando (1) embarcações naufragadas.



**Figura 5.29** - Sonograma mostrando a ação antrópica na morfologia do leito. (A) Linha de levantamento, (B) Primeiro retorno do fundo, (1) Rochas praias “*beachrocks*” e (2) Paredão do guia-corrente (enrocamento) submerso, ambos localizados na foz do rio Potengi.

## 5.4. ESTUDO DOS SEDIMENTOS RECENTES

### 5.4.1. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

O resultado da análise granulométrica das amostras de sedimentos de fundo do rio Potengi mostrou que os sedimentos arenosos são predominantes, tendo sido reconhecidas seis fácies: areia, areia com cascalho esparsos, areia com cascalho, areia lamosa com cascalho esparsos, areia siltosa e silte arenoso (Anexo 04). Curvas acumulativas para cada uma destas fácies podem ser visualizadas na figura 5.30. A maioria destas curvas, principalmente aquelas correspondentes às amostras essencialmente arenosas, mostra um traçado quase vertical e retilíneo, indicando o bom selecionamento do material. As amostras com menor grau de selecionamento são representadas por curvas ligeiramente inclinadas.

Utilizando-se o *software* SAG (Sistema de Análise Granulométrica - UFF), calcularam-se os parâmetros estatísticos (mediana, diâmetro médio, desvio padrão, assimetria e curtose) e construção de histogramas para amostras sedimentares. Os parâmetros estatísticos e a classificação textural baseiam-se no método de Folk (1974).

#### **5.4.1.1. Mediana**

Os valores obtidos para mediana variaram entre 0.021 e 4.577mm. Em geral os valores mais elevados estão associados a sedimentos provenientes de bancos arenosos e pontos de acreção nas margens. Os valores menores correspondem a sedimentos encontrados em locais de maior heterogeneidade das condições hidrodinâmicas.

#### **5.4.1.2. Diâmetro Médio**

Os valores de diâmetro médio referem-se à média geral do tamanho dos sedimentos, estando, portanto, associados à competência do agente transportador em relação aos processos deposicionais de uma maneira geral e à influência da fonte de suprimentos do material (Ponçano 1985).

Nos sedimentos analisados no *software* SAG verifica-se que o diâmetro médio apresenta variação entre -0.389 e 4.47 mm, ou seja, estão inseridos na classe areia fina a média. O mapa de distribuição do diâmetro médio, apresentado na figura 5.31, indica a predominância de areias médias ao longo de toda a área mapeada. Areias grossas e muito grossas ocorrem na foz do rio Potengi e no canal principal de navegação ocupando as porções mais profundas, onde foi registrada maior intensidade das correntes. As areias muito finas e finas ocupam uma área bem menos significativa ao longo dos bancos como o do Jaguaribe e das Velhas, acumulando-se nas zonas mais rasas junto às margens, onde as correntes são mais fracas. Os sedimentos com granulometria silte localizam-se preferencialmente nas margens menos inclinadas e espaiadas ao longo do canal estuarino.

Bolsões isolados de sedimentos finos constituídos por areias muito finas, encontrados junto às margens, refletem um comportamento anômalo, em geral causado por obras artificiais (pequenos diques transversais).

Em resumo, observa-se um domínio da sedimentação arenosa da foz até à Ponte do Igapó no estuário, com as areias médias e grossas capeando o fundo dos canais.

Este quadro, quando confrontado com a distribuição de correntes no estuário Potengi, permite estabelecer as seguintes conclusões:

- Na zona do canal principal de navegação com aproximadamente 8 a 10 metros de profundidade, predominam condições hidrodinâmicas fortes, em que a força das correntes de fundo podem assumir caráter erosivo fazendo aflorar sedimentos mais



antigos (Formação Barreiras) no substrato, ou mesmo permitindo o transporte e a deposição de areias mais grossas.

- Nas regiões de correntes mais fracas a moderadas, ocorrem areias finas.
- Nas áreas fora do trajeto principal das correntes, como é o caso das margens mais protegidas e espraçadas, depositam-se os sedimentos finos.

#### **5.4.1.3. Desvio Padrão**

Estes parâmetros referem-se ao grau da dispersão dos dados da distribuição granulométrica em torno do valor médio. Seu significado geológico diz respeito à capacidade das correntes em selecionar um determinado sedimento. Sua interpretação prática, porém, é ainda muito confusa (Ponçano 1985).

#### **5.4.1.4. Assimetria**

Obtida pelo afastamento do diâmetro médio em relação à mediana, há predominância, nos sedimentos, de partículas finas ou grosseiras, o que indica assimetria positiva ou negativa respectivamente.

No estuário, os sedimentos apresentam assimetria variando de -0.496 a +0.531, predominando valores em torno de -0.1076, revelando uma tendência destes sedimentos a uma distribuição simétrica.

Valores negativos de assimetria são encontrados na zona do canal principal, refletindo a predominância de sedimentos grossos onde predominam condições hidrodinâmicas mais energéticas. Os valores de assimetria positiva e muito positiva obtidos podem indicar invasão de material proveniente de outras fontes, resultando em excesso de material fino. Valores muito positivos são achados em locais abrigados junto a diques transversais, que favorecem a deposição de finos na região do canal dragado de acesso ao Porto de Natal, devido às inúmeras retiradas de sedimento ao longo dos anos, expondo um material mais fino.

#### **5.4.1.5. Curtose**

A curtose representa a medida estatística que corresponde à razão entre a dispersão das partes centrais a terminais da distribuição granulométrica.

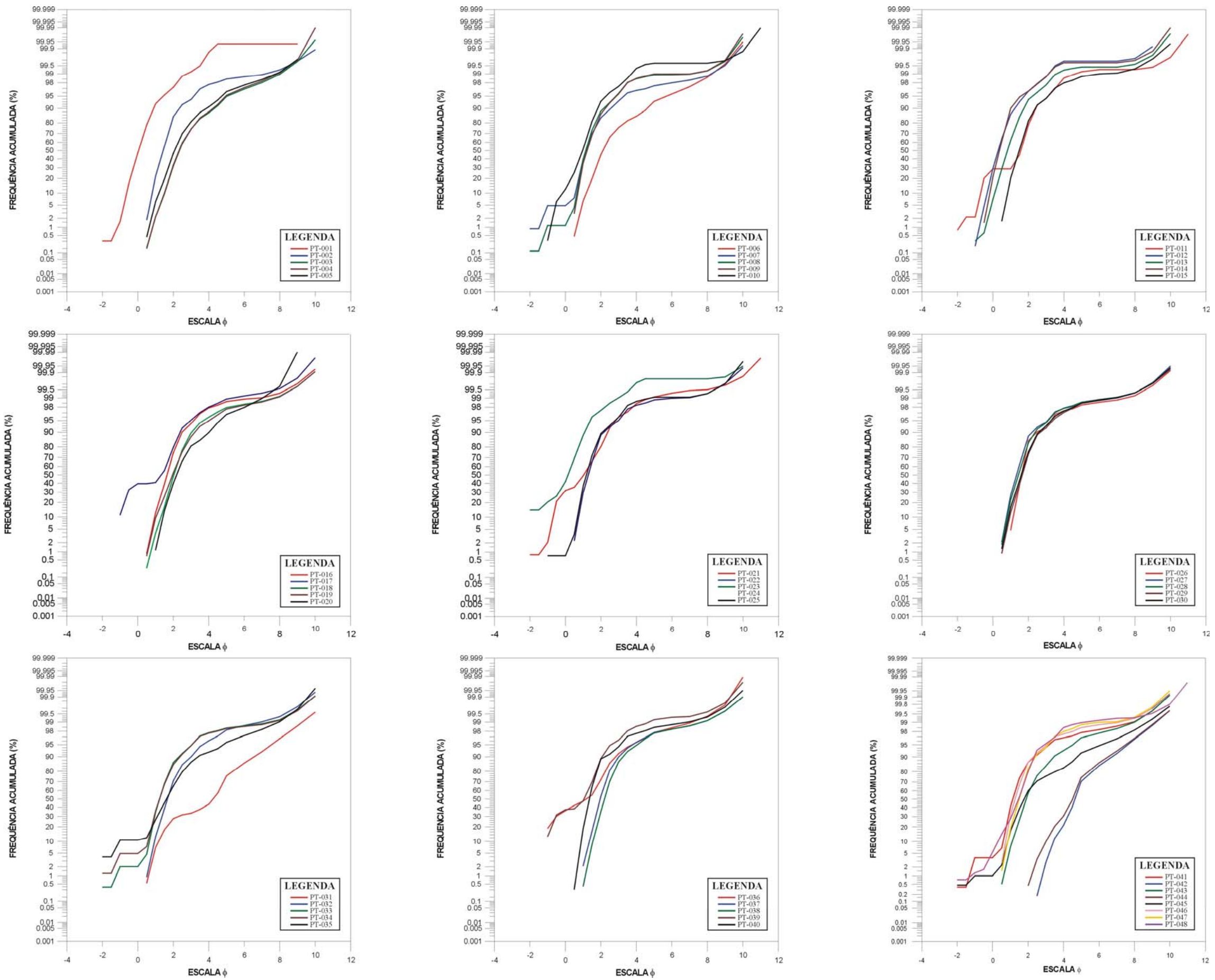


Figura 5.30 - Curvas granulométricas para as amostras PT-001 a PT-048 dos sedimentos recentes do estuário Potengi.



# MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO

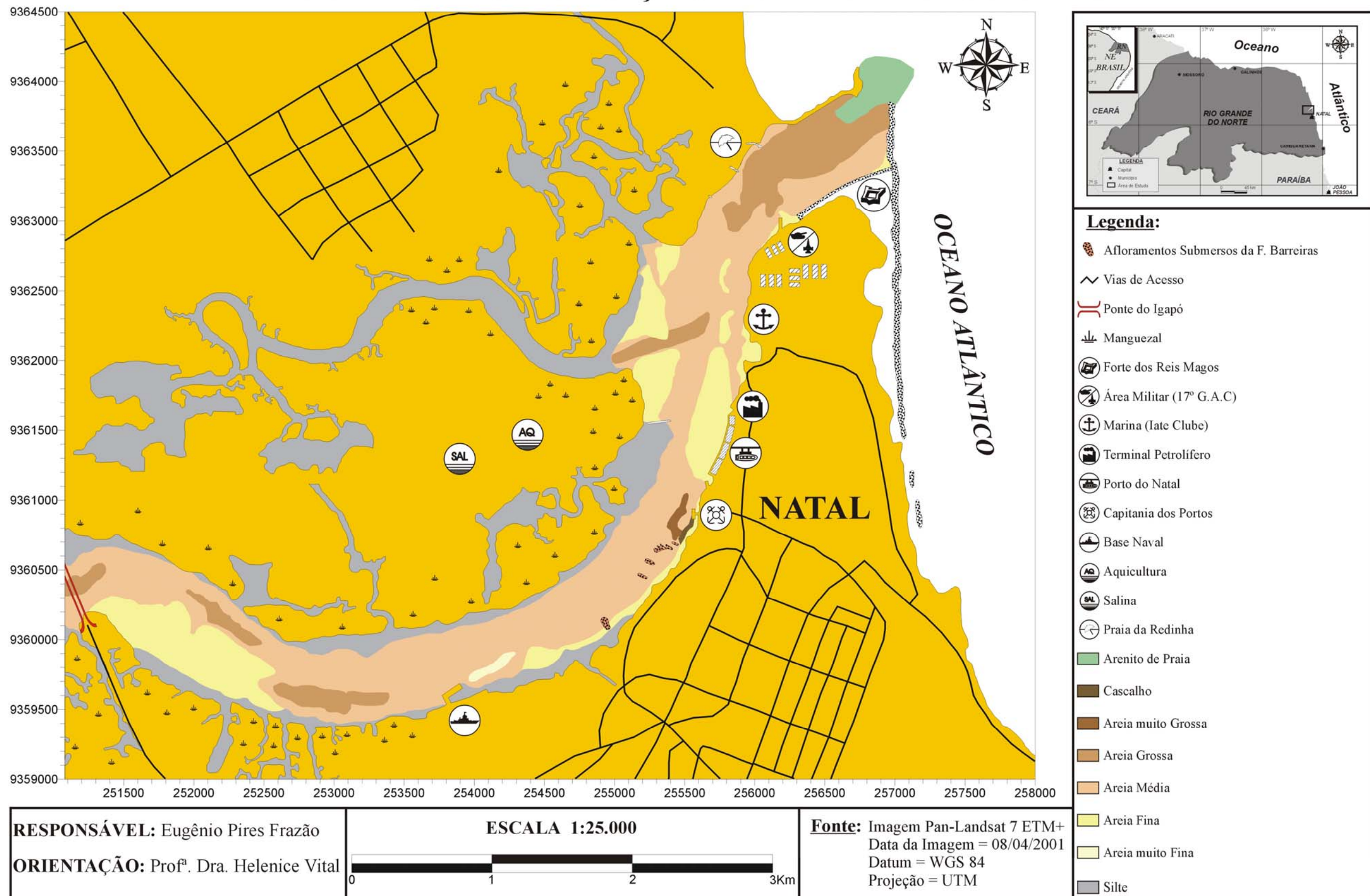


Figura 5.31 - Distribuição do diâmetro médio dos sedimentos recentes do estuário Potengi.

De uma maneira geral, as interpretações sobre os valores de curtose dizem respeito às condições de movimentação do ambiente sedimentar. Assim curvas leptocúrticas a muito leptocúrticas indicam zonas de maior energia, enquanto que curvas platicúrticas a muito platicúrticas representam zonas de menor movimentação (Cunha 1982).

Os sedimentos estuarinos mostram valores de curtose variando de 0.6 a 1.8, correspondendo a uma ampla faixa de classificação de suas curvas, englobando desde curvas platicúrticas até muito leptocúrticas.

#### 5.4.2. DISTRIBUIÇÃO DAS FÁCIES TEXTURAIS

Os sedimentos de fundo do rio Potengi foram analisados quanto à textura segundo Folk (1974), que através de um diagrama ternário define 15 principais fácies texturais, de acordo com as proporções de cascalho ( $>2\text{mm}$ ), areia ( $0.0625\text{-}2\text{mm}$ ) e lama ( $<0.0625\text{mm}$ ). Um mapa de classificação textural dos sedimentos de fundo da área de estudo pode ser observado na figura 5.32.

A fácies sedimentar principal encontrada no estuário Potengi, entre a Ponte do Igapó e sua desembocadura, foi a fácies arenosa. As áreas mais profundas do canal estuarino estão capeadas com sedimentos mais grossos, tipicamente seixos e areia com cascalho, juntamente com fragmentos de conchas calcáreas. Estes organismos, que vivem em água salgada e salobra, ocorrem em leitos espessos descendo de um nível médio de maré até uma profundidade de aproximadamente 10m.

Bancos conchíferos, constituídos de areia com cascalho e fragmentos de conchas calcárias, são observados no canal de navegação próximo à Ponte do Igapó. A presença desses bancos conchíferos havia sido anteriormente identificadas por Salim & Coutinho (1973), que observaram horizontes de conchas com três metros de espessura em furos de sondagem, realizados para a construção da ponte rodo-ferroviária de Igapó.

A partir da imagem do satélite Landsat 7 ETM+ (2001) e de fotografias aéreas oblíquas, foi possível observar o transporte da pluma dos sedimentos em suspensão do rio Potengi em direção ao mar por cerca de 3 km (Figura 5.33). As fortes correntes de maré vazante (valor médio da velocidade da corrente) direcionam a pluma de sedimentos para norte, não permitindo a acumulação de sedimentos finos ( $<0.0625\text{mm}$ ) ao longo do canal principal de navegação. No estuário Potengi, os sedimentos finos são encontrados somente próximo às margens, onde a intensidade das correntes são menores.



# MAPA DE CLASSIFICAÇÃO DE FÁCIES TEXTURAIS

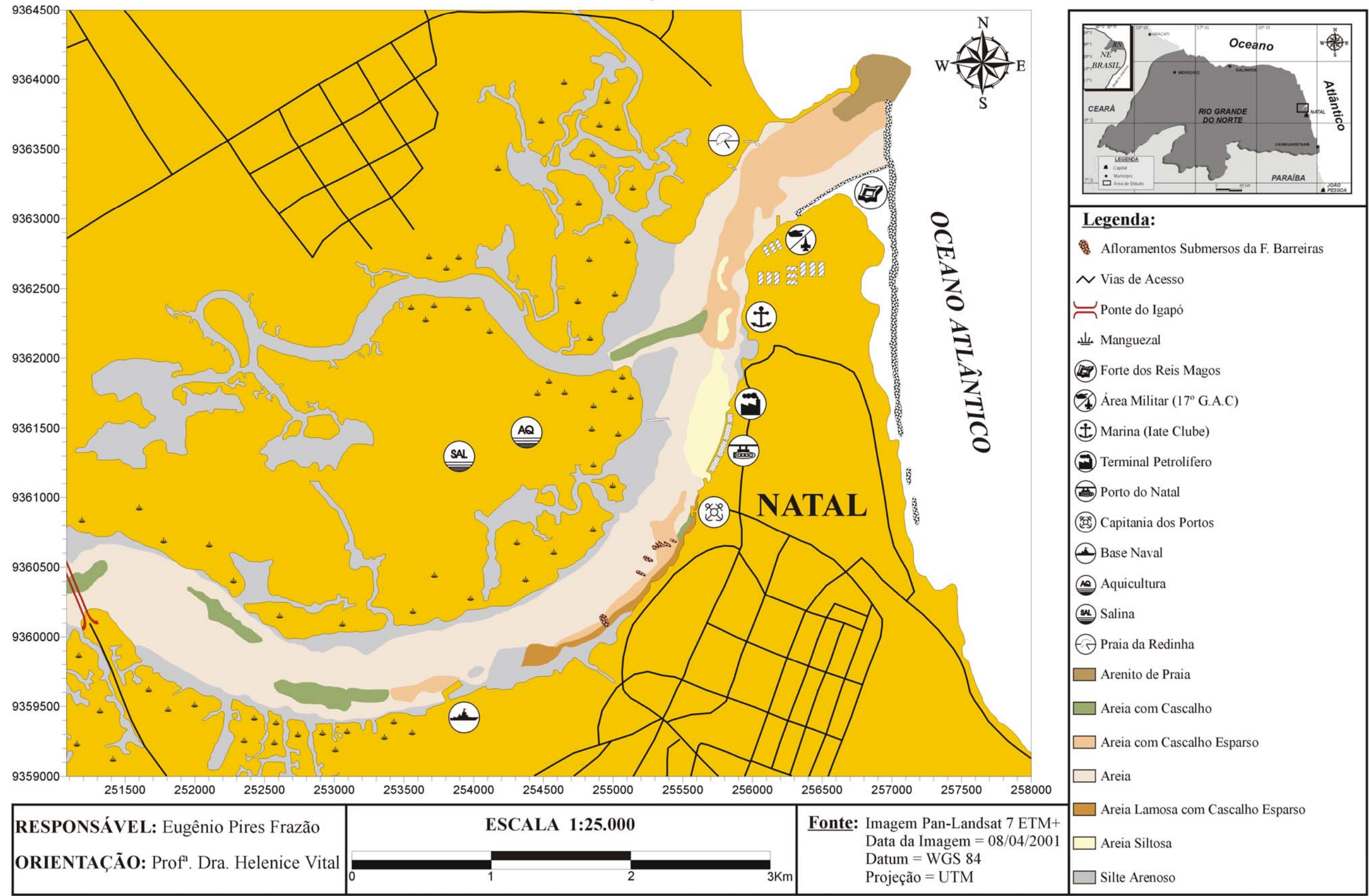
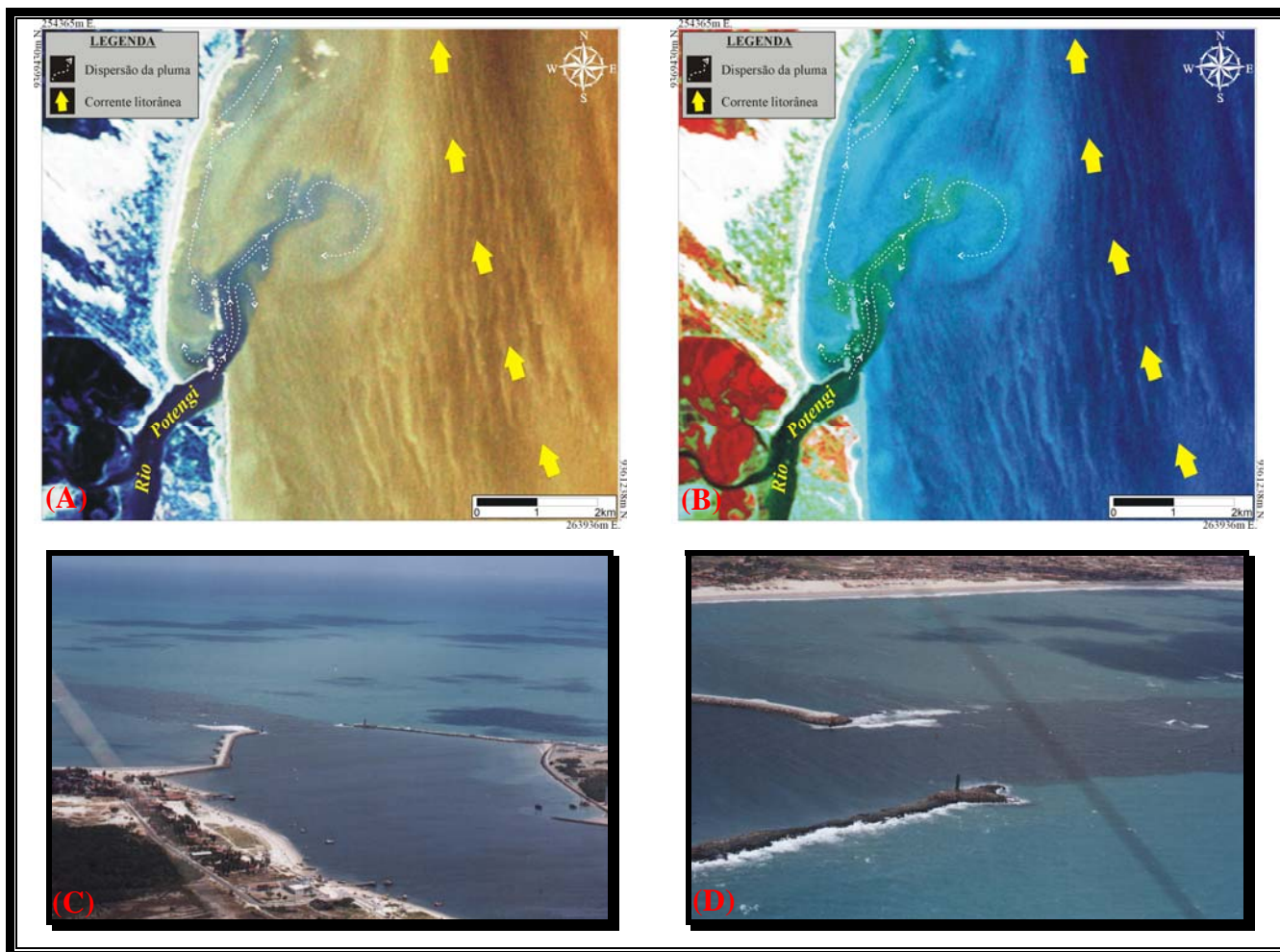


Figura 5.32 - Distribuição das principais fácies texturais no estuário do rio Potengi, segundo a classificação de Folk (1974). Os limites de fácies foram traçados a partir da integração dos dados sedimentológicos com dados sonográficos.





