



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

TARCILA FRANCO

**MORFOLOGIA E DINÂMICA DAS FORMAS DE FUNDO  
ASSOCIADAS À ENTRADA DE DOIS ESTUÁRIOS DISTINTOS –  
PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-MIRIM (ES) E CARAVELAS (BA)**

VITÓRIA

2010

TARCILA FRANCO



MORFOLOGIA E DINÂMICA DAS FORMAS DE FUNDO ASSOCIADAS À  
ENTRADA DE DOIS ESTUÁRIOS DISTINTOS – PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-  
MIRIM (ES) E CARAVELAS (BA)

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao  
Departamento de Oceanografia e Ecologia do Centro  
de Ciências Humanas e Naturais da Universidade  
Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Valéria da Silva Quaresma.

VITÓRIA

2010

**TARCILA FRANCO**

**MORFOLOGIA E DINÂMICA DAS FORMAS DE FUNDO ASSOCIADAS À  
ENTRADA DE DOIS ESTUÁRIOS DISTINTOS – PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-MIRIM  
(ES) E CARAVELAS (BA)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Graduação em Oceanografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.

Entregue dia 20 de dezembro de 2010.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Valéria da Silva Quaresma**

**Orientadora – DOC/CCHN/UFES**

---

**Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos**

**DOC/CCHN/UFES**

---

**Msc. Kleverson Alencastre Nascimento**

**DOC/CCHN/UFES**

**MORFOLOGIA E DINÂMICA DAS FORMAS DE FUNDO ASSOCIADAS À ENTRADA DE  
DOIS ESTUÁRIOS DISTINTOS – PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-MIRIM (ES) E CARAVELAS  
(BA)**

por

TARCILA FRANCO

Submetido como requisito parcial para a obtenção de grau de

**Oceanógrafo**

na

**Universidade Federal do Espírito Santo**

Dezembro de 2010

© Tarcila Franco

Por meio deste, o autor confere ao Colegiado do Curso de Oceanografia e ao Departamento de Oceanografia da UFES permissão para reproduzir e distribuir cópias parciais ou totais deste documento de trabalho de conclusão de curso para fins não comerciais.

Assinatura do autor \_\_\_\_\_

Curso de graduação em Oceanografia  
Universidade Federal do Espírito Santo

Certificado por \_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Valéria da Silva Quaresma  
Orientadora – DOC/CCHN/UFES

Certificado por \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos  
DOC/CCHN/UFES

Certificado por \_\_\_\_\_

Msc. Kleverson Alencastre Nascimento  
DOC/CCHN/UFES

Aceito por \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso  
Coordenador do Curso de Oceanografia  
DOC/CCHN/UFES

*A Deus, autor de todas as coisas.*

*Aos meus pais pelo apoio e amor incondicionais.*

*“O último mogno derrubado seria visto no chão da paisagem  
e o último rinoceronte negro seria evidente em sua solidão,  
mas uma espécie marinha pode desaparecer  
embaixo das ondas sem ser observada  
e o mar pareceria manter seu movimento  
da mesma maneira.”*

G. Carleton Ray

## AGRADECIMENTOS

A Deus por possibilitar todas as minhas conquistas e sempre ao meu lado me dá forças para seguir em frente.

À Agência Nacional do Petróleo por meio do PRH-29 que concedeu a bolsa para desenvolvimento do trabalho.

À querida amiga e mestra, Valéria, por ser exemplo de mulher, mãe, profissional e ser humano. Obrigada por tudo, principalmente pela paciência, professora!

Ao professor Alex que, apesar de ser fluminense e do sotaque carioca, tornou-se um grande amigo.

À professora Jacqueline e demais professores do Doc que oferecem diariamente aos alunos todo o apoio e dedicação.

Aos amigos do Cefetes - UnED Colatina, principalmente às meninas por não deixarem o tempo enfraquecer nossa amizade.

Aos demais amigos do curso, calouros e veteranos, em especial: Nego querido, PH, Rodrigo, May, Tetê, Gabizera, Tinho, Fadima, entre tantos outros.

À minha turma de 2007, a mais “João” que esse curso já viu! Pedrão, Bai, Bimbuxa, Fran, Elisa, Flor (*yeux ensemble*), Lucas, Susu, Aureo man, Sesca, Monkey, Denym, Baiano... Amo vocês galera!

Aos meus queridos e inesquecíveis Coleguinhas por me acompanharem até aqui e fazer a jornada tão agradável. Gê, menina meiga, amiga e generosa... Mas se alguém pisa no seu calo ela incorpora a CataBriga! Kyssy, com sua personalidade forte e ao mesmo tempo doce ainda vai conquistar o mundo. Bel, minha fiel companheira de Google Talk, quantas vezes quem dormiu foi o leão, né amiga! Laris, séria e dedicada aos seus projetos... Até se sentir a vontade pra começar a baixaria! Gean, paciente e sempre disposto a ajudar faz valer à pena toda a espera no RU! Mica, o orgulho dos Coleguinhas, sua humildade e companheirismo lhe engrandecem ainda mais! Jack, insuportável, por todos os “bololons”, amizade sincera e ajudas indispensáveis pré-provas de Ghiso! Por último e não menos importantes, minhas melhores companhias e maiores alegrias ao longo desses

quatro anos: Silvete, cuja gargalhada sempre enchia de alegria o laboratório, pelas dicas de moda, almoços fantásticos da Neves e companheirismo desde o primeiro ano na Ufes; e Pri, cuja história de amizade começou antes do primeiro dia de aula, ainda no vestibular e mostrou como duas histórias de vida podem ser tão semelhantes e por isso trazer tantas afinidades!

À minha república e todos aqueles que dela já fizeram parte, em especial a Deda, Gui e Nathalia por ser a família que eu escolhi pra mim e por fazer todos os meus dias incomparáveis. Não há dimensões que possam demonstrar o quanto vocês são importantes pra mim!

Aos amigos de Marilândia que fazem da minha cidade o coração do Espírito Santo, vocês me dão forças para continuar a caminhada!

Aos meus pais, Acacio e Inês, as pessoas mais importantes da minha vida, por todo o amor e dedicação gratuitos que sempre me propiciaram. Acreditando em mim vocês me fazem acreditar também!

Ao meu irmão, Olavo, sem o qual minha vida não teria sentido, por todo companheirismo e carinho ao longo de nossas vidas.

Aos demais familiares, que entendem minha ausência e sempre me recebem com imenso afeto.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha vida até aqui, Obrigada! Ainda tenho muito o que caminhar mas com o apoio de vocês, sei que consigo.