**Figura 5.33** - Transporte da pluma de sedimentos em suspensão do estuário Potengi em direção a plataforma, vista a partir de imagem do sensor ETM+ do Landsat 7 com composições coloridas: RGB123 (A) e RGB432 (B), além de fotografias aéreas oblíquas (C) e (D) (Fotos: Vital, nov. 2001).

Associando-se os dados batimétricos com a análise da distribuição dos sedimentos recentes foi possível individualizar duas fácies texturais de maior relevância: a) Fácies Arenosa e b) Fácies Lamosa.

#### a) Fácies Arenosa

É predominante ao longo de todo o fundo estuarino e compreende essencialmente sedimentos como areia com cascalho, areia com cascalho esparso, areia, areia lamosa com cascalho esparso e ainda areia siltosa. Abrange cerca de 85% da área submersa do estuário, com ampla distribuição.

Sedimentos com mais de 75% de areia ocorrem nos diversos bancos e preenchem parte do canal principal de navegação, enquanto sedimentos areno-siltosos podem ser encontrados amplamente dispersos ao longo das margens, em zonas de menor profundidade e em locais abrigados artificialmente por pequenos diques, conseqüência da inibição da atuação das correntes de marés.

## **b) Fácies Lamosa**

Correspondendo a amostras silte-arenosas, esta fácies distribui-se, de uma maneira geral, nas regiões marginais do estuário. Este tipo de sedimento mostra uma perfeita concordância com seus mecanismos deposicionais, ocupando esta fácies locais de baixa profundidade junto às margens do estuário.

Estes tipos de informações, associados com outras variáveis ambientais, auxiliará ainda na compreensão de ambientes deposicionais modernos, importantes para estudos comparativos com seus análogos litificados.

### **5.4.3. FRAÇÃO CARBONATADA**

A fração carbonatada (carbonato de cálcio) nos sedimentos superficiais do estuário Potengi varia entre 0.5 e 34%, surgindo valores particularmente altos junto ao Canal do Baldo. Estas percentagens correspondem a sedimentos arenosos constituídos exclusivamente (amostras PT-015, PT-020, PT-029, PT-038, PT-047 e PT-048) ou quase exclusivamente (amostras PT-042, PT-044 e PT-045) por silte arenoso. Estes materiais, estranhos à sedimentação efetiva no canal, são constituídos de material provenientes do esgoto da cidade de Natal.

Além destes casos pontuais, a fração carbonatada nos sedimentos resulta principalmente da presença de uma componente biogênica importante. Nas frações granulométricas mais grosseiras, esta pode distribuir-se na classe areia e areia com cascalho esparso, em sedimentos arenosos, ou no silte arenoso nas planícies de marés lamosas.

### **5.4.4. MATÉRIA ORGÂNICA PARTICULADA**

A percentagem de matéria orgânica particulada dos sedimentos superficiais da região em estudo varia geralmente entre 0.05% e 14.74%, sendo que ocorre um valor mais elevado de 21% na amostra PT-042, próximo ao Canal do Baldo. Na região próxima a foz, as percentagens são inferiores a 2%, tal como no Porto de Natal, correspondendo a sedimentos arenosos. Os valores mais elevados de matéria orgânica particulada estão geralmente associados a amostras com percentagens importantes em carbonatos.

Quanto à sua origem, a matéria orgânica particulada provém fundamentalmente dos produtos orgânicos despejados no estuário por efluentes urbanos e restos de vegetais e pequenos organismos carreados das zonas marginais.

Em termos globais, a percentagem de matéria orgânica particulada encontrada nos sedimentos mostra-se compatível com a quantidade de esgoto que é despejada no estuário Potengi. A injeção de poluentes químicos e industriais favorecerá um ambiente ácido que irá facilitar a oxidação.

## **CAPÍTULO 6:**

### **MAPA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO**

## 6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo envolve a aplicação dos dados obtidos neste trabalho para a construção de mapas de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo, que culminaram na elaboração do mapa de sensibilidade ambiental da zona costeira de Natal e em um artigo aceito pela *Mangrove 2003 International Conference* (Anexo 05).

O mapeamento de áreas sensíveis insere-se desta forma como ferramenta que perpassa o ciclo de decisões de planejamento, desenvolvimento e monitoramento ambiental da indústria do petróleo, com destaque para a regulação e gerenciamento de risco.

As especificações e normas técnicas utilizadas neste trabalho foram adotadas de acordo com a metodologia descrita pelo NOAA (1997), adaptadas à realidade brasileira inicialmente pelo CENPES/PETROBRAS (Araújo *et al.* 2000) e posteriormente pelo Ministério do Meio Ambiente para a costa brasileira (MMA 2002).

Antes do início do planejamento da elaboração das cartas de sensibilidade, é necessário ter em mente qual será a utilidade delas, para otimizar a sua elaboração e atender às necessidades do usuário. É essencial recordar que as Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo - Cartas SAO (MMA 2002), constituem um componente essencial e fonte de informação primária para planejamento de contingência e avaliação de danos em casos de derramamento de óleo; não são, portanto, cartas completas de recursos biológicos, de atividades sócio-econômicas ou, muito menos, de geomorfologia costeira. Representam uma ferramenta para o balizamento das ações de resposta a vazamento de óleo, na medida em que, ao identificarem aqueles ambientes com prioridade de preservação, permitem o direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização das equipes de proteção e limpeza.

Os mapas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (MSA's) baseiam-se nas Cartas SAO e apresentam características semelhantes. O grande diferencial entre eles é que as Cartas SAO são documentos oficiais do Governo Federal, elaboradas pelo Ministério do Meio Ambiente; enquanto que os MSA's são documentos locais, elaborados para estudos específicos de áreas costeiras.

Os MSA's contêm informação básica de componentes costeiros, bem como geomorfológicos, hidrodinâmicos e oceanográficos. Eles indicam áreas de conservação, recreação e assentamentos urbanos costeiros. A produção deles torna-se um elemento de



grande importância no estudo ambiental, na análise de possíveis mudanças na área e nas prováveis consequências que essas mudanças podem acarretar. Trata-se de uma ferramenta poderosa, que pode orientar o homem na tomada de decisões.

De acordo com a tendência mundial, a responsabilidade de elaboração de cartas de sensibilidade ambiental é dos órgãos governamentais. No Brasil, o Art. 28 da Lei Nº 9966/2000, do órgão federal do meio ambiente (Ministério do Meio Ambiente), ouvida a autoridade marítima (Marinha do Brasil - MB), “*definirá a localização e os limites das áreas ecologicamente sensíveis*” que por sua vez, são descritas no inciso IV do artigo 2º da referida Lei como “*regiões de águas marítimas ou interiores, definidas por ato do poder público, onde a preservação, o controle da poluição e a manutenção do equilíbrio ecológico exigem medidas especiais para a proteção e preservação do meio ambiente*” (MMA 2002).

As cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo estão diretamente relacionadas com a *poluição aguda*, caracterizada pelos derramamentos maciços ou catastróficos de petróleo cru ou derivados, causados por acidentes de navegação e pelos acidentes maiores em plataformas de produção, terminais petrolíferos, instalações de armazenamento e refino de oleodutos. No entanto, também servem como ferramentas para o combate à *poluição crônica*, derivada da operação normal daquelas instalações e de outras fontes (que pode, inclusive, superar, em termos de impactos de longo prazo, a poluição aguda).

Dessa forma, as cartas SAO são utilizadas como ferramenta nas seguintes situações principais (MMA 2002).

- **Plano de Contingência:** no planejamento de prioridades de proteção, estratégias de contenção e limpeza / remoção e quantificação dos recursos necessários ao combate de derramamentos;
- **Operações de combate a derramamentos de óleo:** possibilitando a avaliação geral de danos e facilitando a identificação dos locais sensíveis, rotas de acesso e quantificação / localização de equipamentos de resposta;
- **Planejamento Ambiental:** na avaliação de recursos que possam estar em perigo, podendo ser um componente valioso de um estudo de impacto ambiental, auxiliando na definição de locais de instalação de empreendimentos para a indústria do petróleo.

Essas cartas devem atender a todos os níveis de derramamentos de óleo, desde grandes derramamentos em áreas remotas “*offshore*”, passando por derramamentos de porte médio a alguma distância das instalações da indústria (ao largo do litoral), até derrames localizados (em pontos específicos da costa).

## **6.2. MAPA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL DA ZONA COSTEIRA DE NATAL**

De acordo com as técnicas de sensoriamento remoto e as de investigação “*in situ*” descritas anteriormente (capítulo 2), foi possível a elaboração do Mapa de Sensibilidade Ambiental (MSA) a derrames de óleo na região da grande Natal, a nível de detalhamento estratégico, na escala de 1:75.000, em função da resolução da imagem Landsat utilizada (Figura 6.1). Para níveis de detalhamento em maior escala (Cartas táticas e operacionais), a mesma metodologia pode ser aplicada utilizando imagens Spot ou Ikonos.

Segundo Frazão *et al.* (2003) a confecção de mapas em níveis de detalhamento compatível para casos de derramamento de óleo, utilizando-se sensores remotos e SIG, são eficazes e rápidos, porém a coleta dos dados “*in situ*” é necessária para classificar e distinguir as diferentes características da linha de costa, que não podem ser mapeadas com precisão utilizando-se os sensores remotos.

Este MSA foi elaborado de forma a possibilitar um fácil entendimento, sem muitos conhecimentos especializados para ser compreendido e interpretado. O mesmo foi padronizado com os índices de sensibilidade, simbologia e terminologia adotados pelo MMA (2002), permitindo assim a comparação de mapas de áreas distintas e facilitando o uso por equipes de resposta a derramamentos de óleo (Figura 6.1).

O MSA da zona portuária de Natal foi elaborado, baseado em informações de sensibilidade dos ecossistemas costeiros e marinhos, e usos humanos dos espaços e recursos (atividades sócio-econômicas).

Foram identificados 24 segmentos sensíveis ao derramamento de óleo na área estudada. Os Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL) a derrames de óleo variaram de ordem crescente de 1 a 10, com base nas características geomorfológicas da linha de costa. Uma vez determinado o índice de sensibilidade de cada segmento sensível ao derramamento de óleo, este foi representado por uma cor (Anexo 06). As cores foram

aplicadas ao longo da linha de costa representando o limite entre terra e água. A maioria dos habitats costeiros está representado com uma linha, sem dimensão espacial.

Os dados coletados foram organizados em tabela para auxiliar na determinação do índice de sensibilidade de cada ecossistema, baseado nas técnicas descritas anteriormente (Tabela 6.1).

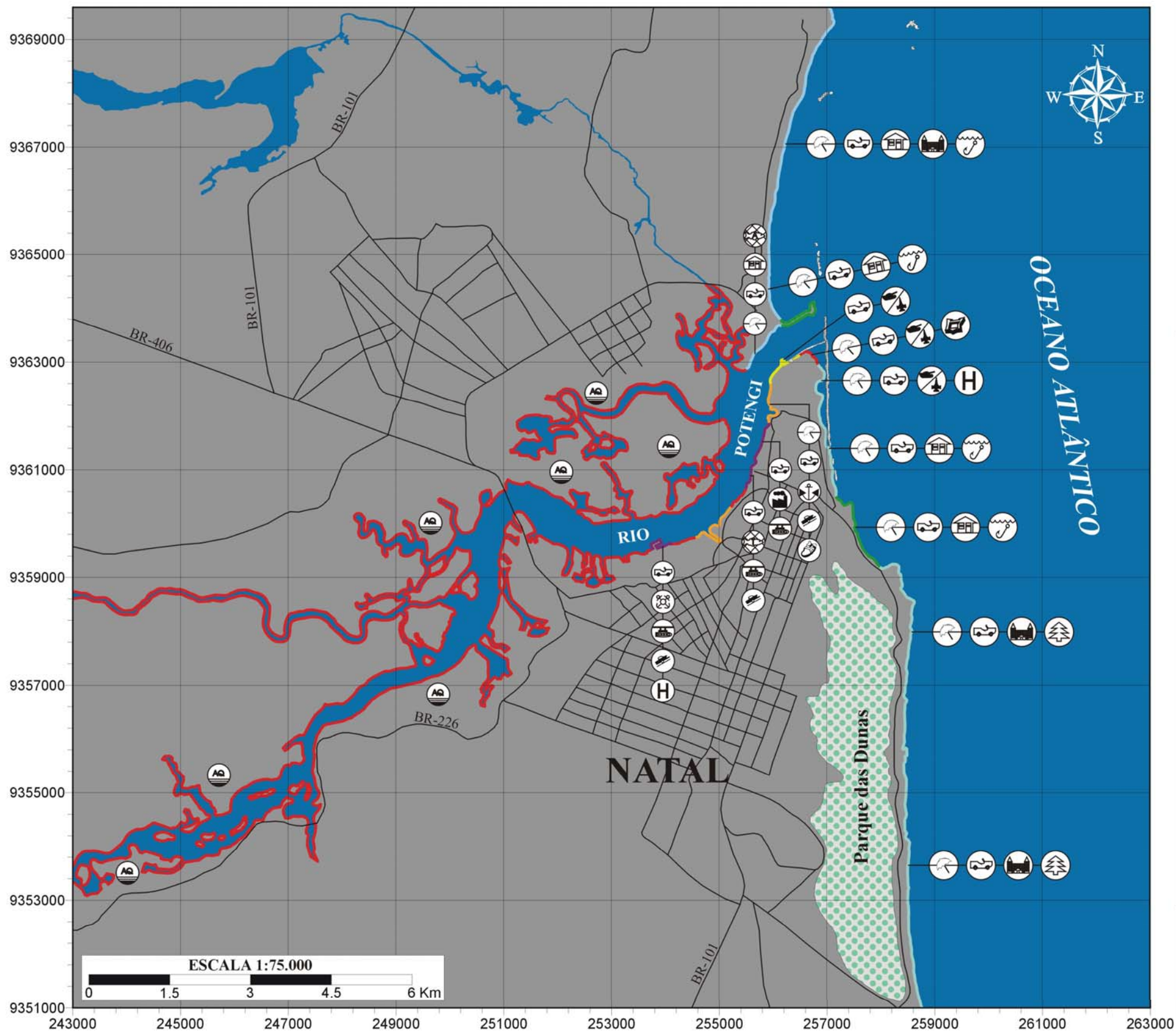
Na tabela 6.1 não estão presentes os dados dos segmentos 007 a 019, devido esses segmentos estarem localizados ao longo da margem do rio Potengi ocupada por atracadouros, áreas militares, terminal petrolífero e pesqueiro, planícies de maré e manguezais, não possibilitando as condições necessárias para o levantamento dos perfis topográficos nestas zonas, devido ao acesso restrito.

No que tange ao aspecto sócio-econômico, a área em pauta possui relevante importância ambiental por nesta se enquadrar ecossistemas de alta fragilidade ambiental, como praias e manguezais, os quais juntos sustentam o potencial turístico do Estado do Rio Grande do Norte, com ênfase para sua capital, a cidade do Natal, como suporte sócio-ambiental de comunidades litorâneas que daí retiram seu sustento. De outra forma, quaisquer intervenções impróprias sobre estes ambientes pode ocasionar, dependendo da sua amplificação, prejuízo à economia na ordem de milhares de dólares.

A área de estudo acha-se constituída por dois domínios: i) no estuário Potengi e ii) na linha de costa.

Uma combinação das técnicas de investigação “*in situ*” e de sensoriamento remoto foram usadas para identificar e mapear os tipos ecossistemas costeiros (segmentos), sendo que cada ambiente varia sua sensibilidade a vazamentos de poluentes e tornando eficiente os esforços de contenção e limpeza. As áreas mais sensíveis foram os manguezais e as planícies de maré, enquanto que áreas menos sensíveis foram as estruturas artificiais feitas pelo homem e as rochas praias “*beachrocks*”. Os litorais menos sensíveis podem freqüentemente ser limpos pelas ação das ondas ou por máquinas. Contrariamente, áreas como os manguezais e planícies de marés são muito difíceis de limpar e o acesso é limitado. Cada uma destas áreas sensíveis apresenta seu grau de sensibilidade ambiental a poluentes derramados e recomendações distintas de resposta e limpeza. A coleta dos dados “*in situ*” foi necessária para classificar e distinguir as diferentes características da linha de costa, que não poderiam ser mapeadas com precisão com os dados ETM+.

# MAPA DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMES DE ÓLEO - NATAL



**Classificação dos Hábitats Costeiros**  
(Ordem crescente de sensibilidade aos derrames de óleo)

- 1 Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostos
- 4 Praias intermediárias de areia fina a média, expostas; praias de areia fina a média, abrigadas.
- 5 Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação; recifes areníticos em franja.
- 6 Enrocamentos (*rip-rap*, guia-corrente, quebra mar) expostos; plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas).
- 8 Enrocamentos (*rip-rap* e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados.
- 9 Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas.
- 10 Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas; manguezal (mangues de estuários).

**Informações Sócio-econômicas**

- Praias
- Estrada de acesso à costa
- Portos e atracadouros
- Rampa para barcos
- Ferry-boat
- Instalações navais
- Terminal de petróleo
- Terminal de desembarque de pescado
- Heliporto / heliponto
- Pesca artesanal
- Casas residenciais / veraneio
- Hotel / Resort
- Unidade de conservação terrestre
- Pesca recreativa
- Outras instalações militares
- Fortalezas / Fortes históricos
- Marina / Iate Clube
- Aqüicultura

**Fonte:**  
Imagem Pan-Landsat 7 ETM+  
Datum = WGS 84  
Projeção = UTM

**Responsáveis:**  
Eugênio Pires Frazão  
Helenice Vital

Figura 6.1 - Mapa de sensibilidade ambiental a derrames de óleo para região da grande Natal.

**Tabela 6.1 - Determinação dos índices de sensibilidade da área de estudo ao longo da linha de costa.**

SEGMENTOS	PARÂMETROS OCEANOGRÁFICOS			PARÂMETROS DE GEOMORFOLOGIA COSTEIRA						TIPO DE LITORAL	ISL
	Ondas	Correntes Litorâneas		Tipo	Largura (m)	Declividade (graus)	Mobilidade do Sedimento	Penetração do óleo	Trafegabilidade		
		Altura (m)	Velocidade (m/s)								
SEG-01	0.45	0.41	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	60.12	6°	Muito alta durante tempestades	Alta permeabilidade (≤ 50cm)	Baixa trafegabilidade de veículos	Terraço de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação	5
SEG-02	0.25	0.59	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	67.12	6°	Muito alta durante tempestades	Alta permeabilidade (≤ 50cm)	Baixa trafegabilidade de veículos	Recifes areníticos em franja	5
SEG-03	0.24	0.17	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	58.59	4.5°	Baixa	Altamente permeável (≤ 100 cm)	Baixíssima trafegabilidade de veículos	Enrocamentos <i>rip-rap</i> expostos; plataforma exumada recoberta por concreções lateríticas	6
SEG-04	0.45	0.41	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	74.83	5.5°	Muito alta durante tempestades	Alta permeabilidade (≤ 50cm)	Baixa trafegabilidade de veículos	Recifes areníticos em franja	5
SEG-05	0.26	0.35	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	109.28	8°	Muito alta durante tempestades	Alta permeabilidade (≤ 50cm)	Baixa trafegabilidade de veículos	Recifes areníticos em franja	5
SEG-06	0.45	0.41	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	164.77	5°	-	Baixa permeabilidade	Muito baixa trafegabilidade	Manguezal	10
SEG-20	0.45	0.41	SW-NE	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	33.28	10°	Alta	Média permeabilidade	Baixa	Praia de areia fina a média, abrigadas	4
SEG-22	0.45	0.17	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	81.96	7°	Alta	Média permeabilidade	Baixa	Praias intermediárias de areia fina a média, expostas	4
SEG-23	0.65	-	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	98.22	7°	Alta	Média permeabilidade	Baixa	Praias intermediárias de areia fina a média, expostas	4
SEG-24	0.61	-	S-N	Areia fina a média (0,06 a 1 mm)	88.89	6°	Alta	Média permeabilidade	Baixa	Praias intermediárias de areia fina a média, expostas	4



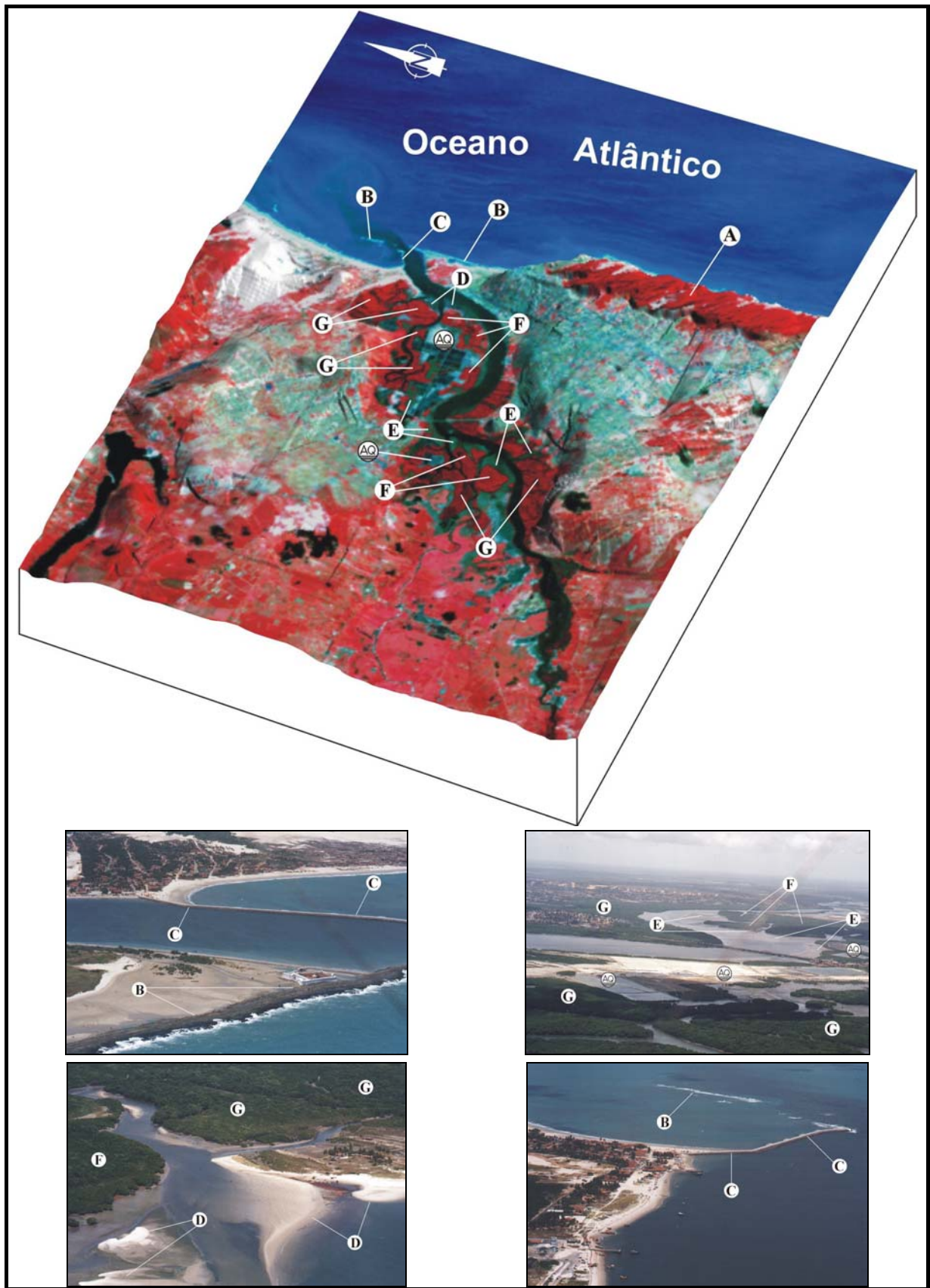
A imagem de satélite Landsat 7 ETM+ (2001) (Figura 6.2) foi adquirida durante a maré baixa, sendo esta informação da variação da maré importante, visto que no estuário do rio Potengi, a maré afeta a classificação das zonas de inframaré e planícies de maré.