## RESUMO

A amostragem por meio do método indireto de alta resolução com o sonar de varredura lateral modelo Edgetech 4100 resultou em levantamentos sonográficos que cobriram a região próxima à desembocadura de dois estuários. O estudo abrangeu o estuário do rio Caravelas (BA) e o estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim (ES), os quais constituem importantes recursos hídricos para as comunidades associadas aos mesmos. A amostragem permitiu a visualização das formas de fundo presentes nos dois ambientes e com isso a confecção de mapas que identificam a distribuição destas ao longo das regiões que compõem as áreas de estudo. O estuário do rio Caravelas (BA) apresentou as formas de fundo de maior porte representadas por dunas 2-D grandes e também possibilitou a observação das marcas da atividade de dragagem desenvolvidas no canal para o estabelecimento da segurança na navegabilidade até o Terminal Marítimo de Navios-Barcaça Luciano Villas Boas Machado localizado próximo à desembocadura do estuário. O estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim, por sua vez, apresentaram formas de fundo menores alcançando as dimensões de dunas 2-D médias na porção central do canal onde se encontram as maiores profundidades além da observação das *ripples* que constituem o banco arenoso situado junto à desembocadura do estuário. O aumento das taxas de transporte de sedimento com a intensificação das correntes permite aferir que a formação das formas de fundo em ambos os ambientes esteja associada às correntes de vazante e de enchente durante os ciclos de maré. O mapeamento das formas de fundo em determinado ambiente permite estabelecer critérios para o gerenciamento de áreas de maior instabilidade quanto à dinâmica sedimentar.

**Palavras-chave:** sonogramas, formas de fundo e dinâmica sedimentar.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Estuário do rio Caravelas, localizado na cidade homônima, uma das áreas de estudo.....                                                       | 5  |
| Figura 2: Terminal Marítimo de Navios-Barcaça Luciano Villas Boas Machado. Fonte: Adaptado de HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda, 2007. .... | 7  |
| Figura 3: Região terminal do complexo estuarino Piraquê-açu/Piraquê-mirim onde se localiza a área de estudo. ....                                      | 9  |
| Figura 4: Formação de regiões de sombra no registro do sonar. Fonte: Adaptado de Fish e Carr (1990). ....                                              | 15 |
| Figura 7: Altura máxima da duna (A) e comprimento máximo da duna (B) em função da granulometria do sedimento. Fonte: FLEMMING, 200. ....               | 17 |
| Figura 5: Relação entre altura e comprimento da duna. Fonte: Adaptado de Flemming (2000). ....                                                         | 20 |
| Figura 6: Interface do programa computacional utilizado na investigação de ambos os estuários, Caravelas e Piraquê-açu/Piraquê-mirim. ....             | 22 |
| Figura 8: Distribuição sedimentar e batimetria na entrada do estuário do rio Caravelas. Fonte: HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda. ....      | 26 |
| Figura 9: Mosaico referente ao trecho do estuário do rio Caravelas. ....                                                                               | 27 |
| Figura 10: Tipos de formas de fundo encontrados para a entrada do estuário do rio Caravelas. ....                                                      | 28 |
| Figura 11: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D pequenas e <i>ripples</i> ... ..                                                                | 29 |
| Figura 12: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D médias a grande sobrepostas de <i>ripples</i> . ....                                            | 29 |
| Figura 13: Duna 2-D média e grande amostradas no canal do estuário de Caravelas. ....                                                                  | 30 |
| Figura 14: Faixas planas com ausência de formas de fundo e faixas com presença de <i>ripples</i> .....                                                 | 31 |
| Figura 15: Formas de fundo artificiais correspondentes a sulcos de dragagem. ..                                                                        | 32 |
| Figura 16: campo de <i>ripples</i> cortado planos com ausência de formas de fundo... ..                                                                | 32 |
| Figura 17: Mapa faciológico da classificação textural dos sedimentos modificado de Folk (1954). Fonte: SILVA <i>et al</i> , 2010. ....                 | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18: Batimetria do estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim. Fonte: SILVA <i>et al</i> , 2010.....                                                                                                                                                                                                                                                       | 34 |
| Figura 19: Mosaico referente ao trecho do estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim correspondente a uma das áreas de estudo. ....                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Figura 20: Tipos de formas de fundo encontrados para a entrada do estuário do rio Piraquê-açu. ....                                                                                                                                                                                                                                                               | 36 |
| Figura 21: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D pequenas e <i>ripples</i> ...                                                                                                                                                                                                                                                                              | 37 |
| Figura 22: Faixas com ausência de formas de fundo intercaladas com faixas de <i>ripples</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 37 |
| Figura 23: Cascalhos e afloramentos rochosos. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 38 |
| Figura 24: Padrão homogêneo sem presença de formas de fundo.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 38 |
| Figura 25: Dunas 2-D pequenas e médias. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 39 |
| Figura 26: Direção das cristas de dunas e <i>ripples</i> indicando a maior estabilidade das estruturas de maior porte durante a reversão no sentido das correntes. A seta branca indica a direção das cristas das dunas 2-D médias voltadas para a desembocadura do estuário, a seta azul, a direção das cristas de <i>ripples</i> voltadas para o interior. .... | 40 |
| Figura 27: Feições indistintas provavelmente decorrentes da presença da fração lamosa no sedimento. ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 41 |
| Figura 28: Local de coleta dos dados hidrodinâmicos utilizados pelo modelo. Fonte: Google.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 42 |
| Figura 29: Variação na taxa de transporte de sedimento junto ao fundo com o aumento da velocidade das correntes para o estuário do rio Caravelas.....                                                                                                                                                                                                             | 43 |
| Figura 30: Local de coleta dos dados hidrodinâmicos utilizados pelo modelo. Fonte: Google.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 44 |
| Figura 31: Variação na taxa de transporte de sedimento junto ao fundo com o aumento da velocidade das correntes para o estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim. ....                                                                                                                                                                                          | 45 |
| Figura 32: Direção e taxa de transporte de sedimento no fundo ao longo de uma amostragem de cerca de um dia e a variação do nível relativo d'água durante a amostragem. ....                                                                                                                                                                                      | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Características das regiões críticas ao assoreamento no estuário do rio Caravelas (BA). <sup>1</sup> .....                | 8  |
| Tabela 2: Esquema de classificação das formas de fundo <sup>1</sup> .....                                                           | 23 |
| Tabela 3: Tábua de maré para os dias de amostragem em ambos ambientes. Cor azul significa maré baixa e cor vermelha, maré alta..... | 25 |