A partir da composição colorida RGB 432 combinada com Modelo Digital de Terreno (MDT) para o estuário Potengi, observa-se a vegetação de mangue em vermelho escuro, proveniente da resposta espectral da faixa do infra-vermelho, causado pela contribuição da floresta densa do mangue na banda 4 ETM+ e a planície de maré ao longo da margem pode ser identificada por apresentar uma coloração esverdeada. Esses dados do Landsat 7 ETM+ complementaram as observações realizadas “*in situ*”.

Os principais resultados da combinação da imagem Landsat 7 ETM+ com o MDT, podem ser observados na figura 6.2, com a identificação de alguns ecossistemas costeiros, como as falésias da Formação Barreiras, exposta (ISL 3), campos de dunas (ISL 3), recifes areníticos em franja (ISL 5), enrocamentos “*rip-rap*” expostos (ISL 6), planície de maré arenosa exposta (ISL 7), planície de maré lamosa abrigada (ISL 9), manguezais (ISL 10) e manguezal precedido de terraço de baixa-mar lamoso (ISL 10).

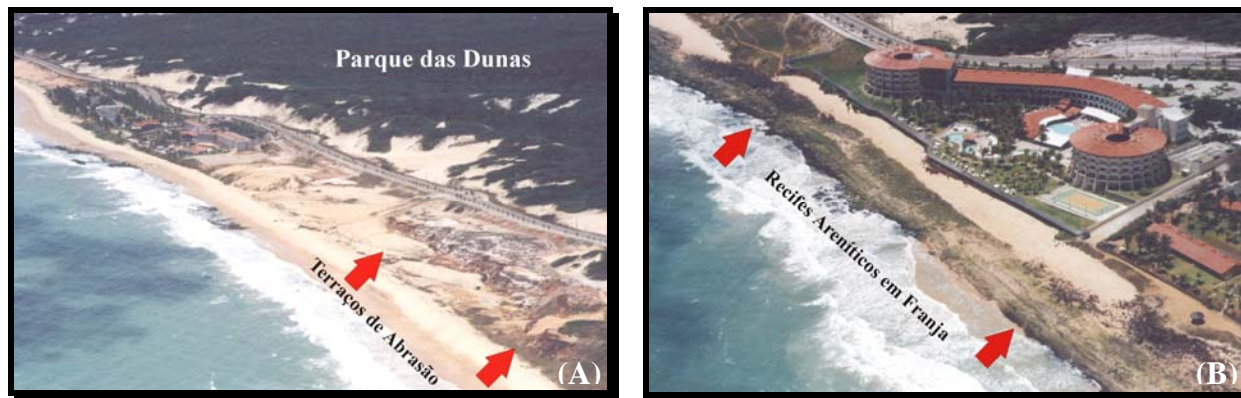
A obtenção das fotografias aéreas obliquas e coletas de dados “*in situ*” foi essencial para a identificação e discriminação das características costeiras que não puderam ser mapeadas corretamente com os dados ETM+. Contudo, os dados ETM+ foram eficazes para mapear a localização e distribuição espacial de vários dos segmentos mais sensíveis como os manguezais e planícies de maré. Enquanto o mapeamento tradicional ISL não podia indicar a presença de tais segmentos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto conseguiu uma medição precisa da extensão da área dos mesmos.

Os 19 km de linha de costa classificados estão bastante ocupados pelo homem, apenas aproximadamente 8 km estão preservados, devido estarem localizados em área de proteção militar. A ocupação nas praias é desordenada, exceto ao longo da via costeira, na praia do Meio, praia dos Artistas e do Forte, onde apenas uma minoria das construções encontra-se sobre a escarpa de praia, sujeitas à ação erosiva de ondas e marés, o que leva os moradores a desmontarem suas casas, construindo-as em áreas mais protegidas, não influenciadas pela dinâmica praias. Após gerar a tabela com os dados necessários (Tabela 6.1), foi possível perceber a variedade de ecossistemas ao longo da linha de costa e no interior do estuário Potengi, cada um apresentando um índice de sensibilidade ao derramamento de óleo. Estes segmentos variam principalmente pelo tipo de substrato:



**Figura 6.2** - Modelo Digital de Terreno (MDT) combinado com a composição colorida RGB 432 mostrando a topografia do semi-graben do estuário Potengi, e fotografias aéreas oblíquas com os seguintes ISL : (A) campos de dunas (ISL3); (B) recifes areníticos em franja (ISL5); (C) enrocamentos “rip-rap” expostos (ISL6); (D) planície de maré arenosa exposta (ISL7); (E) planície de maré lamosa abrigada (ISL9); (F) manguezal precedido de terraço de baixa-mar lamoso (ISL10) e (G) manguezais (ISL10), além da atividade de aqüicultura (Fotos: Vital, nov. 2001).

➤ **Segmentos 01 e 02** - Área com hotéis de luxo e acesso pela Via Costeira com uso predominantemente turístico, sendo limitada em toda sua extensão pela área de preservação permanente do Parque das Dunas, o segundo maior parque urbano do Brasil. Estes segmentos concentram o mais atrativo complexo turístico de todo Estado e da Capital (Figura 6.3).



**Figura 6.3** - Ecossistemas sensíveis ao derramamento de óleo apresentando ISL 5. Segmento 01 apresentando substrato de abrasão de superfície irregular e recoberta de vegetação (A) e segmento 02 apresentando recifes areníticos em franja (B) (Fotos: Vital, nov. 2001).

➤ **Segmento 03** - Área de uso recreacional, ainda restrita a pesca artesanal praticada pelos pescadores dos Bairros de Mãe Luíza e Areia Preta, os quais limitam este segmento. Encontram-se condomínios residenciais de luxo no início da via costeira, à frente dos quais se localiza o ícone da cidade do Natal/RN, o Farol de Mãe Luíza, assentado sobre as dunas (Figura 6.4).



**Figura 6.4** - Segmento 03 apresentando substrato com enrocamentos *rip-rap* expostos e plataforma exumada recoberta por concreções lateríticas - ISL 6 (Foto: Vital, nov. 2001).

➤ **Segmento 04 e 05** - Área de uso recreacional, freqüentada pelo fácil acesso (Praias do Centro), principalmente por moradores dos bairros limítrofes de Santo Reis, Brasília



Teimosa, Praia do Meio e das Rocas. Possui concentração de Bares / Restaurantes (Figura 6.5).



**Figura 6.5** - Substrato constituído de recifes areníticos em franja, atuando como uma barreira natural ao óleo nos segmentos 04 e 05 - ISL 5 (Foto: Vital, nov. 2001).

➤ **Segmento 06** - Área, que no período diurno, tem uso recreacional e é freqüentada pela população, sendo, no período noturno, interdita pelo 17º Grupo de Artilharia e Campanha (G.A.C), Exército Brasileiro, por motivo de segurança, tendo acesso restrito. Por este segmento estar localizado em uma área militar existe uma pequena região em que a floresta de mangue ainda está preservada (Figura 6.6). Este segmento tem como principal uso o turismo cultural por estar situado junto ao marco da fundação da cidade do Natal e da colonização portuguesa, o Forte dos Reis Magos (256.920mE, 9.363.325mN).



**Figura 6.6** - Floresta de mangue no segmento 06 (ISL 10). Vegetação associada com alta diversidade biológica e substrato propício à fixação do óleo, sem limpeza natural (Foto: Frazão, nov. 2001).

- **Segmento 07** - Área pertencente ao 17º G.A.C (Grupo de Artilharia e Campanha) - Exército Brasileiro, de acesso restrito (Figura 6.7).



**Figura 6.7** - Enrocamento do tipo *rip-rap* abrigado, disposto na margem para conter a erosão no segmento 07 (ISL 8), localizado na margem direita da foz do rio Potengi (Foto: Frazão, nov. 2001).

- **Segmento 08** - Área em que se localiza o Iate Clube de Natal, a "Rampa" e o "Canto do Mangue", caracterizada por locais de atracadouro e rampas para manutenção de barcos de pesca e esportivos. Travessia do Potengi pela balsa, e intenso transporte marítimo é observado na área. Apresenta ISL 9 devido a planície de maré arenosa, abrigada, margear o rio.

- **Segmento 09** - Porto do Natal (255.771mE, 9.361.332mN) e terminal de abastecimento de derivados de petróleo (255.889mE, 9.361.733mN), responsáveis pelo tráfego de embarcações de grande porte (Figura 6.8).



**Figura 6.8** - Segmento apresentando baixo índice de sensibilidade ambiental (ISL 1), por apresentar estruturas artificiais lisas como o cais do Porto de Natal (Fotos: Frazão, nov. 2001).

- **Segmento 10** - Área de beneficiamento de pescados (atuns, camarões, lagostas), em que há intenso tráfego de barcos de pesca industrial, atualmente representando o pólo pesqueiro do Estado (Figura 6.9).





**Figura 6.9** - Segmento com ISL 1, apresentando instalações das indústrias pesqueiras, onde foram construídas, ao longo da margem, várias estruturas artificiais como os piers (Fotos: Frazão, nov. 2001).

➤ **Segmento 11** - Terminal ferroviário da Cidade do Natal, voltado hoje para o transporte urbano, margeado pela floresta de mangue (ISL 10).

➤ **Segmento 12** - Área que apresenta habitações sub-normais e condições sanitárias precárias, agravada pelo lançamento de efluentes (254.823mE, 9.359.835mN). "*in natura*" da área urbana, como resíduos sólidos e aterro das margens para expansão da favela "Passo da Pátria". Estes dejetos propiciam a formação de uma planície de maré lamosa (ISL 10).

➤ **Segmento 13** - Área constituída de manguezal na margem (ISL 10), e, no interior, das instalações da Base Naval Almirante Ary Parreiras, Marinha do Brasil, tendo acesso restrito.

➤ **Segmento 14** - Área da Base Naval Alnte. Ary Parreiras (Marinha do Brasil) em que se situam o porto militar e os navios-diques para manutenção de embarcações bélicas, correspondendo desta forma a um ISL 1, devido às estruturas lisas artificiais construídas.

➤ **Segmento 15** - Área Militar do Grupamento de Fuzileiros Navais de Natal/RN (Marinha do Brasil). Este segmento é caracterizado pela floresta de manguezal (ISL 10) nas margens, e, no seu interior, pelas instalações do Grupamento dos Fuzileiros Navais, sendo de acesso restrito.

➤ **Segmento 16** - Área de Preservação Permanente, caracterizada por uma densa floresta de manguezal (ISL 10), pertencente à Zona de Proteção Ambiental (ZPA-08), regulamentada pelo atual Plano Diretor da Cidade do Natal (Decreto de 1992). A Zona de Proteção Ambiental (ZPA-08) é limitada pelo polígono: 253.120mE,

9.359.408mN; 253.171mE, 9.358.942mN; 252.316mE, 9.358.917mN; 251.562mE, 9.359.323mN; 251.088mE, 9.359.129mN; 251.224mE, 9.360.153mN; 252.214mE, 9.359.510mN. Esta área é utilizada pela população ribeirinha para coleta de mariscos e pesca artesanal.

➤ **Segmento 17** - Área margeada pela floresta de manguezal (ISL 10), mas, que no seu interior, se destaca por viveiros destinados à carcinicultura. Área pertencente ao Projeto Camarão/EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do RN), criada em 1973.

➤ **Segmento 18** - Área pertencente ao Projeto Camarão/EMPARN, nas proximidades da Gamboa Jaguaribe, canal de maré onde é feita a tomada de água para abastecimento dos viveiros. Este segmento se destaca pela planície lamosa, ou franja de lama extensa quando de maré baixa (ISL 10), tendo uso tradicional por coletores de mariscos e pescadores ribeirinhos.

➤ **Segmento 19** - Zona de Proteção Ambiental (ZPA-08), constituída por florestas de manguezais e o canal de maré onde deságua o rio Doce (Gamboa Manimbu), ocorrendo bancos de areia na maré baixa (ISL 10). Nesta área pescadores artesanais praticam a coleta e pesca de organismos marinhos (Figura 6.10).



**Figura 6.10** - Manguezal precedido de terraço de baixa-mar lamoso (ISL 10) (Foto: Vital, nov. 2001).

➤ **Segmento 20** - Este segmento representa a praia da Redinha Velha (ISL 4), tendo outras atividades de destaque além da recreacional, como a colônia de pesca da Redinha (pesca artesanal-255.788mE, 9.363.291mN) e a travessia de balsa (transporte hidroviário-255.535mE, 9.362.864mN).

➤ **Segmento 21** - Guia corrente do estuário Potengi (ISL 6).

➤ **Segmento 22** - Segmento que compreende a praia da Redinha. Esta área é bastante freqüentada pela população local onde se desenvolvem pequenos comércios (barracas, ambulantes). Ainda há residências e casas de veraneio (ISL 4).

➤ **Segmento 23** - Constitui-se principalmente pela via de acesso da praia da Redinha à praia de Genipabú (ISL 10), iniciando-se nas Coordenadas (255.935mE, 9.365.152mN). Neste Segmento, na Praia da Redinha Nova, existem casas de veraneio margeando toda extensão da estrada.

➤ **Segmento 24** - Este segmento compreende a praia de Santa Rita (ISL 4). Tem como ocupação principal casas de veraneio em toda sua extensão, como ainda dois hotéis (256.059mE, 9.366.119mN; 256.473mE, 9.367.888mN) e poucas pousadas.

**CAPÍTULO 7:**  
**CONCLUSÕES GERAIS**

## **7.1. HIDRODINÂMICA E DISTRIBUIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DAS ÁGUAS DO ESTUÁRIO POTENGI**

As águas superficiais do estuário Potengi e áreas oceânicas adjacentes, mesmo em condições de ventos fracos, caracterizam um sistema relativamente agitado, sobretudo pela ação das correntes de marés, com alta frequência de ondulações irregulares, definindo claramente um regime de fluxo turbulento.

Apesar da forte imposição das correntes de marés, as ondas geradas pelos ventos representam um importante agente na dinâmica do estuário Potengi, o qual propicia a mistura das águas e a ressuspensão praticamente constante dos sedimentos de fundo nos bancos e margens. Além disso, estas ondas atuam na interação entre o sistema hidrodinâmico e as margens, promovendo ataques erosivos e mesmo criando situações de sedimentação em locais específicos.

A partir da medição maregráfica efetuada conclui-se que a propagação da onda de maré no estuário Potengi é determinada pela sua geometria e pelo atrito no fundo e nas zonas de planície de maré, notando-se sobreelevação do nível de água devido a efeitos locais de convergência das margens.

No estuário do rio Potengi, devido ao estreitamento do canal de embocadura, a concentração de energia por convergência das margens é superior à dissipação provocada pelo atrito no fundo. Conseqüentemente, a intensidade média das correntes de enchente tende a exceder a de vazante.

Com base nas intensidades e direção das correntes de maré foi possível a elaboração de cartas de correntes para o estuário Potengi a cada 2hs antes e depois da preamar. Dados deste tipo são de extrema importância em casos de dispersões de manchas de óleo, tendo em vista a necessidade de se conhecer as condições hidrodinâmicas no determinado instante em que ocorra um derramamento. Constituindo-se portanto em uma ferramenta importante para as equipes de contenção e limpeza, na identificação das áreas mais sensíveis ao derramamento de óleo, tais como os manguezais e as planícies de marés, bem como qual a rota de dispersão do óleo.

O processo de mistura das águas marinhas e fluviais faz-se através da interação entre maré, descarga fluvial e ação das ondas. Os gradientes de salinidade gerados pela mistura controlam a distribuição vertical e longitudinal da densidade do fluido, uma vez que as diferenças de temperatura apresentaram-se pouco significativas. A variação da



distribuição da densidade provoca importantes correntes residuais que poderão dominar os processos de circulação estuarina.

A temperatura da água no estuário constitui um fator controlador para a vida e para os processos químicos que se realizam no ambiente aquático. É responsável, ainda, pela determinação dos padrões, que controlam as taxas de metabolismo e crescimento do fitoplâncton que representam a base de toda a cadeia ecológica. Na área estudada, a distribuição superficial da temperatura é típica de regiões de baixa latitude, apresentando uma camada homogênea, bem misturada, com temperatura média de 28°C, essas altas temperaturas contribuem em casos de derrames de hidrocarbonetos, conseqüentemente para uma maior evaporação e redução da viscosidade do óleo derramado.

A salinidade das águas estuarinas do rio Potengi entre a Ponte do Igapó e sua foz apresentou uma distribuição superficial, diretamente influenciada pelos fatores climáticos e oceanográficos, apresentando um máximo registrado de 37.43 psu na foz, diminuindo em direção a montante até a Ponte do Igapó para 32.57 psu. Com relação à distribuição da densidade das águas do estuário Potengi, foi possível observar que a salinidade está influenciando mais fortemente a distribuição da densidade do que a temperatura na região estudada.

A salinidade é um dos parâmetros importantes que controlam a dispersão e o aumento da densidade do óleo derramado. Os altos valores de salinidade encontrados no estuário Potengi, contribuirá para uma menor dispersão do óleo, devido ao aumento da densidade do meio aquoso.

A dispersão do óleo ao longo da coluna d'água vai depender também da escala arbitrária de densidade (API) do óleo, quanto menor o API maior a densidade e peso específico do óleo. Então em regiões com pouca salinidade se ocorrer um derramamento de óleo com um API de 10, por exemplo, devido a pouca densidade da meio aquoso, iremos ter uma dispersão de óleo maior ao longo da coluna d'água.

No presente trabalho verificou-se que a área estudada segue o modelo de variação de temperatura e salinidade de uma região de baixa latitude, onde a presença das águas oceânicas, com salinidade média de 36.32 psu, foram registradas até 8.4 km de distância da costa. Os altos valores de salinidade estão relacionados à baixa descarga dos rios Potengi e Jundiaí, bem como a fatores climáticos (alta evaporação, baixa precipitação e ventos) e oceanográficos (maré e turbulência).

A quantidade de material particulado em suspensão na água também contribui para uma maior ou menor dispersão do óleo derramado, pois em áreas com maior concentração de material particulado em suspensão a dispersão por floculação será maior, devido as condições propícias.

O Diagrama Estratificação-circulação mostrou-se a mais completa e compreensiva solução analítica de um modelo bidimensional estacionário com geometria simples. Esse diagrama, possibilitou a obtenção também a parcela relativa do fluxo de sal estuário acima, atribuído ao processo de difusão turbulenta (dispersão) e à correspondente contribuição do processo advectivo, os quais, por sua vez, controlam a distribuição da concentração de substâncias dissolvidas.

A classificação do estuário Potengi foi importante, pois em casos de dispersão de poluentes como os derivados do petróleo, torna-se indispensável saber dentre os processos dispersivo e advectivo qual é o dominante, ou qual a combinação aplicável desses processos na hidrodinâmica estuarina.

Como o estuário Potengi foi classificado como parcialmente misturado ou do Tipo 2, de acordo com o diagrama estratificação-circulação, o processo de mistura das águas do rio Potengi com poluentes derramados como o óleo, ocorre através do entranhamento, advecção e difusão turbulenta. Assim, em casos de derramamento de óleo no estuário Potengi e áreas adjacentes, um fator agravante na mistura do óleo ao longo da coluna d'água seria o efeito da difusão turbulenta gerada pela maré que desempenharia um papel importante nos processos de mistura da massa de água estuarina com o efluente derramado.

Considerando-se que a distribuição de um poluente conservativo ao longo do estuário está diretamente relacionado a distribuição e concentração, e portanto quanto menor a concentração de sais na água, mais eficiente é o estuário para remover eventuais poluentes como os derivados de petróleo, podemos concluir que o estuário Potengi seria pouco eficiente na remoção de poluentes.

Os parâmetros físicos da água do estuário medidos durante um ciclo de 13 horas de maré, forneceram informações detalhadas, que podem ser comparadas com outras regiões tropicais.

## **7.2. MAPEAMENTO DA MORFOLOGIA DE FUNDO, IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE FORMAS DE LEITO E ANÁLISE DOS SEDIMENTOS RECENTES**

A morfologia das margens é definida pelo canal principal de navegação do estuário Potengi. Isto pode ser observado através da análise batimétrica e da configuração de fundo das 5 sub-áreas estudadas, onde as margens de declive acentuado posicionam-se paralelamente muito próximas do eixo do canal, enquanto que as margens de baixa declividade se encontram numa posição mais distante do mesmo.

O crescimento do banco do 17º G.A.C (Grupo de Artilharia Campanha) em direção às porções mais profundas do estuário é causado pela depressão criada pelo vórtice, durante as correntes de vazante do rio Potengi, próximo ao espigão construído pelo Exército Brasileiro (17º G.A.C).

As aplicações das imagens do sonar de varredura lateral confirmaram sua utilidade no mapeamento do leito do estuário, não só pelas variações da morfologia das formas do leito como distribuição dos sedimentos.

Na foz do estuário Potengi e na plataforma continental adjacente as formas de leito maiores parecem estáticas, enquanto as formas sobrepostas menores são ativas, devido aos volumes relativos do sedimento que compõe os dois tamanhos e do tempo disponível para a migração das formas de leito.

As diferenças na morfologia das formas de leito de fluxo transversal mapeadas no estuário Potengi, refletem a dimensão da resposta à canalização, nível flutuante da água, velocidade e direção. Visto que estas formas de leito também ocorrem como uma continuidade de tamanhos, então podemos dizer que as variações observadas nas morfologias das formas de leito refletem a influência da variação das condições hidrodinâmicas, assim como os efeitos da maré.

A combinação da ecosonda de feixe vertical com o sonar de varredura lateral de alta resolução desempenha um papel importante na interpretação da assinatura acústica das formas de leito do tipo *duna* e na determinação dos limites das principais fácies texturais. A integração desses dois tipos de sensores também é uma ferramenta fundamental para auxiliar as operações de dragagem do canal principal de navegação de acesso ao Porto de Natal, que nos últimos anos têm sofrido um intenso processo de assoreamento, necessitando remobilizações constantemente de material depositado, isto

é, devido a ampliação das instalações portuárias e a necessidade de embarcações cada vez maiores.

As causas das mudanças fortemente definidas na morfologia das formas de leito e tipos de sedimentos, quer sejam ou não controladas pela batimetria, devem ser causadas pela separação do fluxo da água próximo ao fundo nesta parte do estuário Potengi. Isto reflete claramente variações da energia na coluna da água e os mecanismos dos processos envolvidos devem ser submetidos a um monitoramento contínuo.

Os tipos de formas de fundo encontradas são resultado da ação das correntes direcionadas das marés no transporte dos sedimentos do fundo estuarino bem como do controle exercido pelo rio no padrão desse transporte.

Os sedimentos arenosos respondem ao regime de fundo do estuário Potengi formando vários tipos de formas de leito, cada uma delas em equilíbrio com diferentes profundidades, variação na velocidade do fluxo da corrente e no tamanho das partículas transportadas. As *dunas* localizadas na porção mais profunda do canal principal mostram pequenas diferenças entre suas cristas em função de discretas variações nas profundidades ali ocorridas.

Conhecer detalhadamente os vários tipos de morfologia de fundo é um fator importante em casos de derramamentos de óleo mais densos do que a água como os óleos graxosos e parafinados. Pois, nestas situações, as grandes formas de leito do tipo *duna* encontradas no estuário Potengi de até 95 metros de comprimento por 3 metros de altura, podem constituir armadilhas naturais para o aprisionamento do óleo derramado.

A análise da variação dos parâmetros estatísticos e texturais baseado no método de Folk (1974), revelou-se de extrema importância no diagnóstico da sedimentação estuarina. O estuário Potengi é caracterizada por apresentar uma forte atuação da hidrodinâmica sobre sedimentos de diversas origens.

O desvio padrão, indicador do grau de seleção das amostras, mostrou a predominância de sedimentos moderados, pobremente, muito pobremente e bem selecionados, em decorrência do comportamento do mecanismo atuante das marés e da contribuição de várias fontes sedimentares.

A assimetria com uma distribuição de valores bastante variáveis (muito negativo, negativos, aproximadamente simétricos, positivos e muito positivos) retrata as flutuações energéticas dos mecanismos de maré e a influência de outro agente dinâmico, o vento.

A curtose, como nos parâmetros anteriores, identifica um regime deposicional oriundo de acentuadas oscilações hidrodinâmicas, em que as curvas leptocúrticas a muito leptocúrticas indicam zonas de maior energia, enquanto que as curvas platicúrticas a muito platicúrticas representam zonas de menor movimentação. O diâmetro médio demonstrou uma alta sensibilidade, possibilitando uma visualização clara das zonas de transição e outras inter-relações entre as classes texturais dos sedimentos de fundo.

A análise textural dos sedimentos permitiu a separação em 6 fácies distintas: silte arenoso, areia siltosa, areia lamosa com cascalho esparso, areia, areia com cascalho esparso e areia com cascalho. Sendo que a distribuição dos tipos texturais no leito estuarino apresentou-se compatível com os padrões hidrodinâmicos verificados.

A fácies sedimentar principal que predomina capeando o estuário Potengi, entre a Ponte do Igapó e sua desembocadura, foi a fácies arenosa. Em locais com correntes moderadas, ocorrem areias finas a médias e no canal principal de navegação onde as correntes são extremamente fortes, principalmente nas enchentes, o fundo é capeado por areia com cascalho esparso e areia com cascalho. A fração fina ocupa as zonas de baixa profundidade como as margens do estuário, os canais de maré, e tendem a crescer em direção a montante, em consequência da perda de intensidade das correntes de maré.

A zona montante do estuário Potengi apresenta morfologia típica de intenso assoreamento devido, não só à perda de competência do sistema fluvial, como também por constituir área preferencial para retenção de sedimentos. É caracterizada por profundidades relativamente baixas, sendo as formas de relevo positivo, representadas por bancos longitudinais e extensas zonas de planícies de maré.

A análise sedimentológica do material que capea o estuário Potengi entre a Ponte do Igapó e sua foz, mostra que este é fundamentalmente de natureza arenosa, proveniente na sua maior parte da plataforma continental adjacente, este material penetra no estuário devido a acentuada assimetria nas curvas de marés produzidas no estuário, em que a duração dos escoamentos de vazante são menores do que a dos de enchente, fazendo com que o material sólido carregados pelos rios Potengi e Jundiáí, não cheguem até a embocadura, permanecendo os sedimentos no interior do estuário em direção a montante, para os ciclos de maré considerados. Porém, exista também numerosos efluentes urbanos e industriais que contribuem com importante carga orgânica.



O estudo da evolução morfológica do estuário Potengi mostra que este é dominado por processos de assoreamento, havendo no entanto zonas relativamente bem definidas, que têm sofrido pequena evolução temporal na sua posição e área, onde a erosão predomina com na praia da Redinha. Estas, zonas estão localizadas principalmente na foz do estuário, onde o padrão das correntes interestuarinas apresentam os valores de velocidades mais elevados.

Embora os canais estejam em assoreamento (principalmente em direção a montante no estuário Potengi), foram as planícies de marés as unidades morfológicas onde a evolução foi mais acentuada. Esta, é traduzida pelo aparecimento de novos bancos e crescimento dos existentes, havendo uma certa migração geral para jusante. As margens do estuário mantiveram um traçado praticamente invariável, assim como os bancos ocupados pela vegetação.

Os lançamentos de dejetos urbanos e industriais no estuário Potengi, também contribuem para o assoreamento do canal principal de navegação. Para isso, é necessária a implantação e o funcionamento de uma estação de tratamento de esgotos urbanos, compatível com o volume de cargas existentes, respeitando a capacidade receptora e depuradora da bacia estuarina.

### **7.3. MAPEAMENTO DOS ECOSISTEMAS SENSÍVEIS AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO POR SENSORES REMOTOS**

Os dados aqui obtidos mostraram que dados orbitais de sensores remotos podem fornecer excelentes informações do índice de sensibilidade do litoral (ISL) e dos ecossistemas costeiros. Imagens do sensor ETM+ do Landsat 7 representam uma ferramenta poderosa e eficaz no mapeamento da localização e distribuição espacial de áreas de difícil acesso e mais sensíveis ao derramamento de óleo. As imagens orbitais associadas às fotografias aéreas oblíquas são de grande valor para a elaboração dos Mapas de Sensibilidade Ambiental (MSA). O uso correto desses mapas permitirá às equipes de combate ao derramamento de óleo otimizar a distribuição do controle do vazamento de óleo e dos recursos de proteção.

Do ponto de vista da sensibilidades ambiental dos ecossistemas costeiros, os manguezais e as planícies de marés constituem os ambientes mais sensíveis em casos de derrames de óleo. Os manguezais são um dos melhores ambientes para análise a partir de

sensores remotos, tanto no espectro eletro-óptico devido sua alta reflectividade no infravermelho próximo, quanto nas microondas devido sua textura rugosa.

A partir deste estudo é possível concluir que a integração de dados de sensores remotos com um sistema de informação geográfica (SIG), constitui a melhor estrutura de análise espacial integrada. A habilidade do SIG de combinar diferentes conjuntos de dados e a possibilidade de se interpretar simultaneamente as relações espaciais entre os vários ecossistemas sensíveis aos derrames de óleo, permitiu uma avaliação do risco ambiental, geração de mapas bases e de mapas temáticos, que são fatores significantes no processo de tomada de decisão em casos de eventuais derramamentos de óleo.

**CAPÍTULO 8:**  
**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Aanderaa Instruments. 1999. *Operating Manual Dataloggers 3660 / 3634*. Nesttun, Norway, 25 p.

Aanderaa Instruments. 1999. *Specification for Doppler Current Sensor 3500*. Data Sheet, D 288, Nesttun, Norway, 4 p.

Aanderaa Instruments. 1998. *Specification for S/T, C/T, S/T/D and C/T/D Sensors*. Data Sheet, D 310, Nesttun, Norway, 2 p.

Allen J.R.L. 1968. *Current Ripples: Their Relation to Patterns of water and Sediment Motion*. Amsterdam, North Holland Publ., 433 p.

Allen J.R.L. 1980. Sand waves. A model of origin and internal structure. *Sed. Geol.* **26**:281-328.

Alexanderson T. 1972. Mediterranean beachrock cementation: marine precipitation of Mg-Calcite. In: Stanley, D.J. (Ed), *The Mediterranean Sea: A Natural Sedimentation Laboratory*. Dowden Hutchison & Ross, Pennsylvania, pp.203-223.

Amos C.L. & King E.L. 1984. Sandwaves and sand ridges of the Canadian Eastern Seaboard. A comparison to global occurrences. *Marine Geol.*, **57**:167-208.

Araújo S.I., Silva G.H., Muehe D. 2000. *Minuta do Manual Básico para Elaboração de Cartas de Sensibilidade no Sistema PETROBRAS*. 170 p.

Ashley G. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, **60**:160-172.

Assumpção M. 1992. The regional intraplate stress field in South América. *Journal of Geophysical Research*, **97**: 11.889-11.903.

- Barros A.B.S.S. 1984. A Capacidade de Transporte dos Escoamentos de Maré no Estuário de Potengi, RN. Departamento de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 245 p.
- Bennett R.H., Li H., Richardson M.D., Fleischer P., Lambert D.N., Walter D.J., Briggs K.B., Rein C.R., Sawyer W.B., Carnaggio F.S., Young D.C. & Tooma S.G. 1992. Geoacoustic and geological characterization of surficial marine sediments by in situ probe and remote sensing techniques. In: R.A. Geyer (ed) *CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea*. Florida, CRC Press, 295-350.
- Bezerra F.H.R. 1998. Neotectonics in Northeastern Brazil. Ph.D. Thesis, University of London, London, UK.
- Bezerra F.H.R., Lima-Filho F.P., Amaral R.F.; Caldas, L.H.O. e Costa Neto, L.X. 1998. Holocene coastal tectonics in NE Brazil. In: Stewart I.S. and Vita-Finzi C. *Coastal Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, 146: 279-293.
- Bezerra F.H.R. & Vita-Finzi C. 2000. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brasil. *Geology*, 28: 591-594.
- Bezerra F.H.R., Amaro V.E., Vita-Finzi C., Saadi A. 2001. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 14: 61-75.
- Birkemeier W.A. 1981. Fast, accurate two-person beach survey. Coastal Engineering Technical Aid 81-11. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. *Coastal Engineering Research Center*, Vicksburg, Mississippi, 22p.
- Bokuniewicz H.J., Gordon R.B. & Kastens K.A. 1977. Form and migration of sand waves in a large estuary, long Island Sound. *Marine Geol.* **24**:185-199.



- Caldas L.H.O. 1996. *Geologia Costeira da Região de São Bento do Norte e Caiçara, Litoral Norte Potiguar*. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, 83 p.
- Costa K.M.D. 1991. Hidrobiologia e Biomassa Primária da Região Nordeste do Brasil entre as latitudes de 8<sup>0</sup>00'00'' e 2<sup>0</sup>44'30'' S e as longitudes de 35<sup>0</sup>56'30'' e 31<sup>0</sup>48'00'' W. Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Dissertação de Mestrado, 217p.
- Coutinho P. da N. 1986. Sugestões para Gerenciamento de Estuários. *Arq. Ciências Mar.*, **25**:77-86.
- Cunha E.M.S. 1982. *Caracterização e Planejamento Ambiental do Estuário Potengi*. Centro de Biociências, Depart. de Oceanografia e Liminologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Tese de Mestrado, 211 p.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A. & Boyd R. 1992. Estuary facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**(2): 1130-1146.
- Dalrymple R.W. & Rhodes R.N. 1995. Estuarine dunes and bars. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, edited by G.M.E. Perillo (Amsterdam Elsevier), 359-422 p.
- Dantas E.P. 1998. *Gravimetria e Sensoriamento Remoto: Uma aplicação ao Estudo da Tectônica Recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 98 p.
- Davies J.H. 1964. A Morphogenic Approach of World Shorelines. *Z. Geomorphology*, **8**:127-142.
- Davis J.L. 1977. *Geographical Variation in Coastal Development*. New York, Longman, 204 p.

- DHN - Departamento de Hidrografia e Navegação. 1966. Cartas de Correntes de Maré Porto de Natal. Rio de Janeiro, DHN, 11 p.
- DHN - Departamento de Hidrografia e Navegação. 1973. Carta Náutica nº802 do Porto de Natal. Rio de Janeiro, DHN.
- DHN - Departamento de Hidrografia e Navegação. 2000. Carta Náutica nº802 do Porto de Natal. Rio de Janeiro, DHN.
- Dias G.T.M. 1996. Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, *Anais*, Salvador, SBG, 423-426.
- Dyer K.R. 1973. *Estuaries: A Physical Introduction*. London, Wiley, 140 p.
- Dyer K.R. 1986. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. New York, Wiley, 342 p.
- Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2 ed., Chichester, Wiley, 195 p.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. 1996. ArcView GIS – The Geographic Information System for Everyone. Tutorial do Usuário, 340 p.
- Fairbridge R. 1980. The Estuary: It's Definition and Geodynamic Cycle. In: *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, Olausson E., Cato I. (eds), John Wiley & Sons, Chichester, p. 1-35.
- Feijó F.J. 1994. Bacia de Pernambuco-Paraíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8: 143-147.
- Ferreira J.M., Takeya M.K., Costa J.M., Moreira J.A.M., Assumpção M., Veloso J.A.V & Pearce R.G. 1987. A continuing intraplate earthquake sequence near João Câmara, northeastern Brazil – preliminary results. *Geophys. Res. Lett*, 14(10): 1042-1045.

- Ferreira J.M., Oliveira R.T., Takeya M.K., Assumpção M. 1998. Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Geophysical Journal International*, 134: 341-355.
- Fisher H.B. 1972. Mass Transport Mechanisms in Partially Stratified Estuaries. *J. Fluid Mech.*, **53**:672-687.
- Flemming B.W. 1976. Side Scan Sonar: a practical guide. *Inst. Hydrology Rev.*, **53**(1): 65-92.
- Flemming B.W. 1978. Underwater sand dunes along the southeast African continental margin - observations and implications. *Marine Geol.*, **26**:177-198.
- Flemming B.W. 1980. Sand transport and bedform patterns on the continental shelf between Durban and Port Elizabeth (southeast African continental margin). *Sedimentary Geol.* **26**: 179-205.
- Flemming B.W. 1982. Dynamics of large transverse bedforms on the southeast African Continental Shelf. Hamilton, Ontario, *IAS Abstracts of Papers*, 73 p.
- Flemming B.W. 1988. Zur Klassifikation subaquatischer, stromungsversaler Transportkörper. *Boch. Geol. u. geotechn. Arb.*, v 29, 44-47 p.
- Flood R.D. 1983. Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**:630-639.
- Field M.E., Nelson C.H., Cacchione D.A., Drake D.E. 1981. Sand waves on an epicontinental shelf. Northern Bering Sea. *Marine Geology*, **42**:233-258.
- Folk R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Texas , Hemphill Publishing Company, 181 p.

- Franco A.S. 1981. *Tides, Fundamentals, Analysis and Prediction*. São Paulo, IPT, 232 p.
- Franco A.S. 2000. MARE'S: Programa para previsão e Análise. In: Manual, BSP, São Paulo, 36 p.
- Frazão E.P., Santos M.L.S., El-Robrini M. 2001. Estudo da Temperatura, Salinidade e Massas D'Água na Plataforma Continental do Maranhão e Área Oceânica Adjacente. In: SBG / Núcleo Nordeste, Simpósio de Geologia do Nordeste, 17, Natal, *Atas*, 31-32.
- Frazão E.P. & Vital H. 2002a. *Estudo Batimétrico e Sonográfico do Estuário do Rio Potengi - RN*. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, *Anais*, 1: 90.
- Frazão E.P. & Vital H. 2002b. *Influences of the Sea-Level Flutuations on the Evolution of the River Potengi Estuary and Adjacent Continental Shelf*. In: 2<sup>nd</sup> Conference of the IGCP464 Project sponsored by the Institute of Oceanography of the University of São Paulo, the United Nations Education, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), and the international Union of Geological Sciences (IUGS), São Paulo e Cananéia.
- Frazão E.P., Castro A.F., Amaro V.E., Vital H., Souza F.E.S. 2003. Gis and Remote Sensing Techniques Applied to Environmental Impact Diagnosis Associated to Oil Activities in Mangrove Areas in the Rio Grande do Norte State. In: Mangrove 2003 International Conference, Salvador, CD-ROM.
- Gilbert G.K. 1914. The transportation of debris by running water. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 86, 263 p.
- Gomes J.R.C., Gatto C.M.P.P., Souza G.M.C., et al 1981. Geologia e mapeamento regional. In: Projeto RADAMBRASIL / Ministério das Minas e Energia. Folhas SB. 24/25 Juagaribe/Natal. Rio de Janeiro, p. 27-176.

- Gross M.G. 1987. *Oceanography: a View of the Earth*. New Jersey, Prentice-Hall, 406 p.
- Guy H.P., Simons D.B & Richardson E.V. 1966. *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61*. U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 642-I, 96 p.
- Hansen D.V. & Rattray Jr M. 1966. New Dimensions in Estuary Classification. *Limnol. Oceanogr.*, **11**(3):319-325.
- Harms J.C., Choquette P.W. & Brady M.J. 1974. Carbonate sand waves, Isla Mujeres, Yucantan. In: Ward W.C. e Weidie A.E. (eds)., *Geology and Hydrology of Northeastern Yucatan*. New Orleans Geol. Soc., 60-84 p.
- Harms J.C., Southard J.B & Walker R.G. 1982. *Structure and sequence in clastic rocks*. SEPM Short Course N° 9, 250 p.
- Harris P.T. & Collins M.B. 1985. Bedform distributions and sediment transport paths in the Bristol Channel and Severn Estuary, UK. *Marine Geology*, **62**:153-166.
- Harris P.T., Ashley G.M., Collins M.B., & James A.E. 1986. Topographic features of the Bristol Channel seabed. A comparison of SEASAT (synthetic aperture radar) and side-scan sonar images. *Int. Jour. Remote Sensing*, **7**:119-136 p.
- Hayes M.O. 1979. Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime. In: *Barrier Islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Leatherman, S.P. (ed), Academic Press, New York, 1-27.
- Heip C. 1991. Biological Aspects of the Biogeochemistry of Estuaries. Lecture Notes of the Intensive Summer Course on Biogeochemical Processes in Estuaries, Melreux (19 Aug./6 Sept.), não publicado.
- Hidroconsult-Hidrologia. 1978. Influência da Maré nos Rios Potengi e Jundiaí, Rio de Janeiro.



- Hopley D. 1986. Beachrock as a sea-level indicator. In: O.V.d. Plassche (Ed), Sea Level Research: A manual for collection and evaluation of data. Geo books, Norwich, pp. 157-173.
- Hunter R.E., Thor D.R. & Swisher M.L. 1982. Depositional and erosional features on the inner shelf, Northeastern Bering Sea. *Geologie en Mijnbouw*, **61**:49-62.
- Jones N.S., Kain J.M. & Stride A.H. 1965. The movement of sand waves on Warts Bank, Isle of Man. *Marine Geol.* **3**:329-336 p.
- Kennedy J.F. 1969. The formation of sediment ripples, dunes and antidunes. In: Sears W.R., (ed)., *Annual Review of Fluid Mechanics*, v.1. Palo Alto, C.A., Annual Reviews, Inc., 147-168 p.
- Langhorne D.N. 1982. A study of the dynamics of a marine sand-wave. *Sedimentology*, **29**:571-594.
- Lima C., Nascimento E., Assumpção M. 1997. Stress orientation in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis: implications for force models in the South American plate. *Geophysical Journal International*, **130**: 112-124.
- Mabesoone J.M., Campos-e-Silva A., Buerlen K., 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geociências*, **2**: 173-188.
- Mabesoone J.M. *et al.* 1991. *Estudos Geológicos, revisão Geológica da Faixa Sedimentar Costeira de Pernambuco, Paraíba e Parte do Rio Grande do Norte*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 252 p.
- Mabesoone J.M. 1996. Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba-Rio Grande do Norte. In: IV Simp. sobre o Cretáceo do Brasil. UNESP. Rio Claro - SP.

- McCave I.N. 1971. Sand waves in the North Sea off of the coast of Holland. *Marine Geology*, 10:199-225.
- Middleton G.V & Southard J.B. 1986. *Mechanics of sediment movement*, 2<sup>nd</sup> ed. SEPM Short Course, n°3, 246 p.
- Miranda L.B., Castro B.M., Kjerfve B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 411 p.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2002. *Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo*. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos, Programa de Proteção e Melhoria da Qualidade Ambiental, Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho.
- Muehe D. 1996. Geomorfologia Costeira. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. (ed.) *Geomorfologia: Exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro, Ed. Bertrand Brasil. p. 191-238.
- Nimer E. 1972. Climatologia da Região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia*, 34 (2): 3-51.
- Nogueira A.M.B. 1982. O Cenozóico Continental da Região de Natal-RN. *Boletim do Departamento de Geologia*, v3.
- NOAA 1997. *Environmental Sensitivity Index Guidelines, Version 2.0*. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 115. Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 79 p. + appendices.
- Odom Hydrographic System. 2000. *Hydrotrac Installation / Operation Manual*. Odom Hydrographic System Inc., 55 p.