## SUMÁRIO

|          |                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1      | APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....                     | 1         |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS .....</b>                                 | <b>4</b>  |
| 2.1      | OBJETIVO GERAL .....                                   | 4         |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                            | 4         |
| <b>3</b> | <b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>                             | <b>5</b>  |
| 3.1      | ESTUÁRIO CARAVELAS .....                               | 5         |
| 3.1.1    | Caracterização .....                                   | 5         |
| 3.1.2    | Terminal de Barcaças.....                              | 6         |
| 3.2      | ESTUÁRIO PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-MIRIM .....               | 8         |
| <b>4</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                     | <b>11</b> |
| 4.1      | ESTUÁRIOS .....                                        | 11        |
| 4.2      | SONOGRAFIA .....                                       | 12        |
| 4.3      | FORMAS DE FUNDO EM ESTUÁRIOS .....                     | 15        |
| 4.3.1    | Caracterização .....                                   | 15        |
| 4.3.2    | Predição das formas de fundo.....                      | 18        |
| 4.4      | CLASSIFICAÇÃO DE FORMAS DE FUNDO.....                  | 20        |
| <b>5</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                        | <b>22</b> |
| 5.1      | LEVANTAMENTOS SONOGRÁFICOS .....                       | 22        |
| 5.2      | NOMENCLATURA .....                                     | 23        |
| 5.3      | DINÂMICA SEDIMENTAR .....                              | 24        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                    | <b>25</b> |
| 6.1      | DISPOSIÇÃO DE FORMAS DE FUNDO .....                    | 25        |
| 6.1.1    | Estuário de rio Caravelas (BA).....                    | 26        |
| 6.1.2    | Estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim (ES) ..... | 33        |

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2      | DINÂMICA SEDIMENTAR .....                               | 41        |
| 6.1.2    | Estuário do rio Caravelas (BA) .....                    | 41        |
| 6.2.2    | Estuários dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim (ES) ..... | 43        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>          | <b>47</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                 | <b>49</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O termo estuário caracteriza a região de encontro do rio com o mar sendo, portanto, um ecossistema de transição entre o continente e o oceano. Estes ambientes constituem uma das principais fontes de nutrientes para a região costeira, uma vez que concentram as substâncias originadas ao longo de sua bacia de drenagem; do ambiente marinho adjacente e, na atualidade, significativo material antropogênico (como esgoto, dejetos industriais, etc) (CASTRO *et al.*, 2002). A concentração desse material faz com que os estuários estejam entre os ambientes de maior produtividade biológica e apresentem ecossistemas economicamente valiosos o que atrai intensa atividade humana e faz com que esta seja capaz de alterar funções e propriedades relativas ao ambiente (BRAGA *et al.*, 2000).

Devido ao agrupamento das diversas características propícias ao desenvolvimento de atividades humanas, o crescimento econômico das cidades encontra-se historicamente associado à proximidade de ambientes estuarinos (MIRANDA *et al.*, 2002), sendo ainda sistemas, adequados para instalação de portos.

Um dos métodos mais utilizados para o estudo desses sistemas é a Sonografia. Esta ferramenta metodológica fornece informações sobre as características morfológicas e sedimentológicas das áreas submersas, identificando feições expressivas do relevo e a variação da distribuição superficial dos sedimentos. Pode revelar ainda, informações sobre a ação de correntes marinhas atuantes no sedimento de fundo e ainda revelar características da estabilidade do leito (AYRES NETO, 2000).

O mapeamento de áreas submersas permite o zoneamento de áreas que indicam a presença de estruturas sedimentares. O estudo dessas estruturas possibilita controlar problemas de ordem prática relacionados à região em que se encontram

(HULSHER; VAN DEN BRINK, 2001). A presença de bancos de areia próximos à linha de costa, por exemplo, diminui o impacto de ondas de tempestade ao mesmo tempo em que agregam riscos a canais de navegação (HULSHER; VAN DEN BRINK, 2001). Levantamentos em regiões com presença de dunas subaquosas e em outras áreas com movimentação excessiva do sedimento do fundo tornam-se particularmente importante, uma vez que estruturas de engenharia como dutos (para o transporte de óleo ou gás) podem ficar expostos e suspensos sobre o fundo gerando áreas de maior pressão e aumentando a vulnerabilidade a acidentes (LANGHORN, 1978).

Atualmente muitos projetos navegacionais têm aumentado a precisão na obtenção de informações relacionadas à forma e a estabilidade do assoalho submarino (LANGHORNE, 1982). Os navios modernos têm aumentado seu calado o que requer aumento na profundidade de navegação, levando as autoridades portuárias a dragar canais de portos que muitas vezes encontram-se limitados por formas de fundo (KNAAPEN; HULSHER, 2002).

Assume-se que as dunas subaquosas são instáveis e variam com a hidrodinâmica do fundo e do fluxo das marés (HULSHER; VAN DEN BRINK, 2001). A consequência da instabilidade das formas é sua tendência a recobrir o fundo após a efetuação de projetos de dragagem, assim, para manter os canais de navegação suficientemente profundos, a atividade se torna obrigatória de tempos em tempos. Para minimizar os custos com o projeto, é crucial o conhecimento da taxa na qual as dunas retomam sua forma original e voltam a ser críticas para a navegação. Alguns modelos podem otimizar a estratégia de dragagem uma vez que estimam o processo de crescimento das mesmas (KNAAPEN, 2002; HULSHER *et al*, 2000).

A determinação dos processos relacionados ao desenvolvimento de formas de fundo constitui um objeto de grande importância no estudo do ambiente uma vez que a complexidade deste ambiente o torna vulnerável à ação do homem. Os processos de hidrodinâmica das massas d'água, de impactos na fauna e flora estuarina e de dinâmica do sedimento devem ser amplamente estudados para que possam basear o gerenciamento e as tomadas de decisões acerca da melhor utilização dos estuários a fim de se buscar a conservação desses ambientes naturais renováveis e muito produtivos (MIRANDA *et al*, 2002).

Os parâmetros geológicos aqui descritos possuem particular relevância para a implementação de obras de engenharia e desenvolvimento de estudos ambientais. Entretanto, embora reconhecida a importância econômica e ecológica das regiões estuarinas, o conhecimento sobre os processos sedimentares dos sistemas objeto deste trabalho é restrito.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a morfologia e a dinâmica de dunas subaquosas em ambientes estuarinos utilizando como área de estudo dois ambientes distintos: estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim e estuário do rio Caravelas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar e classificar as formas de fundo segundo a proposta de Ashley (2000);
- Calcular taxas de transporte de sedimento de fundo;
- Correlacionar morfologia e composição das formas de fundo com características da dinâmica sedimentar das regiões.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

Dois estuários distintos serão utilizados como área de estudo a fim de se investigar os padrões de formas de fundo relacionadas a diferentes características. São eles: estuário do rio Piraquê-açu/Piraquê-mirim (Aracruz/ES) e estuário do rio Caravelas (Caravelas/BA).

#### 3.1 ESTUÁRIO CARAVELAS

##### 3.1.1 Caracterização

O estuário de Caravelas está localizado na cidade homônima, ao sul do estado da Bahia (Figura 1). Ao longo de seu percurso, existem depósitos sedimentares terciários do grupo Barreiras. A foz do rio apresenta características deltaicas, com algumas formações de recifes (DIEGUES; ROSMAN, 1998).



Figura 1: Estuário do rio Caravelas, localizado na cidade homônima, uma das áreas de estudo.

Caravelas apresenta um regime de meso-maré com características semi-diurna e altura máxima de cerca de 2,9 m durante a sizígia e de 0,4 m durante a quadratura (PIANCA BARROSO, 2009). O canal estuarino de Caravelas foi classificado como parcialmente misturado com fraca estratificação vertical de acordo com Miranda (2009).

A região engloba ecossistemas muito frágeis em relação a níveis de criticidade ambiental, sendo ameaçados pela pressão imobiliária e expansão turística, além dos problemas gerados pela expansão da monocultura do eucalipto, típicos da região (DIEGUES; ROSMAN, 1998).

Associado a porção costeira encontra-se o complexo recifal dos Abrolhos, que tornam a zona costeira e a zona oceânica adjacente uma área de elevada produtividade biológica (a mais produtiva da costa da Bahia). A ocupação inadequada da zona costeira de Caravelas pode resultar em um aumento no aporte de sedimentos fluviais finos para o complexo recifal dos Abrolhos prejudicando o desenvolvimento dos corais (DIEGUES; ROSMAN, 1998).

A batimetria ao longo do canal é relativamente rasa e está associada a intervenções de dragagens feitas pela Aracruz Celulose para implementação de um terminal de barcas no rio Caravelas. A empresa realiza dragagens de manutenção para manter a profundidade do canal (com aproximadamente 4 km de comprimento) em 5 m, sendo que a área de bota-fora encontra-se a 1 km da obra (PIANCA BARROSO, 2009).

### **3.1.2 Terminal de Barcas**

Inaugurado em 23 de abril de 2003 em Caravelas (BA) pela empresa Aracruz Celulose, o Terminal Marítimo de Navios-Barcaça Luciano Villas Boas Machado possibilita o transporte de madeira de eucalipto do extremo sul da Bahia até o Terminal de Navios-Barcaça Erling Sven Lorentzen, no Espírito Santo (ARACRUZ CELULOSE, 2010).

A necessidade de implantação do projeto surgiu com a instauração de uma lei no Espírito Santo proibindo a empresa de ampliar as plantações de eucalipto no estado e fazendo esta se voltar para suas áreas de plantio no estado da Bahia. Começara então a preocupação com o transporte visto que, sendo a rodovia federal privatizada, o preço do deslocamento da carga subiria muito com os pedágios. Além disso, a estrada ficaria extremamente congestionada, com a travessia de cerca de 500 carretas por dia (ARACRUZ CELULOSE, 2010).

Era preciso viabilizar um modal novo, que reduzisse custo, evitasse acidentes e congestionamentos nas estradas. A solução foi colocar em prática a idéia do transporte marítimo através da instalação do terminal de Caravelas (Figura 2) (ARACRUZ CELULOSE, 2010).



Figura 2: Terminal Marítimo de Navios-Barcaça Luciano Villas Boas Machado. Fonte: Adaptado de HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda, 2007.

O volume de assoreamento do canal dragado ocasiona perdas de profundidades significativas em apenas um ano. Este está associado ao clima da região em que durante o inverno e primavera ocorre uma maior taxa de assoreamento do canal. (HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda, 2007).

São duas as regiões críticas em relação ao assoreamento do canal as quais podem constituir riscos para o desenvolvimento das atividades do Terminal Marítimo de Navios-Barcaça (Tabela 1). Portanto, ocorre rotineiramente a realização de dragagens de manutenção com o objetivo de combater o assoreamento e garantir as dimensões necessárias ao calado necessário para as embarcações (HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda, 2007).

Tabela 1: Características das regiões críticas ao assoreamento no estuário do rio Caravelas (BA).<sup>1</sup>

| <b>Região críticas ao assoreamento</b> | <b>Características que favorecem o assoreamento</b>                                                                  |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Próximo ao delta de maré vazante       | Migração do canal e aporte de sedimento do banco do delta e da deriva litorânea da linha de costa e Ilha da Caçaroba |
| Início da plataforma continental       | Maiores profundidades e diminuição da intensidade das correntes de maré                                              |

<sup>1</sup>Dados: HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda. (2007).

### 3.2 ESTUÁRIO PIRAQUÊ-AÇU/PIRAQUÊ-MIRIM

A área de estudo correspondente ao trecho do complexo estuarino Piraquê-açu/Piraquê-mirim (Figura 3), localiza-se no município de Aracruz, Espírito Santo, no distrito de Santa Cruz. As águas dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim se encontram em um vale em formato de “Y” e passam a integrar um único canal com

profundidades variadas transversal e longitudinalmente com o eixo confluyente longitudinal alinhado em direção ao mar na direção W-E (BARROSO, 2004).



Figura 3: Região terminal do complexo estuarino Piraguê-açu/Piraguê-mirim onde se localiza a área de estudo.

O sistema possuiu uma morfologia típica em “funil” característica de estuários do tipo vale afogado, apresentando o desenvolvimento de um extenso banco de areia na margem norte de sua desembocadura.

A região vem sofrendo grande pressão antrópica devido a política estadual de incentivo ao desenvolvimento de indústrias e a constante expansão das zonas agropecuárias, além da retirada da floresta de mangue para a construção civil e instalação de atividades portuárias. Com o aumento da atividade humana no entorno do estuário elevam-se, também, os níveis de poluição do ambiente prejudicando as comunidades biológicas que o utilizam como zonas de alimentação, reprodução, desova e abrigo. A degradação do ambiente retorna às populações humanas através da utilização do estuário como fonte de alimentação e de renda para as comunidades locais e populações indígenas que praticam atividades pesqueiras (MAGRIS, 2004).

Martin *et al* (1996) situam o complexo estuarino aqui descrito no setor nordeste do litoral capixaba, caracterizado pelo fraco desenvolvimento de depósitos quaternários ao sopé das falésias da Formação Barreiras. Apresenta, porém, formações quaternárias mais desenvolvidas associadas às adjacências de vales fluviais.

O regime de marés é classificado como semidiurno, com período de aproximadamente 12 horas, apresentando uma amplitude de maré que varia entre

1,4 e 1,5 m classificando-o como submetido à micromaré ( $< 2$  m). O estuário é classificado como fracamente estratificado apresentando um fluxo de água doce bem menor que o volume de água da maré, ocorrendo variações na zona de mistura de acordo com a época do ano (BARROSO, 2004).

Vários estudos foram desenvolvidos no complexo estuarino Piraquê-açu/Piraquê-mirim, entretanto a maioria destes aborda características das comunidades biológicas (CUNHA, 2004; CRUZ, 2004; MAGRIS, 2005; ABREU, 2005; SANT'ANNA, 2005; MACIEIRA, 2006; PIMENTEL, 2006; BARROSO, 2004), apresentam dados sobre o estado do ecossistema quanto aos níveis de poluição (JESUS *et al.*, 2009; DOMINGOS, 2006) ou avaliações das concentrações de nutrientes (OLIVEIRA, 2006; GAIGHER, 2006). Os processos de hidrodinâmica e dinâmica sedimentar, muito importantes na manutenção do ambiente, não apresentam estudos publicados.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 ESTUÁRIOS

Segundo Dyer (1997) e Pritchard (1995), o termo “estuário” é definido como sendo um corpo d’água costeiro, semiconfinado, com ligação livre para o oceano adjacente e com entrada de água da drenagem continental. O sistema se estende até a região limite de influência da maré em direção a montante e durante esse percurso ocorre a diluição das massas d’água marinha e continental.