- Odom Hydrographic System. 2000. *Hydrotrac Software version 2.xx*. Odom Hydrographic System Inc.
- Officer C.B. 1976. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*. New York, Wiley, 465 p.
- Oliveira M.I.M., Bagnoli E., Farias C.C, Nogueira A.M.B. & Santiago M. 1990. *Considerações sobre a geometria, petrografia, sedimentologia, diagênese e idade dos "beachrocks" do Rio Grande do Norte*. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Natal, Anais, 2: 621-634.
- Oliveira D.B.F. de. 1985. Produção Primária do Fitoplâncton do Estuário do Rio Potengi. Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, Dissertação de Mestrado em Oceanografia Biológica, 168 p.
- Ottmann F. 1968. L'étude des Problèmes Estuariens. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* (2), V.X., fasc. 4:329-353.
- Pereira L.B.F. 1999. *Mapeamento Geológico, Estratigrafia Cenozóica e Estruturação Neotectônica da Região Costeira entre Ponta Negra e Redinha e Estuário do Rio Potengi Natal-RN*. Relatório de Graduação. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 61 p.
- Ponçano W.L. 1985. *Sedimentação Atual Aplicada a Portos no Brasil*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 278 p.
- Portobrás. 1979. Plano Diretor Portuário do Brasil - P.D.D., Porto de Natal - RN, v.2.
- Prandle D. 1985. On Salinity Regimes and the Vertical Structure of Residual Flows in Narrow Tidal Estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **20**:615-635.

- Pritchard D.W. 1967. What is an estuary? Physical viewpoint. In: Lauff G.H. *Estuaries*. Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science, 3-5.
- Pritchard D.W. & Carter H.H. 1971. Classification of estuaries. In: Schubel J.R. (eds). *Estuarine Environment: Estuaries and Estuarine Sedimentation*. Washington D.C., American Geological Institute. Cap.II, 9-11 p.
- Pritchard D.W. 1989. Estuarine Classification - A Help or a Hindrance. In: Neilson B.J., Kuo A. & Brukaka J. (eds.). *Estuarine Circulation*. Clifton, Humana, 1-38 p.
- Reinson G.E. 1992. Transgressive barrier island and estuarine systems. In: Walker R.G. & James N.P., (eds). *Facies models. Response to sea level changes*. Ontario, Geological Association of Canada, Love Printing Service Ltd. 179-194.
- Russel-Gargill W.G.A. 1980. *Recent development in Side Scan Sonar techniques*. Cape Town, Central Acoustics Laboratory. University of Cape Town (South Africa), 138p.
- Salim J. & Coutinho. 1973. Aspectos sedimentológicos do estuário do Rio Potengi, Natal, Rio Grande do Norte. *Estudos Sedimentológicos*, Natal, 3(4): 141-153.
- Santos A. 1986. As Águas da Região de Carajás. In Almeida Jr. J.M.G. *Carajás, Desafio Político, Ecologia e Desenvolvimento*. São Paulo, Ed. Brasiliense/CNPq, 156-183.
- Scholten J.J. 1972. Beach Rock. A literature study with special reference to the recent literature. *Zbl. Geol. Palaont., Teil 1*, 71:655-672.
- Scott C.F. 1993. Canonical Parameters for Estuarine Classification. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 36:529-540.

- Schubel J.R. 1971. Classification of estuaries. In: Schubel J.R., (ed.). *Estuarine environment: estuaries and estuarine sedimentation*. Washington D.C., American Geological Institute. Cap.II, 2-8 p.
- SEPLAN/RN. 1986. *Caracterização e mapeamento dos manguezais do Rio Potengi*. Natal (RN), 67 p.
- Stride A.H. 1982. *Offshore Tidal Sands. Process and Deposits*. London, Chapman and Hall, 213 p.
- Suguio K., Bidegain J.C. & Mörner N.A. 1986. Dados Preliminares Sobre as Idades Paleomagnéticas do Grupo Barreiras e da Formação São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 16.
- Suguio K. 1999. Recent progress in Quaternary geology of Brazil. *Episodes*, **22**: 217-220.
- Surfer for Windows User's Guide, Contouring and 3D Surface Mapping. 1994. The Surfer for Windows manual as written by: Doug Keeler: 85p.
- Valeport Limited. 1995. Model 108 MkIII and 308 Operation Manual. Townstal Industrial Estate, Dartmouth, 29 p.
- Yalin M.S. 1964. Geometrical properties of sand waves. In: *Am. Soc. Civil Engineers Proc.*, Jour. Hydraulics Div., no. HY5, **90**:105-119 p.

# ***ANEXOS***



# ***ANEXO 01***

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E GEOFÍSICA**  
**GRUPO DE PESQUISA EM GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA E MONITORAMENTO AMBIENTAL (GGEMMA)**

**NIVELAMENTO DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA**

**Local:** TRAPICHE DA CAPITANIA DOS PORTOS DO RN  
**Nivelamento:** RN-1/RN-2/RÉGUA DE MARÉ  
**Data:** 10/11/2001  
**Instrumento:** Nivel *LEICA* NA724  
**No.** \_\_\_\_\_

**Observador:** EUGÊNIO P. FRAZÃO  
**Anotador:** EUGÊNIO P. FRAZÃO  
**Hora do início:** 08:35 hs **Hora do fim:** 09:10 hs  
**Mira AV:** \_\_\_\_\_ **No.** \_\_\_\_\_ **Mira AR:** \_\_\_\_\_

Est. N°.	Pontos Visados		MIRA AR					MIRA AV					Distância entre miras	AR - AV		Altitude	Cond. Tempo		Observações
	AR	AV	Central	Inf+Sup	Inferior	Superior	Inf-Sup	Central	Inf+Sup	Inferior	Superior	Inf-Sup		+	-		Vis.	Vento	
	Transp.	-		-	→	-			-	-	-								Régua - 3500 mm + 1059 mm
								<u>I</u>	<u>D</u>	<u>A</u>									<u>Σ IDA + VOLTA</u> 2
1	RN-1	RN-2	1246	2490	1191	1299	108	1288	2576	1268	1308	40	14,8	- 42	B	F		O zero da régua está 455,9 cm abaixo da RN-1.	
2	RN-2	RÉGUA	1288	2576	1268	1308	40	2307	4616	2210	2406	196	23,6	- 1019	B	F			
												Som. Dist. (m) =	38,4	Desnível =	- 1061				O desnível entre o RN-1 e o zero da régua é 455,9 cm.
					←		<u>V</u>	<u>Q</u>	<u>L</u>	<u>T</u>	<u>A</u>								12 mm √ K
1	RÉGUA	RN-2	2264	4530	2169	2361	192	1250	2500	1227	1273	46	23,8	1014	B	F		12 mm √ 0,0781	
2	RN-2	RN-1	1250	2500	1227	1273	46	1207	2413	1150	1263	113	15,9	43	B	F		12 x 0,027946	
												Som. Dist. (m) =	39,7	Desnível =	1057				T = 3,35 mm
												Som. Dist. Total (m) =	78,1	erro (mm) =	4				

Calculado por: EUGÊNIO P. FRAZÃO

Verificado por: SO - HN - ELIAS

Anexo 01 - Ficha de nivelamento da estação maregráfica na Capitania dos Portos.

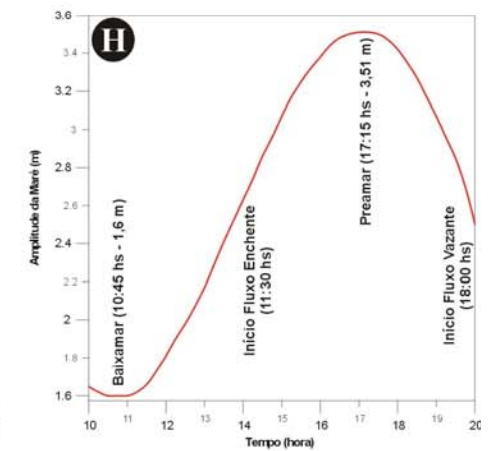
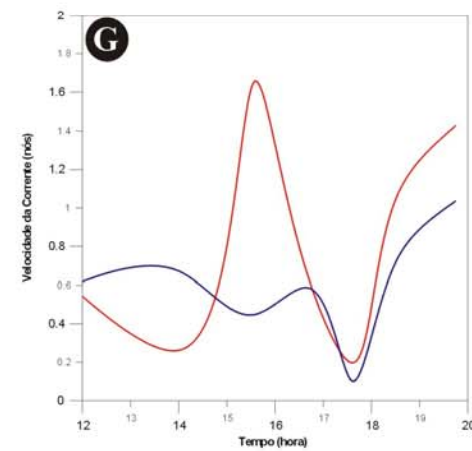
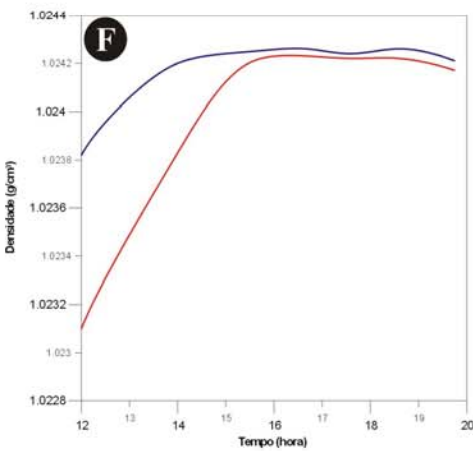
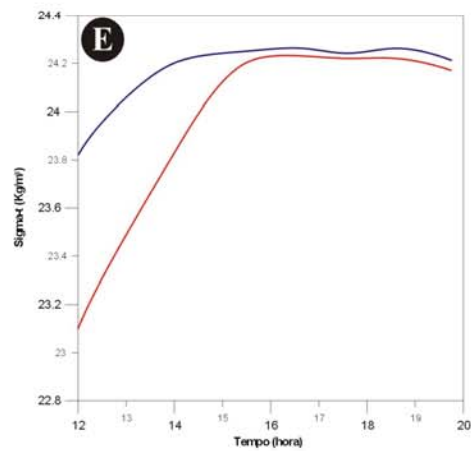
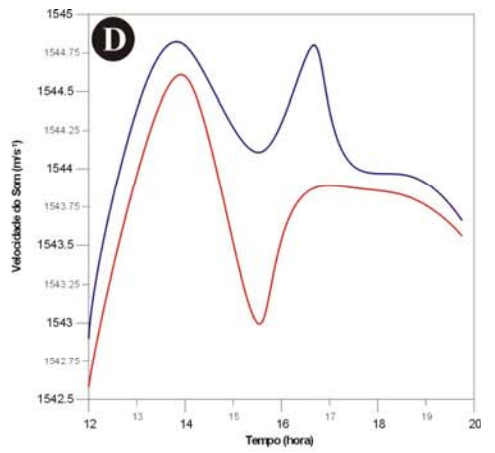
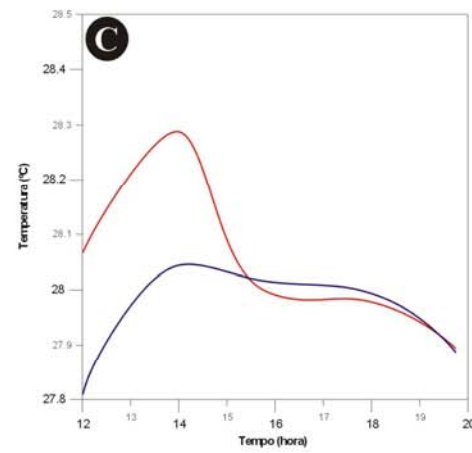
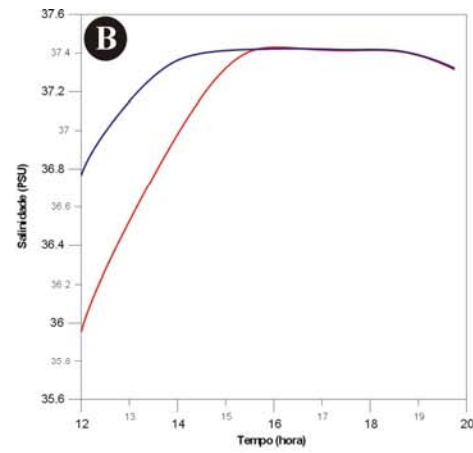
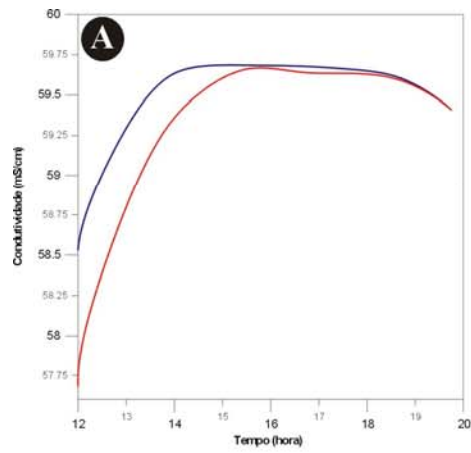
# ***ANEXO 02***

**Anexo 2** - Valores mínimos, médios e máximos da amplitude da onda de maré dinâmica durante as marés de sizígia e quadratura para o estuário Potengi nos anos de 2001 e 2002.

PERÍODO	MARÉ	Ano 2001			Ano 2002		
		AMP. MÍN (m)	AMP. MÉD (m)	AMP. MÁX (m)	AMP. MÍN (m)	AMP. MÉD (m)	AMP. MÁX (m)
Janeiro	S	-0.02	1.27	2.57	0.02	1.28	2.53
	Q	0.57	1.29	2.01	0.54	1.32	2.09
Fevereiro	S	-0.1	1.31	2.72	-0.1	1.34	2.78
	Q	0.71	1.3	1.89	0.57	1.29	2.01
Março	S	-0.08	1.34	2.77	-0.09	1.37	2.83
	Q	0.77	1.33	1.89	0.8	1.34	1.87
Abril	S	0.06	1.39	2.72	0.03	1.37	2.71
	Q	0.73	1.33	1.94	0.75	1.33	1.91
Maio	S	0.17	1.35	2.54	0.13	1.35	2.56
	Q	0.57	1.35	2.14	0.65	1.35	2.04
Junho	S	0.16	1.31	2.46	0.24	1.32	2.4
	Q	0.59	1.38	2.17	0.57	1.37	2.17
Julho	S	0.1	1.29	2.48	0.23	1.29	2.35
	Q	0.65	1.39	2.13	0.6	1.39	2.17
Agosto	S	-0.05	1.31	2.67	0.14	1.29	2.44
	Q	0.63	1.33	2.03	0.63	1.36	2.08
Setembro	S	-0.08	1.33	2.75	-0.05	1.33	2.7
	Q	0.75	1.31	1.87	0.62	1.29	1.96
Outubro	S	-0.03	1.34	2.72	-0.08	1.35	2.77
	Q	0.74	1.32	1.91	0.75	1.33	1.9
Novembro	S	0.09	1.31	2.53	-0.02	1.34	2.69
	Q	0.64	1.31	1.99	0.65	1.33	2.01
Dezembro	S	0.1	1.27	2.44	0.05	1.29	2.53
	Q	0.53	1.31	2.09	0.57	1.34	2.1
MÉDIA	S	<b>0.03</b>	<b>1.32</b>	<b>2.61</b>	<b>0.04</b>	<b>1.32</b>	<b>2.61</b>
	Q	<b>0.66</b>	<b>1.33</b>	<b>2.01</b>	<b>0.64</b>	<b>1.33</b>	<b>2.03</b>
DEFASAGEM	-	<b>0.63</b>	<b>0.01</b>	<b>0.60</b>	<b>0.6</b>	<b>0.01</b>	<b>0.58</b>

S = Sizígia, Q = Quadratura, AMP. MIN (m) = Amplitude mínima em metros, AMP. MED (m) = Amplitude média em metros e AMP. MAX (m) = Amplitude máxima em metros.

# ***ANEXO 03***



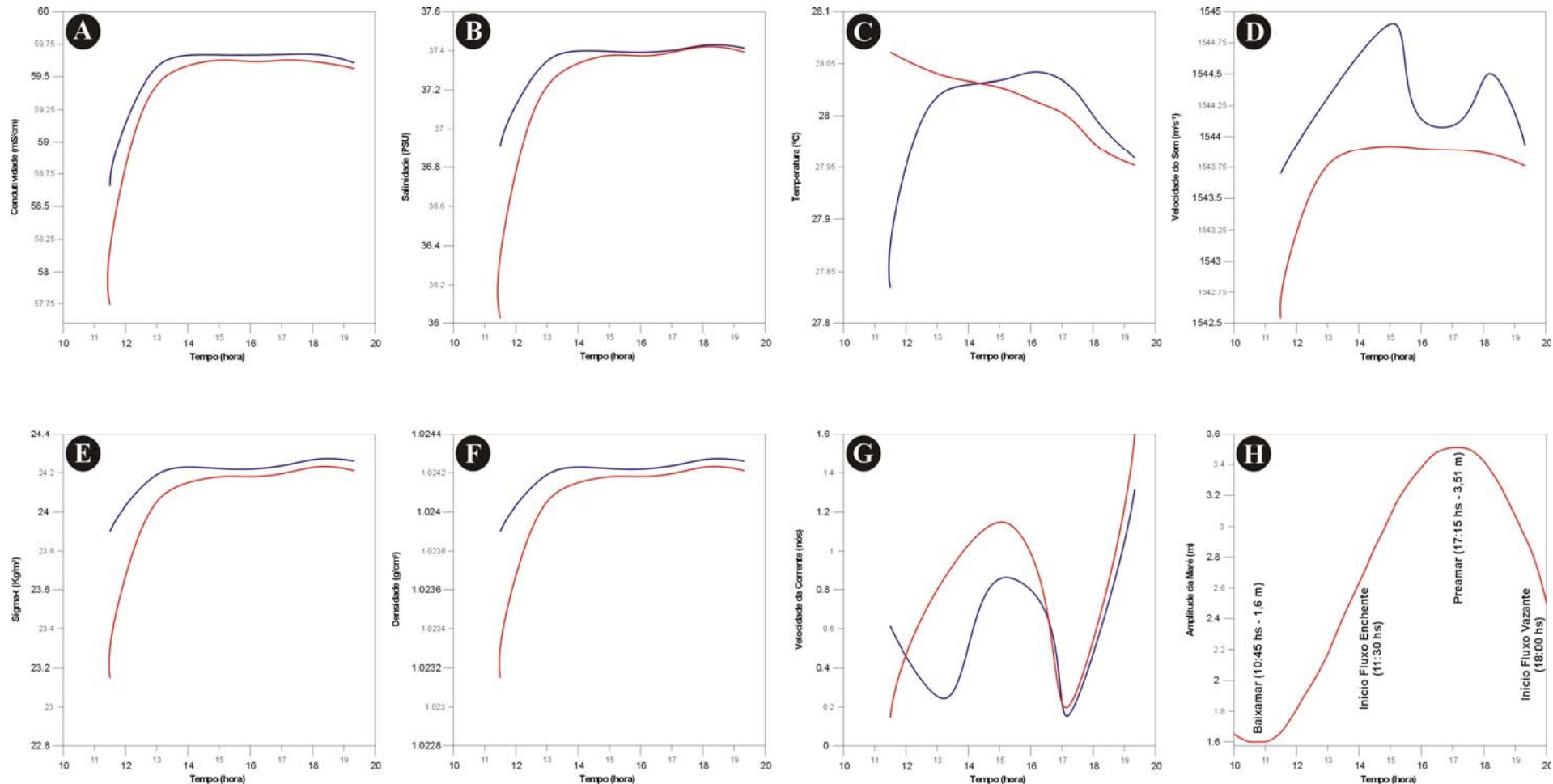
**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

Anexo 03 - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 04 no dia 21/11/2002.

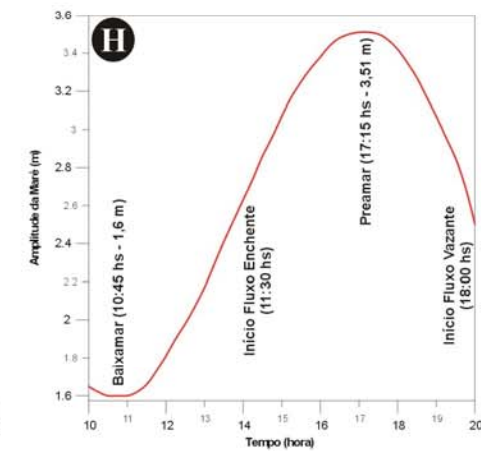
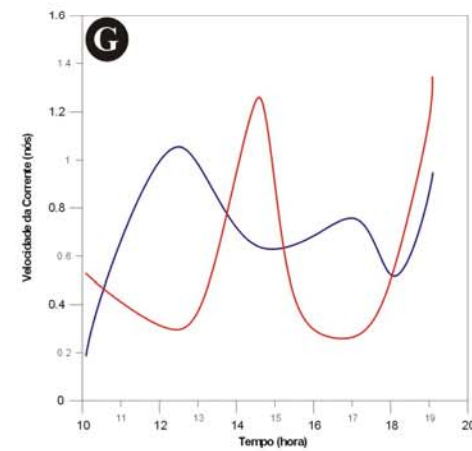
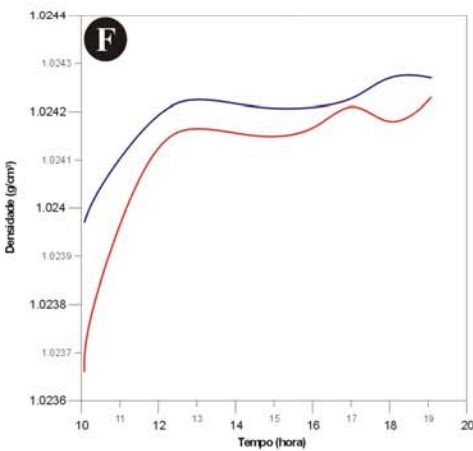
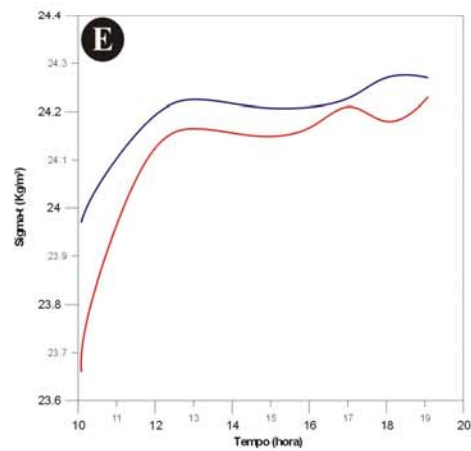
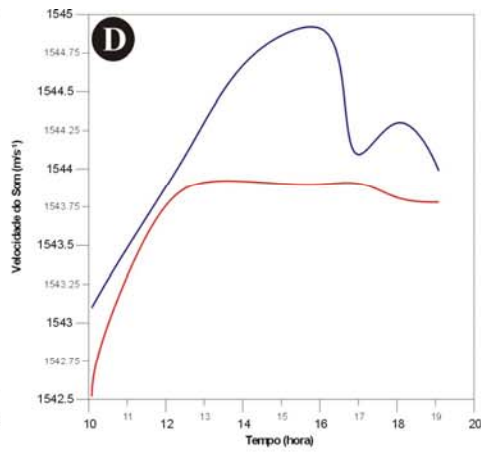
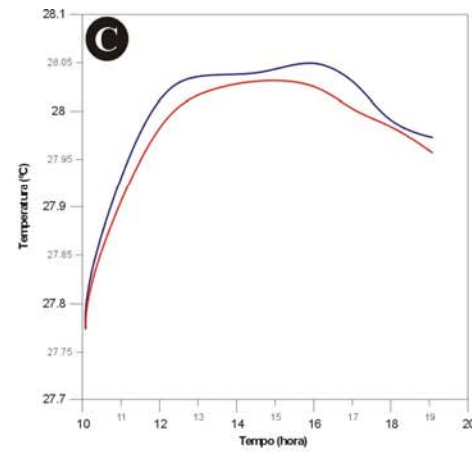
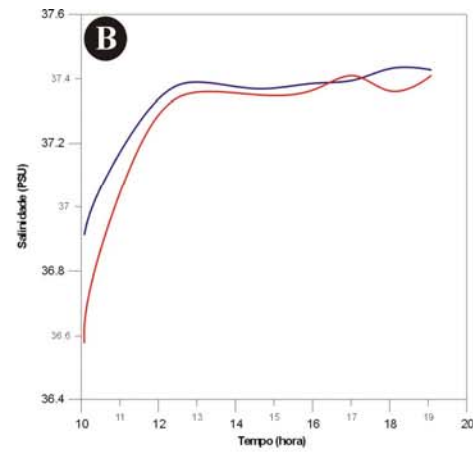
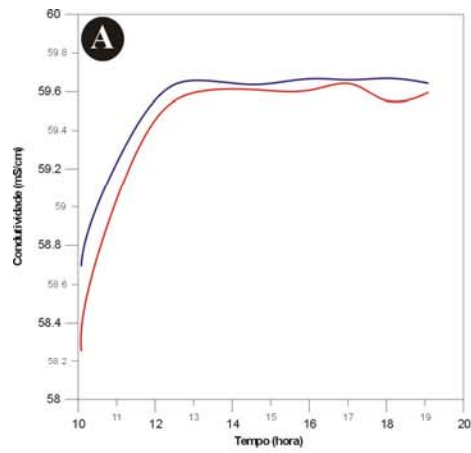