Os estuários são ambientes recentes no tempo geológico e têm sua gênese associada às alterações do nível do mar de naturezas eustática ou isostática. A diferenciação das características entre os ambientes depende do nível do mar, da topografia do litoral e dos rios, podendo ainda ser fortemente modificada por processos erosivos e deposicionais (MIRANDA *et al*, 2002). Possuem uma característica efêmera com a tendência de serem colmatados ao longo de sua evolução pelas sedimentações fluvial e marinha as quais estão submetidos (SILVA *et al*, 2004).

Estes ambientes geralmente ocorrem em desembocaduras fluviais que transportam quantidades relativamente pequenas de sedimento e alcançam corpos d’água costeiros em que os processos de ondas e correntes de maré são eficientes na dispersão dos sedimentos (BROWN *et al.*, 2001).

Os estuários são ambientes dinâmicos, objetos de grande mobilização da água e de transporte de sedimentos em que as principais forçantes são as correntes de maré. O escoamento residual originado por gradientes de densidade também contribui para a mobilização dos sedimentos. A ação das ondas é significativa na desembocadura de muitos estuários, mas adquire importância limitada à medida que avançamos em direção ao interior do ambiente (DALRYMPLE; RHODES, 1995).

O aporte sedimentar em estuários possui fontes distintas concentrando materiais escoados pela bacia de drenagem, pela plataforma continental, biogênicos e de origem no próprio estuário (erosão do canal, aporte antropogênico, entre outros). A natureza das fácies sedimentares em um estuário varia com a quantidade de sedimentos disponíveis, com a interação dos processos hidrodinâmicos e com a morfologia do fundo (SILVA *et al*, 2004).

A distribuição da granulometria do sedimento ao longo do estuário altera-se pela ação repetida dos processos de deposição, erosão e transporte, que também fazem com que parte do sedimento seja permanentemente aprisionada no ambiente. Desse modo, estuários atuam como um filtro de sedimentos os quais podem alterar suas características através de reações químicas da água estuarina, especialmente argilas, passando a influenciar o transporte de poluentes por adsorção das partículas (BROWN *et al.*, 2001).

## 4.2 SONOGRAFIA

Os principais métodos de investigação do fundo e sub-fundo marinho são: a sísmica, a sonografia e a batimetria, e baseiam-se na propagação de ondas acústicas. Estes sistemas de aquisição funcionam segundo o mesmo princípio: a emissão, transmissão e reflexão de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas (AYRES NETO, 2000).

Os métodos geofísicos supracitados permitem a obtenção de dados que podem subsidiar a implantação de obras de engenharia em áreas submersas, possibilitando um efetivo planejamento de estruturas e atividades humanas como: pontes, portos, barragens, mineração, dragagens, sondagens, escavações em geral e planejamento de rotas de navegação. A presença de formas de fundo de grande porte, por exemplo, pode inviabilizar a implantação de determinada obra, uma vez que estão relacionadas a fundos dinâmicos e irão diminuir a estabilidade das estruturas (FISH; CARR, 1990).

A grande vantagem desses métodos está na alta taxa de aquisição de dados em um curto período de tempo e na possibilidade de determinação mais eficaz no número e localização de amostras pontuais devido ao mapeamento geológico, reduzindo os custos finais do projeto (AYRES NETO, 2000).

A utilização do sonar de varredura lateral tem por objetivo o mapeamento da superfície de fundo, analogamente às técnicas usualmente utilizadas no mapeamento em terra, como a fotografia aérea, imagens de satélite e de radar, que não são aplicáveis no mapeamento de superfícies submersas devido a forte atenuação dos sinais luminosos na água.

O sinal acústico de alta frequência emitido pelo Sonar não penetra através dos estratos sedimentares, porém possibilita a obtenção de informações de subsuperfície com grande resolução permitindo a observação detalhada das feições de fundo tais como, contatos litológicos e estruturas sedimentares.

A sonografia fornece informações sobre as características morfológicas e sedimentológicas das áreas submersas, identificando feições expressivas do relevo e a variação da distribuição superficial dos sedimentos. Pode fornecer ainda, informações sobre a ação de correntes marinhas atuantes no sedimento de fundo e ainda revelar características da estabilidade do leito (AYRES NETO, 2000).

O conjunto dos registros compõe imagens denominadas sonogramas e representam uma imagem do fundo da área investigada. Os sonogramas são formados pelo eco do sinal emitido que retorna ao equipamento com intensidades distintas de acordo, principalmente, com o tipo de sedimento do fundo, o ângulo de incidência, a micromorfologia do fundo e a atenuação das ondas acústicas (BLONDEL; MURTON, 1997).

O ângulo de incidência é definido como o ângulo entre o feixe incidente e a tangente do fundo no ponto de incidência. A intensidade da energia refletida é maior para os feixes mais internos e menor para os feixes mais externos devido a distância do percurso das ondas acústicas. (AYRES NETO, 2000).

A existência de rugosidades na superfície de fundo, seja devido à granulometria ou à micro e macro topografia de fundo, é o que proporcionará o espalhamento (*scattering*) do sinal incidente. Parte destes feixes retornará aos transdutores

representando sinais refletidos propriamente ditos (*backscattering*). Cristas de ondas de areia de pequena escala são um exemplo de componentes da micro-topografia e causam um incremento da energia refletida no flanco voltado para o sonar e grande dispersão no outro flanco (AYRES NETO, 2000).

A refletividade acústica de determinada seção é dada pela diferença entre as propriedades dos materiais que a compõem. Rocha e cascalho são melhores refletores que areia ou lama e se mostrarão mais escuros no registro final. A topografia do fundo também influencia na intensidade da energia refletida que chega ao sonar. Faces de estruturas voltadas para o sonar com inclinação acentuada são melhores refletores do que aquelas com declive suave devido ao baixo ângulo de incidência do pulso do sonar e também aparecerá mais escuro no registro (FISH; CARR, 1990)

A interpretação dos dados também está associada aos contrastes entre os padrões texturais apresentados pelos registros de campo. Texturas rugosas são interpretadas como afloramentos rochosos, recifes de corais, arenitos de praia ou sedimentos grossos (cascalhos). Texturas lisas são interpretadas como sedimentos mais finos (FISH; CARR, 1990).

Muitos estudos demonstraram uma correlação positiva entre a intensidade de retorno do sinal e o diâmetro do sedimento, ou seja, a maior intensidade de retorno corresponde aos sedimentos mais grossos (COLLIER; BROWN, 2005). Quanto mais grosso for o sedimento maior será a quantidade de energia refletida, uma vez que a irregularidade e a maior área de incidência dos grãos permitem uma maior reflexão da energia incidente em determinados pontos. Entretanto, o registro final é o resultado relativo das energias refletidas, portanto, uma região com areia muito grossa e areia fina apresentará um padrão de reflexão muito semelhante a uma área coberta por areia fina e lama (AYRES NETO, 2000).

Áreas de depressão irão receber e refletir menor ou maior energia do sonar em regiões diferentes. No declive abrigado do alcance do pulso acústico, a energia será menor devido a seu ângulo de incidência. Na face oposta, voltada para o sonar, maior energia será refletida e a área aparecerá mais escura no registro do sonar (FISH; CARR, 1990).

A concentração de pulsos refletidos para objetos inclinados em relação ao fundo acarreta a diminuição da reflexão nas áreas ao seu redor uma vez que estas irão ser alcançadas pelos pulsos em menor grau. A área que reflete menor energia aparece mais clara no registro e é chamada “região de sombra” (Figura 4). Podem ocorrer próximas a objetos ou dentro de depressões e imprimem características tridimensionais aos registros de sonar (FISH; CARR, 1990).

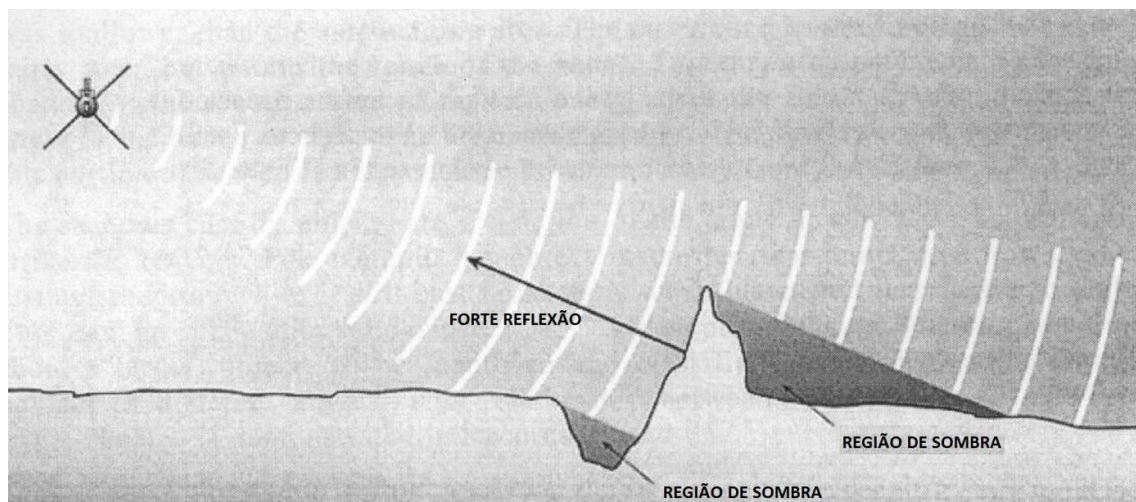


Figura 4: Formação de regiões de sombra no registro do sonar. Fonte: Adaptado de Fish e Carr (1990).

A produção de mosaicos com múltiplos registros de linhas adjacentes é uma alternativa para solucionar o problema da relação inversa entre resolução e cobertura que ocorre na utilização dos métodos de sonografia. Para se amostrar uma área extensa utiliza-se um equipamento com baixa frequência e que, portanto, apresenta resultados com baixa resolução e vice-versa (FISH; CARR, 1990).

### 4.3 FORMAS DE FUNDO EM ESTUÁRIOS

#### 4.3.1 Caracterização

Formas de fundo estão presentes em todos os ambientes arenosos modernos onde as profundidades da coluna d'água são maiores que 1m aproximadamente e onde o fundo possui sedimentos de granulometria superior a 0,15 mm (areia muito fina) (ASHLEY, 1990).

Correntes de maré são instáveis, acelerando e desacelerando durante os ciclos de vazante e enchente, mesmo que o escoamento inverta sua direção regularmente, os padrões de enchente e vazante geralmente não coincidem. Essa característica gera um sistema com variação espacial que permite dominâncias de enchente ou vazante em trechos distintos em um mesmo estuário. A variabilidade temporal e espacial do escoamento e do transporte de sedimento, aliado às flutuações do nível da água, criam a variedade de morfologia de formas de fundo (ASHLEY, 1990).

Dentre as formas de fundo mais encontradas estão as dunas subaquosas (também conhecidas como *sand waves*). Dunas subaquosas são formas de fundo deposicionais alongadas as quais são formadas transversalmente à direção do fluxo dominante (LANGHORNE, 1982). A disposição destas, presentes em ambos ambientes, indica a direção do transporte líquido de sedimento de fundo.

A morfologia da superfície sedimentar da crista de dunas subaquosas variam em resposta às condições de maré e onda. Quando as velocidades de escoamento da maré excedem sensivelmente a velocidade crítica de movimento da areia, grandes volumes de sedimento são erodidos e acrescidos pelas sucessivas marés enchente e vazante as quais causam oscilações na crista (LANGHORNE, 1982).

Dunas e *ripples* sobrepostas são as melhores indicadoras da movimentação do sedimento (McCAVE, LANGHORNE; 1982). Dunas pequenas, com reduzida capacidade de estocar sedimento, podem mudar sua orientação continuamente ao longo de um único ciclo de maré. Um ciclo de maré curto não é capaz de retrabalhar inteiramente todo o volume de sedimentos estocado em dunas maiores, entretanto, seu perfil é continuamente modificado por correntes com direções opostas (ASHLEY, 1990).

A presença de dunas subaquosas pode revelar características sobre a hidrodinâmica do ambiente. O formato e inclinação destas dependem de fatores

como: a força relativa das correntes dominante e subordinada, a taxa de transporte de sedimento, a orientação da duna, a presença ou ausência de dunas sobrepostas e o comportamento da duna num ciclo de maré (DALRYMPLE; RHODES, 1995).

As dimensões de dunas subaquosas variam principalmente com a profundidade do ambiente, intensidade das correntes e granulometria do sedimento de fundo. Flemming (2000) estabeleceu por meio de amostragem em um campo de dunas na Plataforma Continental Sudeste Africana uma relação entre o diâmetro do sedimento e as dimensões máximas da duna (Figura7).