**LEGENDA**

— Águas de Superfície  
 — Águas de Fundo

**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 05 no dia 21/11/2002.

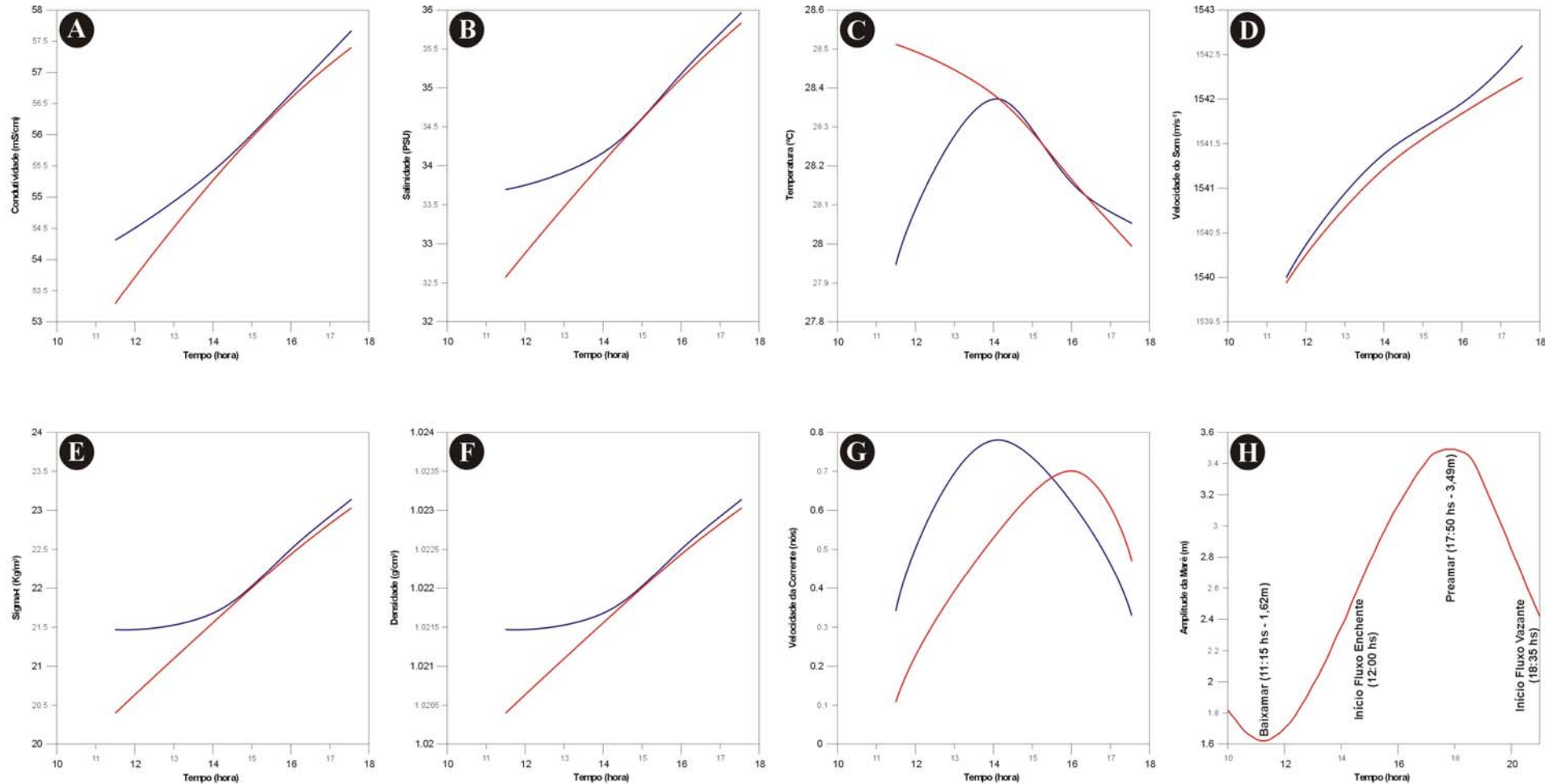


**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

Anexo 03 - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 06 no dia 21/11/2002.

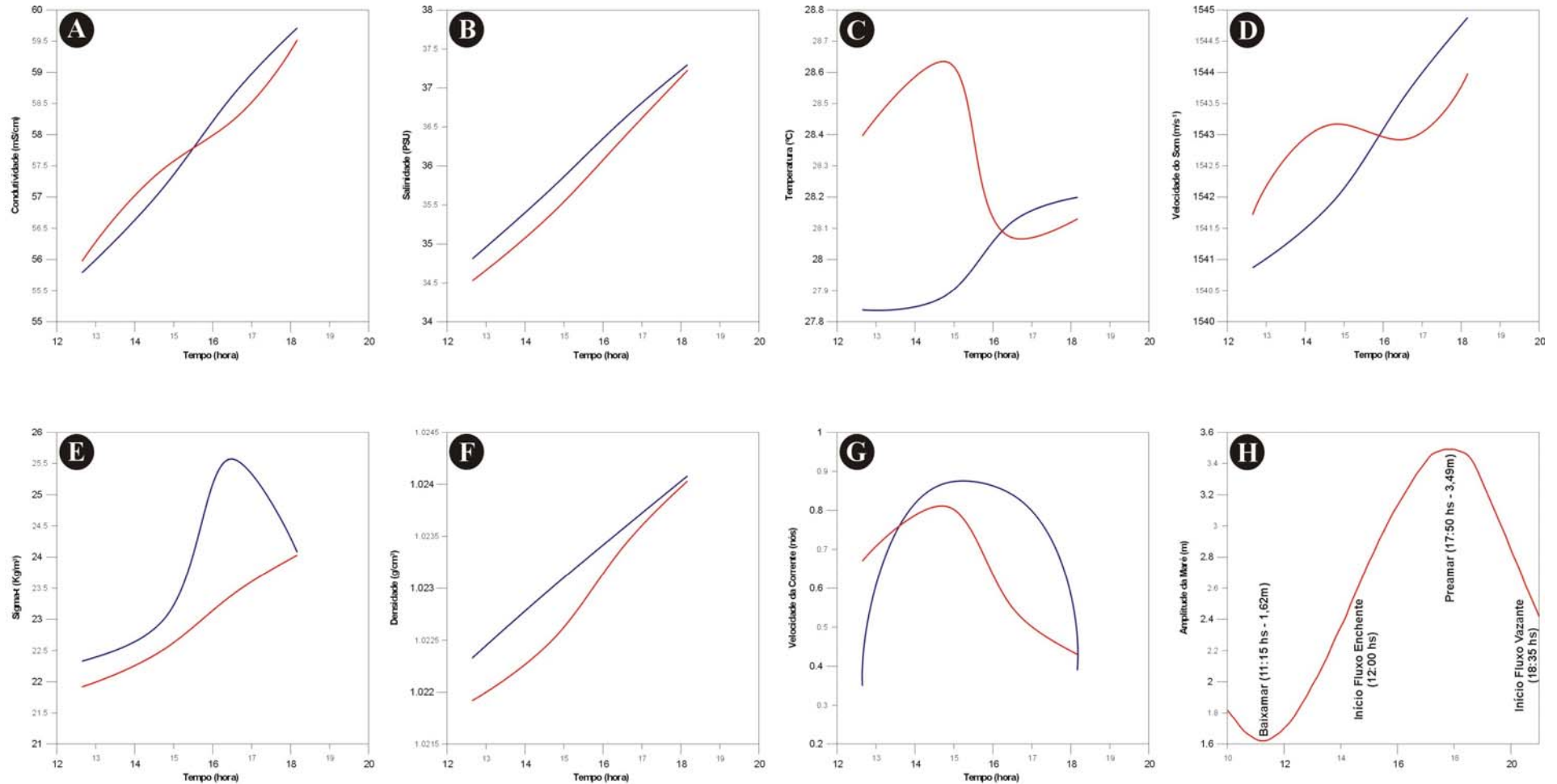


**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 01 no dia 22/11/2002.

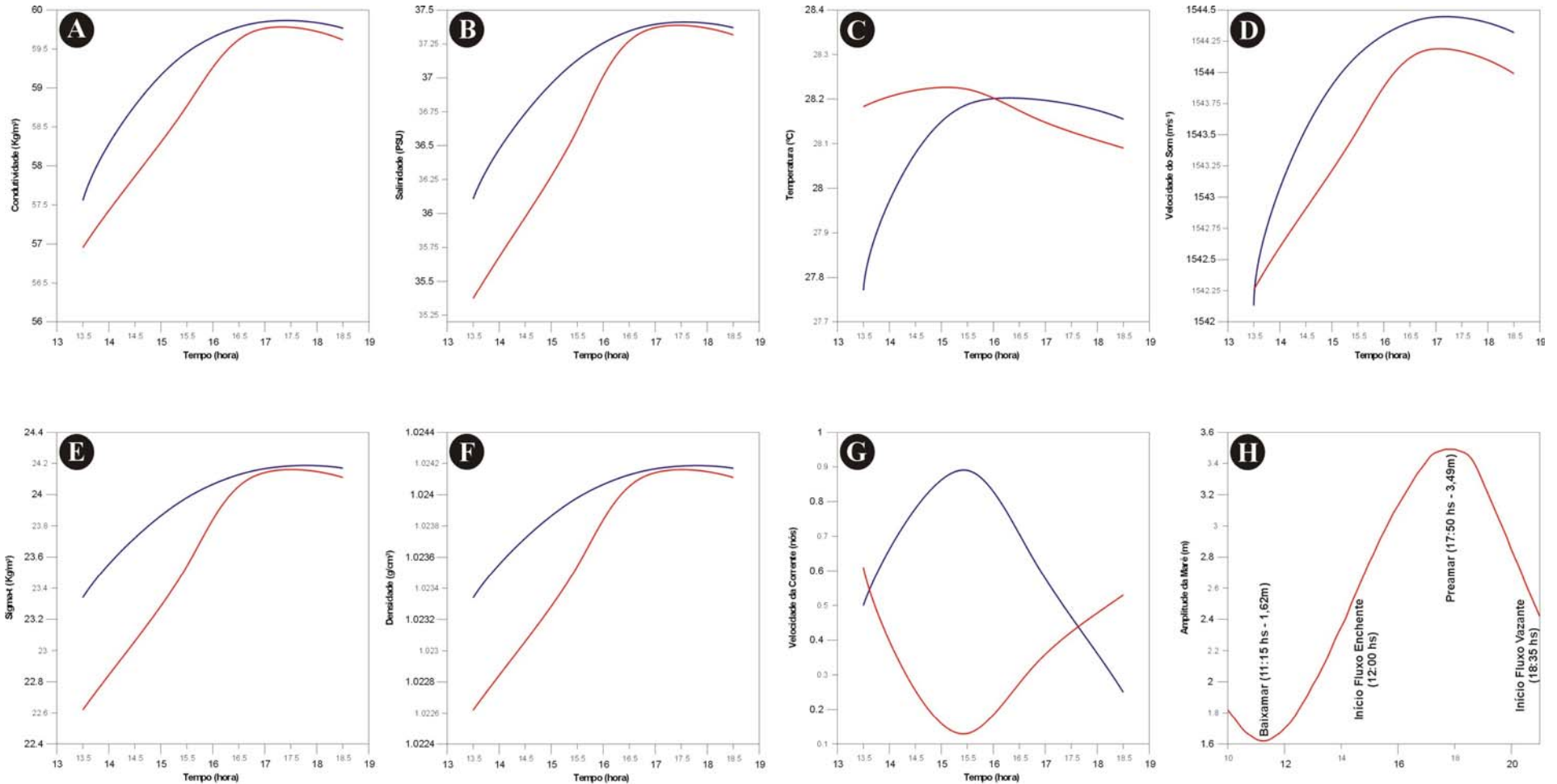


**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 02 no dia 22/11/2002.



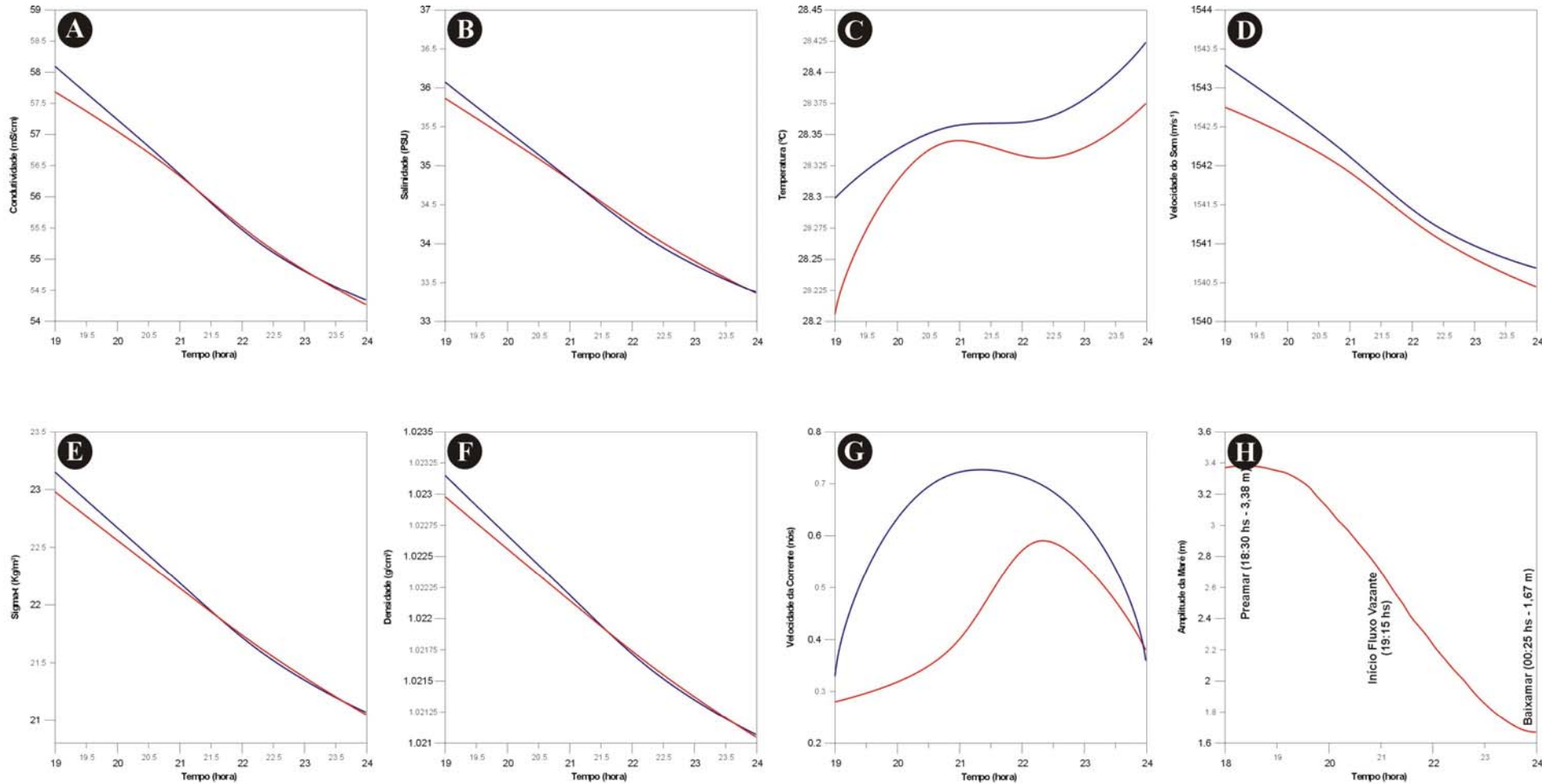
**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

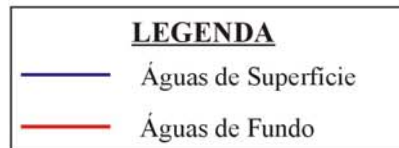
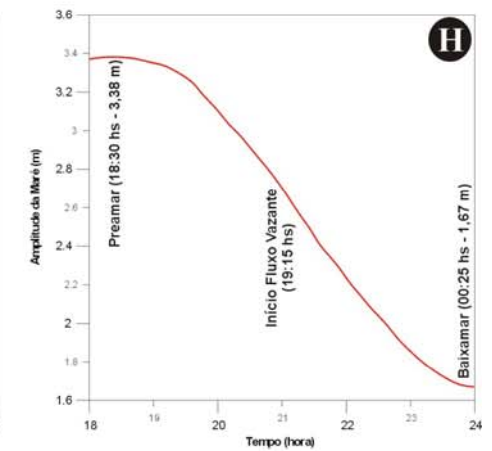
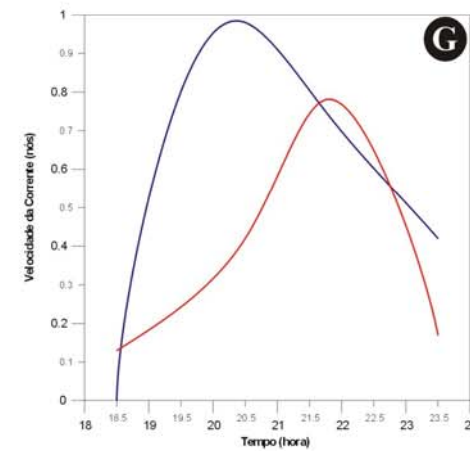
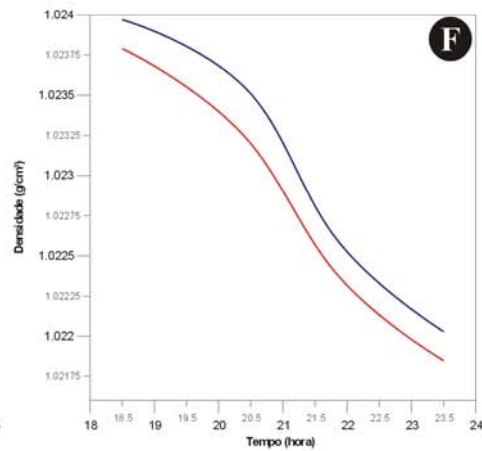
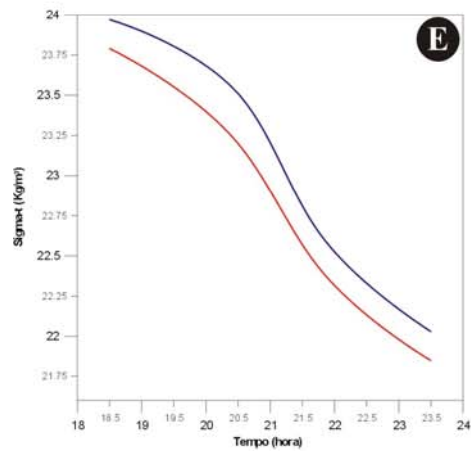
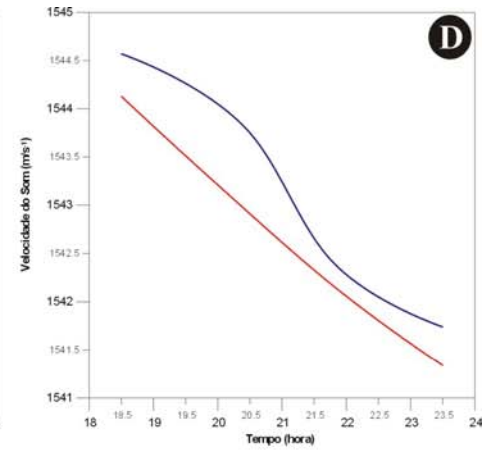
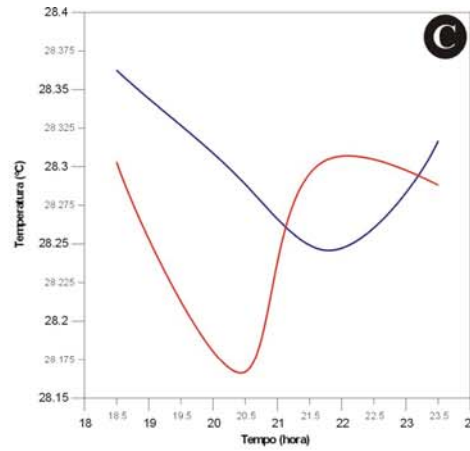
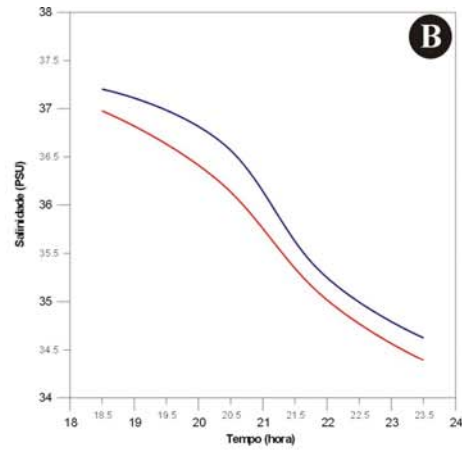
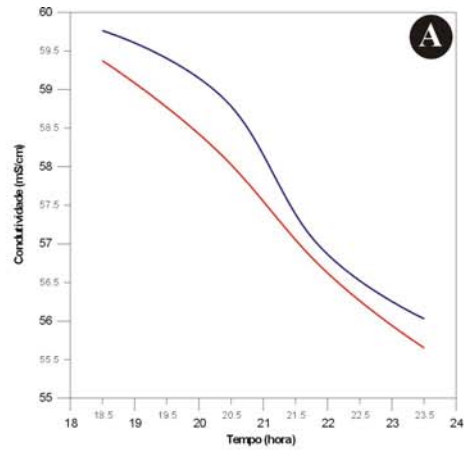
**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 03 no dia 22/11/2002.