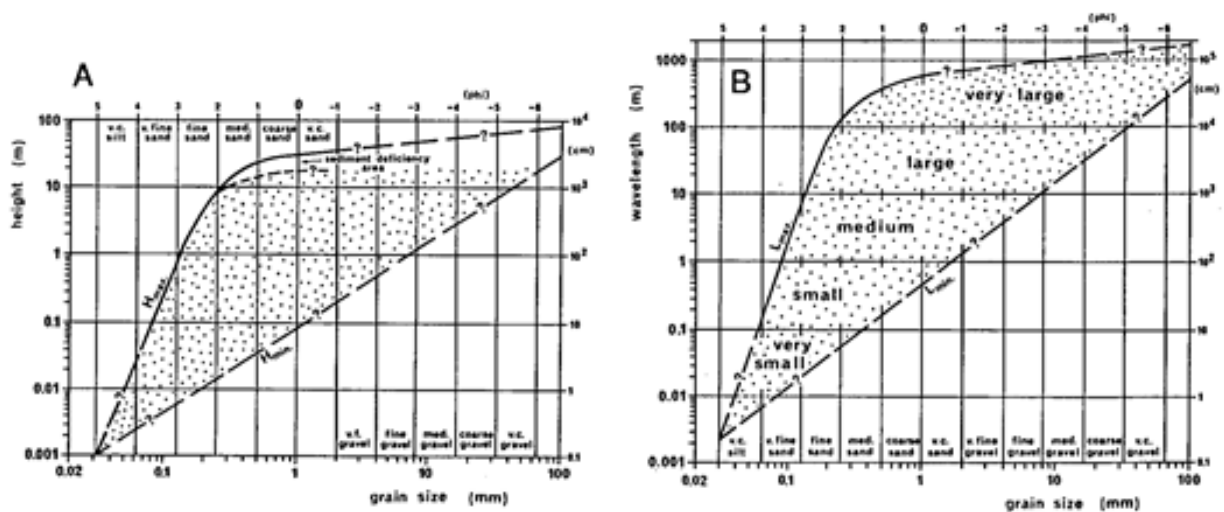


Figura 5: Altura máxima da duna (A) e comprimento máximo da duna (B) em função da granulometria do sedimento. Fonte: FLEMMING, 200.

De acordo com o autor, considerando-se fatores como profundidade e velocidade do escoamento favoráveis ao estabelecimento das condições ideais, as dimensões potenciais das estruturas (altura e comprimento) variam diretamente com o diâmetro do sedimento. Uma das prováveis explicações para a relação seria devido à proporção relativa de sedimento sendo transportado como carga suspensa, uma vez que tendo-se sedimentos de menores granulometrias estes seriam mais facilmente transportados, assim, a altura da duna, e conseqüentemente seu comprimento, diminuem ao passo que o montante de sedimento em suspensão aumenta (DALRYMPLE; RHODES, 1995).

### 4.3.2 Predição das formas de fundo

O comportamento das estruturas sedimentares é dinâmico, quando as condições do ambiente se alteram, a morfologia das dunas existentes irá ser modificada a fim de se restabelecer o equilíbrio (DALRYMPLE; RHODES, 1995). São vários os processos que induzem variações nas dimensões das formas de fundo, reduzindo ou ampliando suas alturas e comprimentos. Dentre eles podemos citar: a relação altura/espçamento das dunas, a influência da profundidade, a influência da granulometria e o efeito da velocidade do escoamento (FLEMMING, 2000).

O crescimento da duna está intimamente ligado à granulometria do sedimento e a velocidade de cisalhamento de transição entre transporte em suspensão e transporte de carga de fundo. Krögel e Flemming (1988) demonstram a relação entre a velocidade de decantação média das partículas ( $w_s$ , cm/s) e a velocidade de cisalhamento crítica ( $u_{cr}$ , cm/s) admitindo o sedimento com granulometria de 0,5 mm.

$$u_{cr} = \{0,482 [((\delta_s - \delta_f)/\delta_f) v g]^{0,282}\} \times (0,15w_s^{0,5}) + 0,61$$

Onde,  $\delta_s$  (é a densidade da partícula ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\delta_f$  é a densidade do fluido,  $v$  é a viscosidade cinemática (cSt) e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{cm/s}^2$ ). Uma vez alcançada à velocidade de cisalhamento crítica, inicia-se a formação das dunas. Caso atinja valores inferiores, as duas podem ser gradualmente convertidas em fundos planos.

A altura da duna diminui ao passo que os sedimentos se tornam mais finos, uma vez que a proporção relativa de sedimento transportado como carga suspensa aumenta. Entretanto, a correlação positiva entre granulometria e altura pode inverter para granulometrias inferiores a 0,5 mm e com isso a altura das formas passa a diminuir com o aumento contínuo da granulometria (DALRYMPLE; RHODES, 1995).

A altura da duna varia mais rápido que o comprimento, uma vez que a quantidade de sedimento utilizada para aumentá-la ou diminuí-la é maior que a necessária para variar seu comprimento (DALRYMPLE; RHODES, 1995).

Dunas famintas se formam em ambientes cuja disponibilidade de sedimentos não-coesivos, passíveis de transporte de carga de fundo, não é suficiente para suprir a demanda da duna. Caso a quantidade de sedimentos seja insuficiente para cobrir o fundo, as dunas serão gradualmente dissipadas para que se evite a erosão do leito. Numa situação de abundância de sedimento coesivo não haveria formação de dunas uma vez que estes não são viáveis ao desenvolvimento das mesmas (DALRYMPLE; RHODES, 1995). A produção de dunas famintas evidencia a existência de uma altura superior limite a qual não é ultrapassada, independente do comprimento da duna (FLEMMING, 2000).

Existem diversos métodos para se conhecer as dimensões das dunas uma vez conhecido um de seus componentes. Através da análise dos sonogramas, por exemplo, é possível a medição do espaçamento (ou comprimento) da duna pela distância entre as formas, com isso é possível a identificação das demais dimensões da duna.

Flemming (2000), após extensa coleta de dados na plataforma continental sudeste africana (Figura 5), observou uma alta correlação entre os dados ( $r = 0,98$ ) e a presença de uma relação exponencial positiva entre espaçamento (H) e altura (L), determinada por:

$$H = 0,0677L^{0,8098}$$

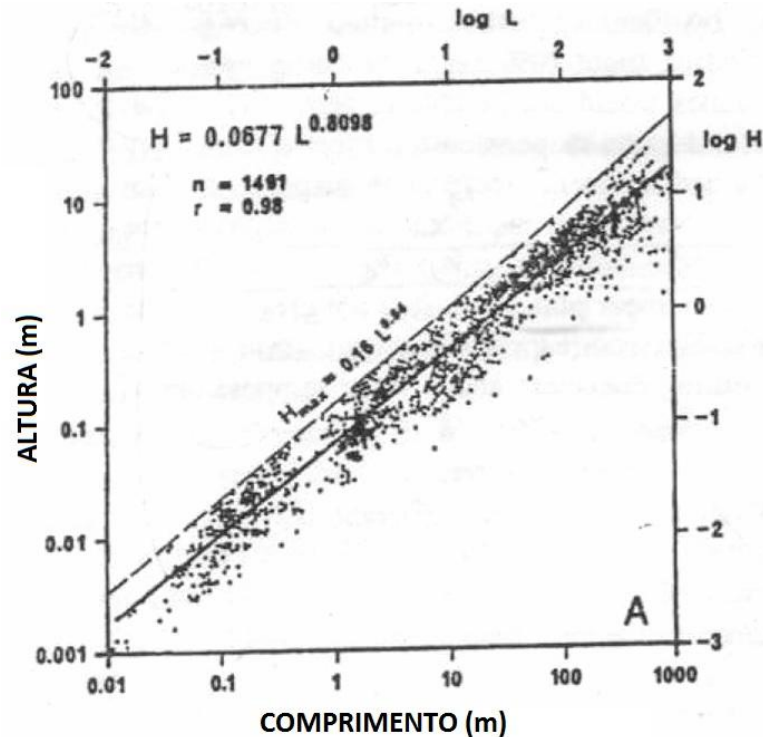


Figura 6: Relação entre altura e comprimento da duna. Fonte: Adaptado de Flemming (2000).