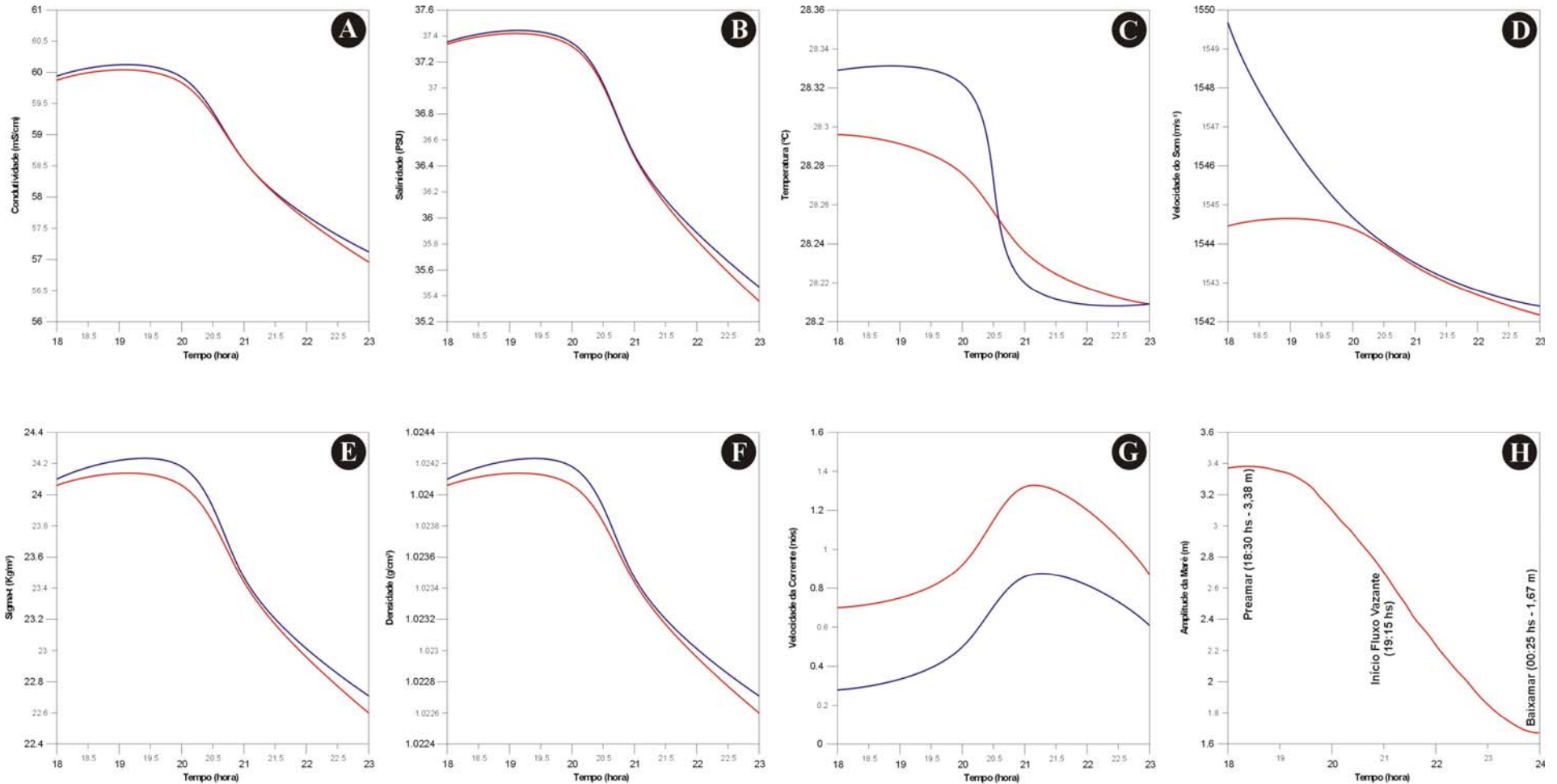


**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 01 no dia 23/11/2002.





Anexo 03 - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 02 no dia 23/11/2002.



**LEGENDA**

— Águas de Superfície

— Águas de Fundo

**Anexo 03** - Variação da condutividade (A), salinidade (B), temperatura da água (C), velocidade do som (D), sigma-t (E), densidade (F), velocidade da corrente (G) e amplitude da maré (H) para estação fixa 03 no dia 23/11/2002.

# ***ANEXO 04***

Amostra	Parâmetros Estatísticos do Tamanho do Grão					Carbonato (%)	Matéria Orgânica (%)	Classificação de Folk (1974)	Classificação pela média
	Tendência Central		SIG	SK <sub>1</sub>	KG				
	MG	M <sub>Z</sub>							
PT-001	0,021	-0,045	0,640	-0,019	1,356	1,06	0,24	Areia com cascalho esparso	Areia muito grossa
PT-002	1,210	1,208	0,633	0,236	1,623	1,04	0,64	Areia	Areia média
PT-003	2,160	2,419	1,016	0,425	1,191	6,58	6,09	Areia Siltosa	Areia fina
PT-004	2,171	2,413	0,962	0,393	1,106	4,60	4,70	Areia Siltosa	Areia fina
PT-005	2,035	2,108	1,004	0,218	1,511	6,60	4,76	Areia	Areia fina
PT-006	2,061	2,302	1,228	0,342	1,567	6,47	3,94	Areia Siltosa	Areia fina
PT-007	1,089	1,134	0,689	0,058	1,777	4,99	0,71	Areia com cascalho esparso	Areia média
PT-008	1,078	1,112	0,592	0,285	1,013	2,12	0,20	Areia com cascalho esparso	Areia média
PT-009	1,115	1,143	0,595	0,265	0,970	1,55	0,06	Areia	Areia média
PT-010	0,735	0,789	0,687	0,036	1,275	1,46	0,14	Areia com cascalho esparso	Areia grossa
PT-011	1,538	0,778	1,516	-0,496	0,889	5,49	0,34	Areia com cascalho esparso	Areia grossa
PT-012	0,147	0,161	0,584	0,219	0,960	1,80	2,00	Areia com cascalho esparso	Areia grossa
PT-013	0,657	0,666	0,591	0,110	1,078	2,59	0,34	Areia com cascalho esparso	Areia grossa
PT-014	0,180	0,187	0,535	0,192	1,369	0,84	0,13	Areia	Areia grossa
PT-015	1,241	1,329	0,700	0,322	1,571	1,62	0,37	Areia	Areia média
PT-016	1,579	1,588	0,591	0,119	1,155	1,90	0,56	Areia	Areia média
PT-017	1,161	0,769	1,316	-0,279	0,614	1,93	0,76	Areia com cascalho	Areia grossa
PT-018	2,018	1,966	0,707	0,062	1,599	2,91	1,11	Areia	Areia média
PT-019	2,097	2,268	0,879	0,365	1,375	4,35	0,53	Areia	Areia média
PT-020	1,729	1,836	0,835	0,278	1,309	6,38	3,15	Areia Siltosa	Areia fina
PT-021	1,011	0,755	1,253	-0,174	0,723	4,25	0,26	Areia com cascalho esparso	Areia grossa
PT-022	1,141	1,154	0,589	0,241	1,016	0,86	1,57	Areia	Areia média
PT-023	0,073	-0,389	1,134	-0,447	1,076	1,43	0,18	Areia com cascalho	Areia muito grossa
PT-024	-	-	-	-	-	-	-	Areia com cascalho	Cascalho
PT-025	1,092	1,117	0,582	0,265	1	0,89	0,13	Areia com cascalho esparso	Areia média
PT-026	1,564	1,463	0,479	0,014	1,621	2,02	0,16	Areia	Areia média
PT-027	1,163	1,171	0,632	0,260	1,156	4,09	0,40	Areia	Areia média
PT-028	1,216	1,302	0,699	0,329	1,578	2,29	0,33	Areia	Areia média
PT-029	1,581	1,594	0,613	0,139	1,181	33,77	2,05	Areia	Areia média
PT-030	1,550	1,481	0,716	0,046	1,595	2,16	2,30	Areia	Areia média
PT-031	4,120	3,506	1,896	-0,262	0,869	6,79	5,23	Silte arenoso	Areia muito fina
PT-032	1,589	1,616	0,687	0,202	1,288	2,96	0,99	Areia	Areia média
PT-033	1,116	1,141	0,649	0,292	1,119	4,51	0,57	Areia com cascalho esparso	Areia média
PT-034	1,113	1,139	0,662	0,013	1,724	1,94	1,71	Areia com cascalho esparso	Areia média
PT-035	1,560	1,593	1,143	-0,006	1,872	9,48	3,02	Areia com cascalho	Areia média

<b>PT-036</b>	1,089	0,746	1,529	-0,141	0,694	11,60	3,45	Areia com cascalho	Areia grossa
<b>PT-037</b>	1,729	1,852	0,701	0,378	1,666	2,80	2,77	Areia	Areia média
<b>PT-038</b>	2,105	2,125	0,656	0,197	1,290	6,43	0,48	Areia	Areia fina
<b>PT-039</b>	1,027	0,585	1,191	-0,335	0,620	0,80	3,12	Areia com cascalho	Areia grossa
<b>PT-040</b>	1,173	1,196	0,601	0,292	1,779	2,00	1,70	Areia	Areia média
<b>PT-041</b>	1,068	1,108	0,666	0,063	1,836	5,08	1,18	Areia com cascalho esparso	Areia média
<b>PT-042</b>	4,577	4,470	0,948	0,038	1,624	14,99	21,01	Silte arenoso	Silte
<b>PT-043</b>	1,691	1,847	0,922	0,377	1,578	3,57	8,31	Areia	Areia média
<b>PT-044</b>	4,509	4,281	1,118	-0,088	1,340	18,61	14,74	Silte arenoso	Silte
<b>PT-045</b>	1,634	2,143	1,639	0,531	1,377	16,26	3,16	Areia lamosa com cascalho esparso	Areia fina
<b>PT-046</b>	1,128	1,150	0,643	0,290	1,124	2,80	1,81	Areia	Areia média
<b>PT-047</b>	1,245	1,332	0,691	0,324	1,608	7,22	4,19	Areia	Areia média
<b>PT-048</b>	1,223	1,275	0,718	0,051	1,211	6,76	0,60	Areia com cascalho esparso	Areia média

**MG** - Mediana; **M<sub>Z</sub>** - Média diâmetro médio; **SIG** - Desvio padrão; **SK<sub>I</sub>** - Assimetria e **KG** - Curtose.

**Anexo 04** - Parâmetros estatísticos e classificação das amostras de fundo coletadas.

# ***ANEXO 05***



# GIS AND REMOTE SENSING TECHNIQUES APPLIED TO ENVIRONMENTAL IMPACT DIAGNOSIS ASSOCIATED TO OIL ACTIVITIES IN MANGROVE AREAS IN THE RIO GRANDE DO NORTE STATE<sup>1</sup>

## ABSTRACT

Accidental or intentional oil spillings can ecologically damage sensitive areas like estuaries and the neighboring coastline. The environmental results can be complex if there aren't effective plans of contention and cleaning. In this context, a database with coastal sensitivity index (CSI) to the Galinhos, Potengi and Curimataú Estuaries and neighboring areas was elaborated from the combination of Remote Sensing and Geographical Information Systems (GIS) which showed to be an effective means in cleaning and/or removal operations. Landsat 7 ETM+ images and oblique aerial photos were used to classify the sensibility of the region. The coastal ecosystem hierarchization was built based on the system of environmental sensibility classification developing by NOAA and adapted to tropical regions. The ETM+ sensor data were also used in order to produce an accurate digital cartographic base. These data were afterwards combined with *in situ* coastline informations and stored in a GIS. The oil spilling contingency team in order to quicken the use of resources against the accidental and intentional oil spillings can use the GIS.

**Keywords:** Mangroves - Remote Sensing - Oil Spilling - Environmental Sensibility - Northeastern Brazil.

## INTRODUCTION

The accidental oil spillings are more and more common in the seas and oceans all over the world. One of largest oil spilling accidents happened in the Prince William Strait in Alaska, in March 1989 and was ecologically destructive since the oil indiscriminately killed coral reefs, marine wild life and birds (Michel and Hayes 1991). In 1991, the Iraqi Navy, in a shameful act of "environmental terrorism" threw away about 8 to 11 million barrels of crude oil in the Arabian Gulf (Raloff and Monastersky 1991, Sheets 1991).

In Brazil, several accidents with oil spillings have also happened; some of them were disastrous and brought irreparable damage to the environmental. Among them we can point out the oil spilling in Guanabara Bay - RJ and the one in the Barigui River - PR. Both of them in the year 2000, respectively with 1.3 and 4 million litres of spilled oil (Ramalho 2000).

---

<sup>1</sup> Artigo aceito no *Mangrove 2003 International Conference*.

Since the international commerce and the global dependence on products derived from petroleum are a reality, the accidents will go on happening due to the expansion of the exploitation activities, production, transport and storage of oil and its derivatives.

In this context, the Environmental Sensibility Charts for Oil Spillings - SAO Charts (MMA 2002) are an essential component and a primary information source for the planning of contingency and damage evaluation in oil spilling events. They represent a response action tool to oil spilling since they identify those environmental with preservation priority allowing the employ of available resources and the mobilization of the protection and cleaning teams.

The mapping of sensitive areas is introduced, therefore, as a tool that exceeds the cycle of planning decisions, development and environmental control of oil industry with prominence to the regulation and risk management.

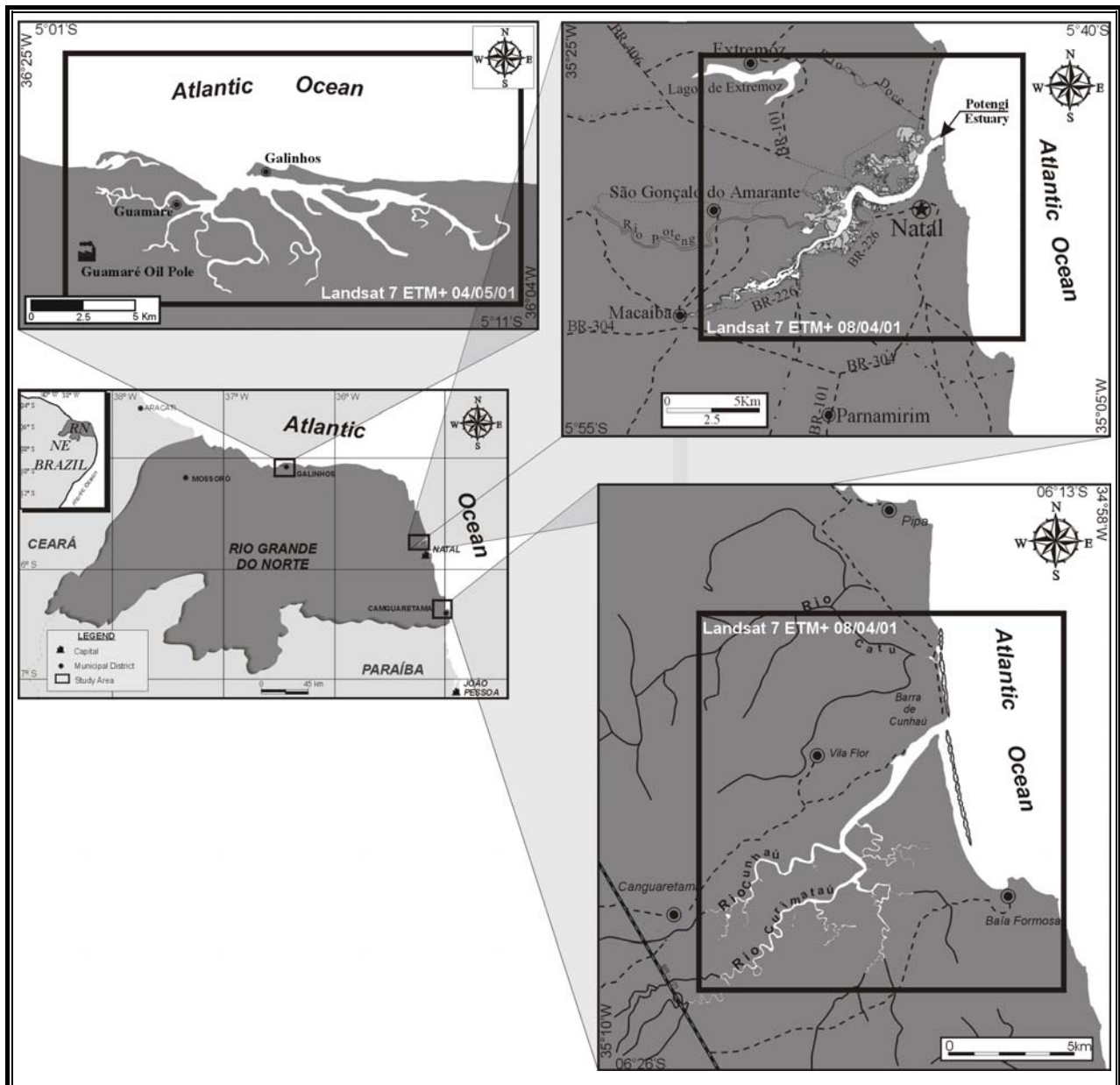
Meanwhile, the inexistence of accurate and updated cartographic maps is often one of the main problems to accomplish the mapping of the Coastal Sensibility Index (CSI). This problem is still more serious in developing countries due to the lack of opportunities or economical resources to prepare a database for maps updated in scales, in accordance with the necessity of specific informations. Though it may exist a generally acceptable map cover to identify the main roads and cities, the mapping quality of wide land extensions such as mangroves is often hardly trustworthy.

The first studies that used remote sensing and geographical information system (GIS) to make environmental sensibility maps for oil spillings date from beginning of the nineties (Jensen et al. 1990, 1993) and were afterwards used by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in the south of Florida, USA and in Abu Dhabi Emirate, United Arabian Emirates, this methodology was adapted to environmental of the Rio Grande do Norte State (Frazão et al. 2002, Castro 2002).

The present study has the purpose to present a quick and efficacious methodology by using remote sensors and GIS to make maps with detailing levels compatible to oil spilling events. This methodology was applied to the diagnosis of environmental impacts associated to oil activities in mangrove areas of the Rio Grande do Norte State.

## STUDY AREA

The Rio Grande do Norte State (RN) is located in the far northeastern Brazil and is the largest Brazilian land oil producer. It has 410 km of coastline characterized by sand beaches, dunes, sea cliffs and estuaries including mangroves and tidal plans. Three mangrove areas in the state were chosen for this study: Galinhos, Potengi and Curimataú (Figure 01).



**Figure 01** - Map showing the location of the study area and cover of the Landsat 7 ETM+ images for the mapping of the Coastal Sensibility Index (CSI).

The Galinhos mangrove is located on the RN north coast, being this area under the strong influence of the Guamaré Oil Pole with land and marine exploitation. We also point out the intense traffic of oil-tankers in this region.

On the Potengi Estuary there are wide mangrove areas, tidal plain and beachrocks on its mouth spreading nearly 20 km into the continent up to Macaíba City. According to Frazão et al. (2002), the Natal harbor zone (Oil Terminal) located on the Potengi River right bank presents the most intense route of oil tankers and merchant - ships in Rio Grande do Norte.

The Curimataú Estuary located 60 km south the Natal City, presents the largest mangrove area of the whole Rio Grande do Norte coastline spreading about 15 km inwards the continent.

These mangroves are considered risk areas for accidental or intentional oil spillings that can ecologically damage sensitive ecosystems on the coast.

## MATERIALS AND METHODS

For this study were used three images of the Landsat *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) in order to obtain the cover of the main mangrove areas on the Rio Grande do Norte coast (Figure 01).

The digital images used in this study were obtained in April 05, 2001 (Landsat 7 ETM+ on the Galinhos Estuary) and in August 04, 2001 (Landsat 7 ETM+ image on the Potengi and Curimataú estuaries), the imagery pre-processing and processing were performed in the ER Mapper v.6.0 (Earth Resource Mapping Pty Ltd.) software available at the Geoprocessing Laboratory GEOPRO / PPGG / UFRN. The used orbital imagery data can be seen on Table 01.

**Table 01-** Details of the used satellite.

Sensor/Platform	Orbit/Point	Acquisition Date	Tidal Conditions	Spatial Resolution
ETM+ Landsat 7	215 / 064	04 / 05 / 2001	Low Tide	30 x 30 m
ETM+ Landsat 7	214 / 064	08 / 04 / 2001	Low Tide	30 x 30 m
ETM+ Landsat 7 Pan	214 / 064	08 / 04 / 2001	Low Tide	15 x 15 m

First of all the Landsat 7 ETM+ images were rectified so that they could be efficiently used as an updated digital cartographic base. Using maps with 1:100.000 and

1:50.000 scales, the ETM+ satellite images were rectified to an Universal Transverse Mercator (UTM) projection bearing system.

A dense network with 280 control points on the ground was chosen on the three images. A large number of these points was measured by using instruments such as the Global Positioning System (GPS) and Global Differential Positioning System (DGPS). The computed ground control points were road intersections and islands that could be easily identified on the images as well as on the maps. The square root mean error (RMS) for all the images was 61 pixel (630 m for Galinhos and Potengi and 615 m for Curimataú), being used an algorithm of the nearest neighbour.

The selected areas were overflown in a Fox model ultralight at 200-300m in height in order to obtain oblique aerial photos.

In situ field works allowed the collecting of physical and social-economic data such as granulometry and beach inclination, hydrodynamic data of each coastal ecosystem and data about human activities.

The used Coastal Sensibility Index (CSI) was based on the Specifications and Technical Norms for the Elaboration of Oil Spilling Environmental Sensibility Charts (Charts SAO) elaborated by MMA (2002), based on the classification of environmental sensibility adopted by NOAA (1997).

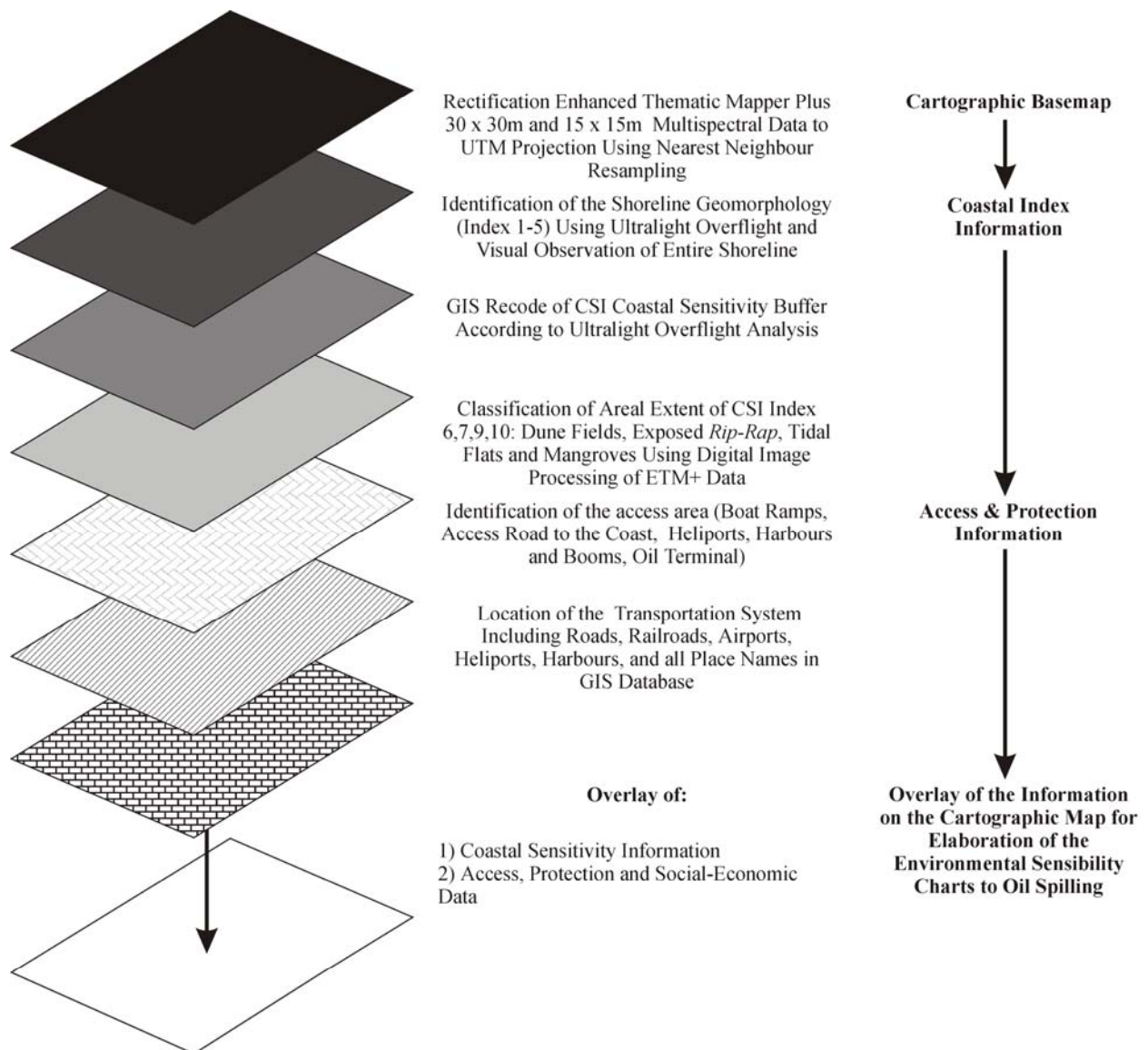
The CSI concept is graphically shown on Figure 02, being this one the schematic diagram followed in this study by combining the techniques of remote sensing and geographical information systems (GIS). Only the biological informations sensitive to oil on the Galinhos, Potengi and Curimataú estuaries, where not collected in this study.

## **RESULTS AND DISCUSSIONS**

A combination of *in situ* research and remote sensing techniques was used to identify and map the coastal ecosystems. The more sensitive areas were mangroves and tidal plains while the less sensitive ones were the artificial structures built by man and beach sandstones (*beachrocks*).

The less sensitive coastlines can often be cleaned by wave action or machines. On the contrary, areas as mangroves and tidal plains are very difficult to be cleaned and the access is restricted. Each of these sensitive areas shows its grade of environmental

sensibility to spilled polluting agents and distinct response and cleaning recommendations.



**Figure 02** - Schematic diagram showing the concept of Coastal Sensibility Index (CSI) combining the techniques of remote sensing and GIS.

The oil spilling environmental sensibility maps shown here, were built at a strategic detailing level on a 1:50.000 scale owing to the used Landsat imagery resolution. For larger scale detailing levels (tactic and operational charts), it may be applied the same methodology using SPOT or IKONOS images.

The main results can be seen on Figures 03 and 04 with the coloured compositions RGB and RGBI 432 for the Galinhos and Curimataú estuaries and RGB 432 combined with the Terrain Digital Model (TDM) for the Potengi Estuary, respectively. It were identified some coastal ecosystems showing a better result on the discrimination of



Barreiras Formation exposed cliffs (CSI-3), dune fields (CSI-3), beachrocks (CSI-5), exposed *rip-rap* (CSI-6), exposed sandy tidal plain (CSI-7), sheltered muddy tidal plain (CSI-9), mangroves (CSI-10) and mangrove preceded by muddy low tidal terrace (CSI-10).

The obtainment of oblique aerial photos and *in situ* data collecting were essential to identify and discriminate the coastal features that couldn't be right mapped with the ETM+ data. However, the ETM+ data were efficient to map the location and spatial distribution of several more sensitive segments as mangroves and tidal plains. While the CSI traditional mapping couldn't show the presence of those segments, the use of remote sensing techniques was able to measure accurately their length area.

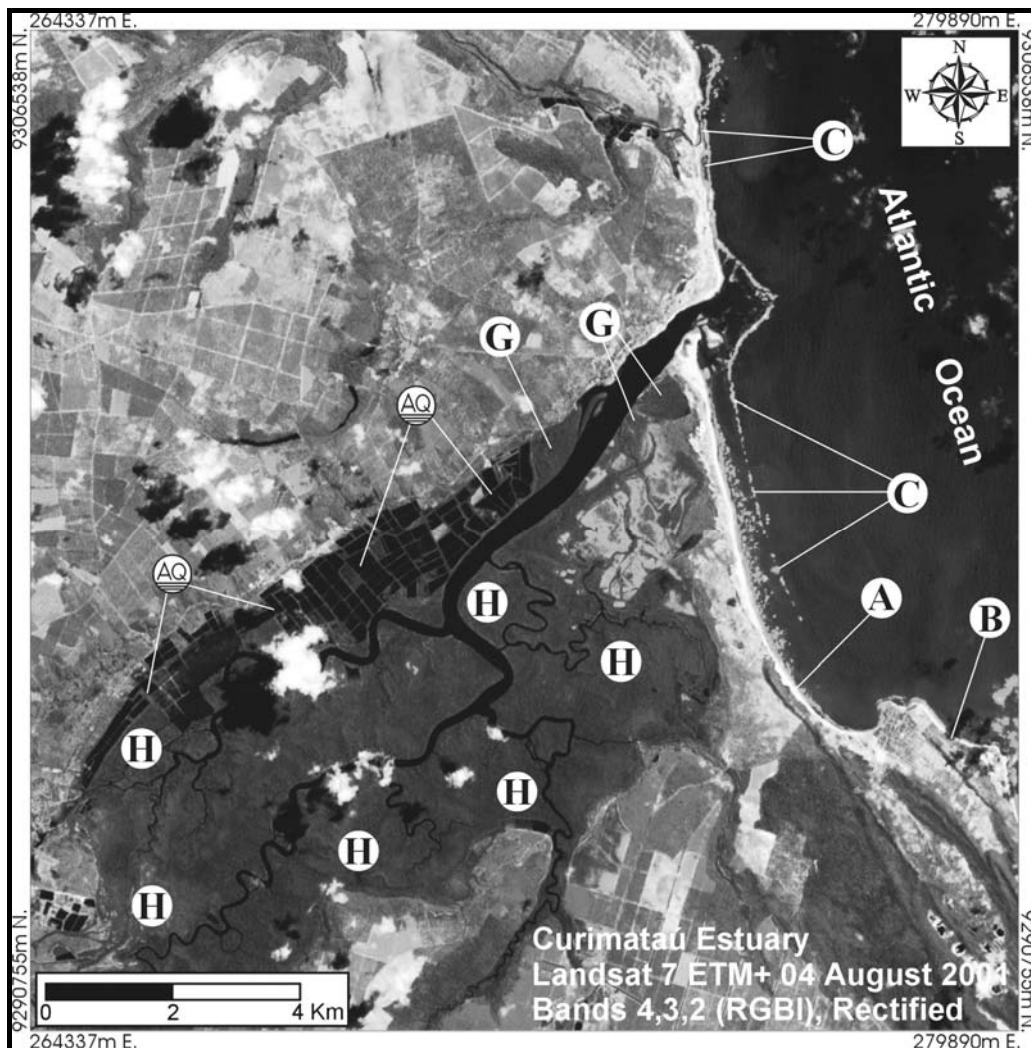
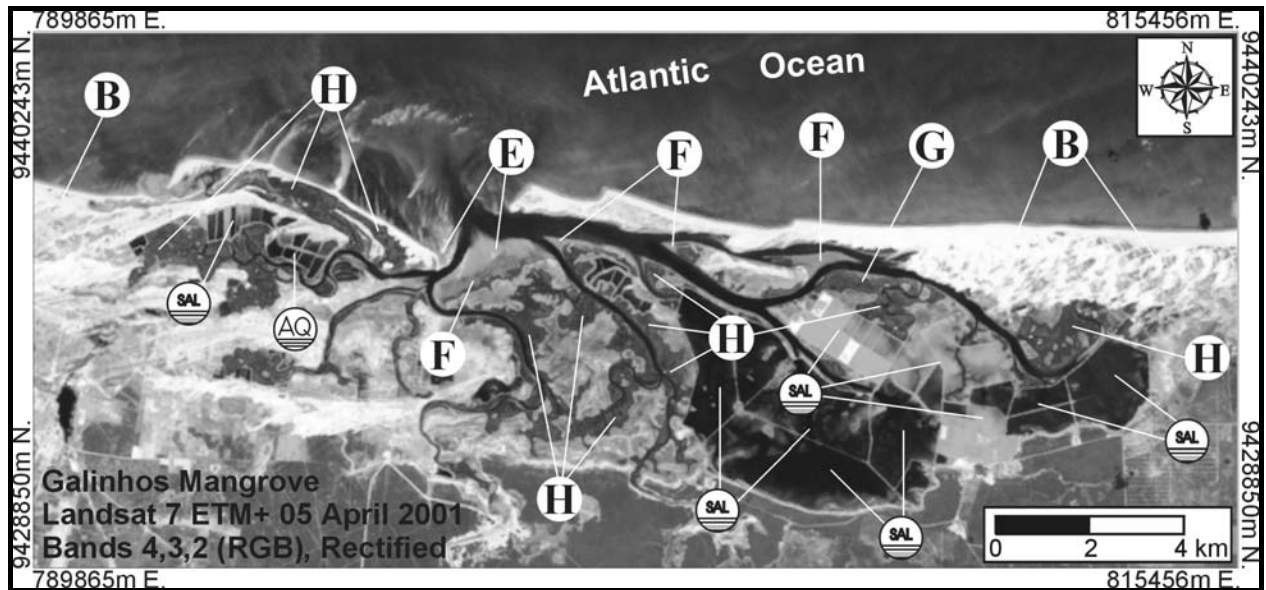
## **CONCLUSIONS**

This research showed how the components of a mapping digital system of the Coastal Sensibility Index (CSI) may be built by using *in situ* data and remote sensing techniques, ordered in a GIS and discussed using a suitable logic. These techniques showed to be efficient on the mapping of location and spacial distribution of areas with difficult access and more sensitive to oil spilling.

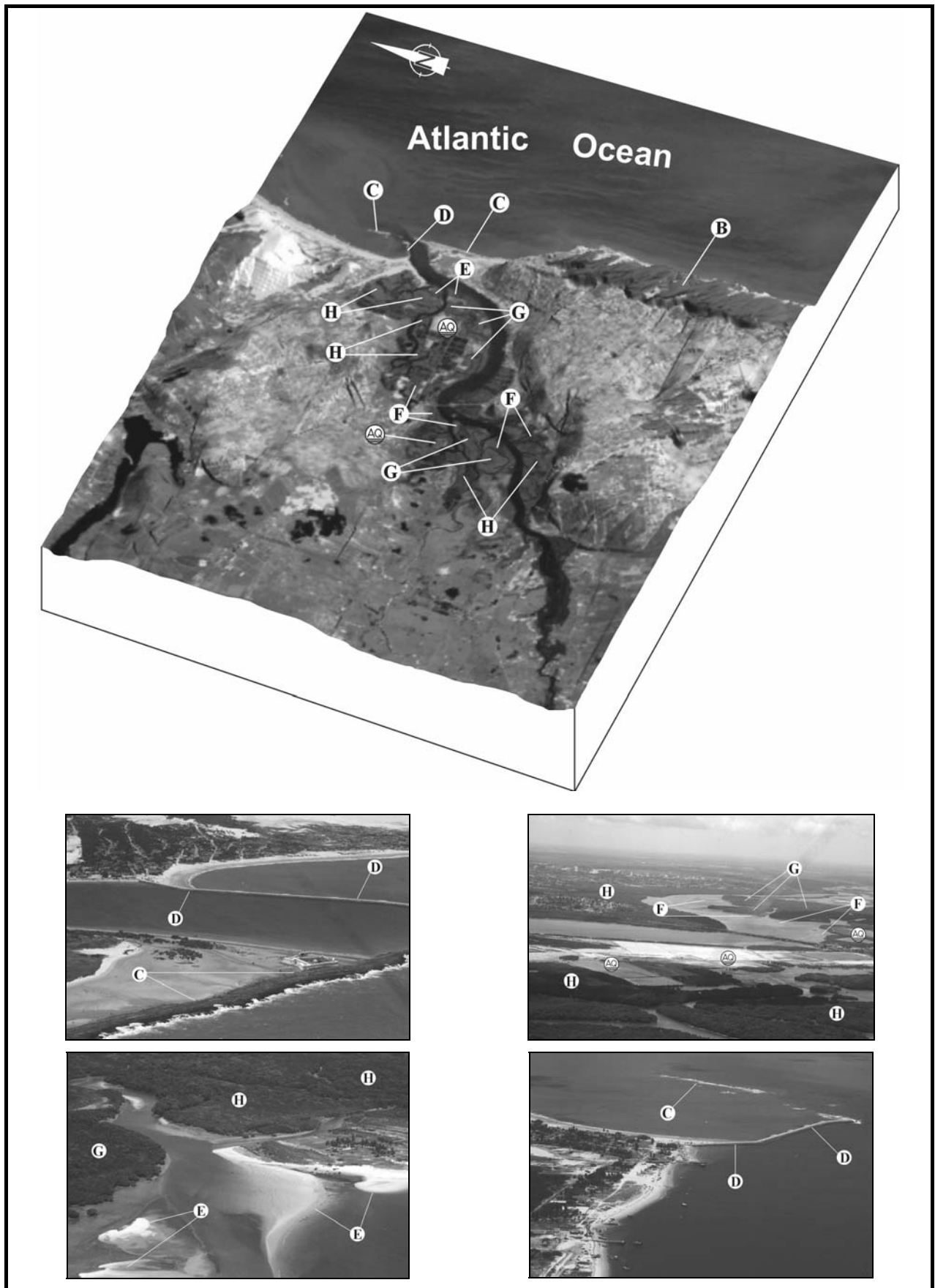
The orbital digital images associated to oblique aerial photos are very important to the SAO Chart elaboration. The correct use of these charts will allow the oil spilling fighters to optimize the distribution of the oil spilling control and the protection resources.

## **Acknowledgements**

The authors thank ANP (Agência Nacional do Petróleo) for the concession of master scholarships to the first and second authors through the Human Resources-PRH-22 Program; the Projects: Natal Harbor Environmental Sensibility Map (TRANSPETRO - CENPES / PETROBRAS) and PETRORISCO (FINEP / REDE 05 / CTPETRO / CNPq) for the financial support; the Pos-graduation Program in Geodynamics and Geophysics and the Geology Department of the Rio Grande do Norte University for the availability of the basic infrastructure necessary for the accomplishment of this research.



**Figure 03** - Landsat 7 ETM+ images of the Galinhos and Curimataú estuaries, with RGB and RGBI coloured composition respectively. With these images it was possible to identify the following Coastal Sensibility Index (CSI): (A) Barreiras Formation exposed cliffs (CSI-3); (B) dune fields (CSI-3); (C) beachrocks (CSI-5); (D) exposed *rip-rap* (CSI-6); (E) exposed sandy tidal plain (CSI-7); (F) sheltered muddy tidal plain (CSI-9); (G) mangrove preceded by muddy low tidal terrace (CSI-10) and (H) mangroves (CSI-10), besides the aquaculture and salt activities.



**Figure 04** - Terrain Digital Model (TDM) combined with the RGB 432 coloured composition showing a semi-graben topography on the Potengi Estuary and oblique aerial photos with the following CSI: **(B)** dune fields (CSI-3); **(C)** beachrocks (CSI-5); **(D)** exposed *rip-rap* (CSI-6); **(E)** exposed sandy tidal plain (CSI-7); **(F)** sheltered muddy tidal plain (CSI-9); **(G)** mangrove preceded by muddy low tidal terrace (CSI-10) and **(H)** mangroves (CSI-10), besides the aquaculture activity (Photos: Vital, Nov. 2001).

## REFERENCES

- Castro A.F. 2002. Modelagem e Desenvolvimento de um Banco de Dados Geográficos: Aplicação à Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo na Área Costeira entre Galinhos e São Bento do Norte - RN. Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Dissertação de Mestrado, 87 p.
- Frazão E.P., Vital H. & Amaro V.E. 2002. Mapeamento da Sensibilidade Ambiental Costeira aos Derramamentos de Óleo ao Longo da Linha de Costa e no Estuário do Rio Potengi usando o Sensoriamento Remoto e SIG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, 1: 268
- Jensen J.R., Ramsey E.W., Holmes J.M., Michel J.E., Savitsky B., Davis B.A. 1990. Environmental Sensitivity Index (ESI) Mapping for Oil Spills Using Remote Sensing and Geographic Information System Technology. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(2): 181-201
- Jensen J.R., Narumalani S., Weatherbee O. 1993. *Coastal Environmental Sensitivity Mapping for Oil Spills in the United Arab Emirates Using Remote Sensing and GIS Technology*. Department of Geography, University of South Carolina, U.S.A, Columbia, 5-13 p
- Michel J.E. & Hayes M.O. 1991. Geomorphological Controls on the Persistence of Shoreline Contamination from the Exxon Valdez Oil Spill. Research Planning, Inc., prepared for Hazardous Materials Response Branch, NOAA, Report N°. HMRB 91-2, 347 p.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2002. *Especificações e Normas Técnicas para Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para Derramamentos de Óleo*. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos, Programa de Proteção e Melhoria da Qualidade Ambiental, Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho.
- NOAA, 1997. *Environmental Sensitivity Index Guidelines, Version 2.0*. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 115. Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 79 p.
- Raloff J. & Monastersky R. 1991. Gulf oil Threatens Ecology, Maybe Climate. *Science News*, 139(5): 71-73

Ramalho R. 2000. Petroleo e Meio Ambiente. Revista Ciência Hoje. Dezembro.

Disponível em: <http://www.uol.com.br/cienciahoje/especial/naturais/petro4.htm>.

Acesso em: 20 mai. 2002

Sheets K. 1991. Spilling Oil: Iraq's Environmental Warfare, *U.S. News & World Report*,

4(5): 60

# ***ANEXO 06***



COR	ÍNDICE	CÓDIGO			TIPOS DE COSTA
		R	G	B	
	ISL 1	119	38	105	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costões rochosos lisos, de alta declividade, expostos</li> <li>• Falésias em rochas sedimentares, expostas</li> <li>• Estruturas artificiais lisas (paredões marítimos artificiais), expostas</li> </ul>
	ISL 2	174	153	191	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costões rochosos lisos, de declividade média a baixa, expostos</li> <li>• Terraços ou substratos de declividade média, expostos (terraço ou plataforma de abrasão, terraço arenítico exumado bem consolidado, etc.)</li> </ul>
	ISL 3	0	151	212	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias dissipativas de areia média a fina, expostas</li> <li>• Faixas arenosas contíguas à praia, não vegetadas, sujeitas à ação de ressacas (restingas isoladas ou múltiplas, feixes alongados de restingas tipo "long beach")</li> <li>• Escarpas e taludes íngremes (formações do grupo Barreiras e Tabuleiros Litorâneos), expostos</li> <li>• Campos de dunas expostas</li> </ul>
	ISL 4	146	209	241	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias de areia grossa</li> <li>• Praias intermediárias de areia fina a média, expostas</li> <li>• Praias de areia fina a média, abrigadas</li> </ul>
	ISL 5	152	206	201	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias mistas de areia e cascalho, ou conchas e fragmentos de corais</li> <li>• Terraço ou plataforma de abrasão de superfície irregular ou recoberta de vegetação</li> <li>• Recifes areníticos em franja</li> </ul>
	ISL 6	0	149	32	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Praias de cascalho (seixos e calhaus)</li> <li>• Costa de detritos calcários</li> <li>• Depósito de tálus</li> <li>• Enrocamentos ("rip-rap", guia corrente, quebra-mar) expostos</li> <li>• Plataforma ou terraço exumado recoberto por concreções lateríticas (disformes e porosas)</li> </ul>
	ISL 7	214	186	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planície de maré arenosa exposta</li> <li>• Terraço de baixa-mar</li> </ul>
	ISL 8	225	232	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escarpa / encosta de rocha lisa, abrigada</li> <li>• Escarpa / encosta de rocha não lisa, abrigada</li> <li>• Escarpas e taludes íngremes de areia, abrigados</li> <li>• Enrocamentos ("rip-rap" e outras estruturas artificiais não lisas) abrigados</li> </ul>
	ISL 9	248	163	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planície de maré arenosa / lamosa abrigada e outras áreas úmidas costeiras não vegetadas</li> <li>• Terraço de baixa-mar lamoso abrigado</li> <li>• Recifes areníticos servindo de suporte para colônias de corais</li> </ul>
	ISL 10	214	0	24	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deltas e barras de rio vegetadas</li> <li>• Terraços alagadiços, banhados, brejos, margens de rios e lagoas</li> <li>• Brejo salobro ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio salobro ou salgado; apicum</li> <li>• Marismas</li> <li>• Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)</li> </ul>

**Anexo 06** - Esquema de cores para classificação do ISL (MMA 2002).