#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO DE FORMAS DE FUNDO

A classificação das estruturas sedimentares de maneira universal permite o entendimento entre os pesquisadores de modo que formas semelhantes sejam classificadas em um mesmo grupo. Uma das classificações mais empregadas atualmente é a proposta por Ashley (1990) em que são consideradas as características hidrodinâmicas das estruturas para que assim seja feita uma conexão entre a estrutura interna, a morfologia e o escoamento que gerou a forma de fundo.

A fim de se generalizar a nomenclatura das estruturas, é assumido um único termo: *dunas*; utilizando-se o termo *subaquosa* quando for necessário distingui-las daquelas formadas pelo vento em superfície (*eólicas*). Para distinguir características distintas é utilizada uma hierarquia de outras descrições (ASHLEY, 1990).

A primeira ordem de descrição se refere à forma e ao tamanho da duna, essa caracterização deve separar as classes de dunas e ser parte integrante do nome da

forma de fundo. Para classificação segundo o tamanho é admitido uma divisão arbitrária em 5, 10, 100 e 1000 m de comprimento no sentido de diferenciar formas “pequenas”, “médias”, “grandes” e “muito grandes” respectivamente (ASHLEY, 1990). Para dunas regulares, o comprimento da onda (ou espaçamento) é calculado pela determinação da distância de crista a crista entre as estruturas (FISH; CARR, 1990). O intervalo de espaçamento e as alturas médias calculadas para cada grupo de tamanho são:  $0,6 > L > 5$  m e  $0,075 > H > 0,4$  m, *pequenas*;  $5 > L > 10$  m e  $0,4 > H > 0,75$  m, *médias*;  $1 > L > 100$  m e  $0,75 > H > 5$  m, *grandes* e  $L > 100$  m e  $H > 5$  m, *muito grandes* (ASHLEY, 1990).

Ainda na primeira ordem de descrição, as formas são classificadas segundo sua estrutura sedimentar e com isso as dunas podem ser separadas em dois grupos: bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). As primeiras são formas que ocorrem em correntes de baixa velocidade de escoamento e cujas superfícies de estratificação são planas, enquanto as últimas estão relacionadas a altas velocidades e formam superfícies com *scour* ou com calhas. Admitindo ambas com uma mesma granulometria (ASHLEY, 1990).

A segunda ordem de descrição refere-se à presença ou não de formas de fundo sobrepostas, que irá identificar as estruturas maiores como compostas ou simples, respectivamente, e ainda à granulometria e distribuição do sedimento que compõe a forma de fundo (ASHLEY, 1990).

A terceira ordem de classificação identifica detalhes da morfologia e comportamento das formas de fundo bem como das características do escoamento. Porém apenas a primeira ordem integra a nomenclatura da duna (ASHLEY, 1990).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 LEVANTAMENTOS SONOGRÁFICOS

Foram realizados levantamentos sonográficos utilizando o sonar de varredura lateral de alta resolução modelo Edgetech 4100, com sistema de aquisição digital modelo 560p e acoplado ao peixe 272TD (transdutor) o qual foi rebocado na popa do barco. As linhas sonográficas amostradas cobriram, em ambas as áreas de estudo, a região próxima à desembocadura do estuário.

Os registros foram inicialmente tratados com o auxílio do programa de aquisição de dados sonográficos SonarWizMAP-4 da *Cheasapeack Technology* por meio do qual foi elaborado um mosaico, que permitiu uma visão em grande escala dos padrões de distribuição das formas de fundo de interesse para posterior interpretação e análise. A interface do programa identificando os mosaicos adquiridos nas duas áreas de interesse é mostrada na figura 6.



Figura 7: Interface do programa computacional utilizado na investigação de ambos os estuários, Caravelas e Piraquê-açu/Piraquê-mirim.

Após a obtenção das imagens do assoalho marinho foi gerado um mapa com a distribuição das formas de fundo por meio da utilização do *software* SURFER<sup>®</sup>, para a identificação visual e investigação da dinâmica relacionada à sua formação.

## 5.2 NOMENCLATURA

De modo a padronizar a nomenclatura das formas de fundo, esta foi realizada através da proposta de Ashley (1990). Assim, um único termo será assumido: *dunas*; e, para se distinguir características distintas, é utilizada uma hierarquia de outras descrições (Tabela 2), em que apenas a primeira ordem de classificação integra a nomenclatura da duna (ASHLEY, 1990). Admitindo-se no presente trabalho apenas dunas com formação submarina, não há necessidade da diferenciação quanto a dunas de origem eólicas, portanto, o termo “subaquosa” não será empregado.

Tabela 2: Esquema de classificação das formas de fundo<sup>1</sup>

| <b>Dunas Subaquosas</b>                                         |             |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| <b>Primeira Ordem de Classificação</b>                          |             |             |
| - Tamanho:                                                      |             |             |
|                                                                 | Comprimento | Altura      |
| Pequenas                                                        | 0,6-5 m     | 0,075-0,4 m |
| Médias                                                          | 5-10 m      | 0,4-0,75 m  |
| Grandes                                                         | 10-100 m    | 0,75-5 m    |
| Muito grandes                                                   | >100 m      | >5 m        |
| <b>Segunda Ordem de Classificação</b>                           |             |             |
| - Sobreposição: Simples ou Compostas                            |             |             |
| - Características do sedimento: granulometria, distribuição,... |             |             |
| <b>Terceira Ordem de Classificação</b>                          |             |             |
| - Perfil da forma de fundo                                      |             |             |
| - Cobertura do fundo por formas de fundo                        |             |             |
| - Estrutura do escoamento                                       |             |             |
| - Força relativa de escoamentos opostos                         |             |             |
| - Histórico do comportamento de migração da duna                |             |             |

1 Adaptado de Ashley, 1990.

Para se obter os valores das alturas das dunas utilizou-se a equação de Flemming (2000) onde a altura da estrutura (H) é calculada a partir de seu comprimento (L), obtido através de medições no programa SonarWizMAP-4. Sendo ela:

$$H = 0,0677L^{0,8098}$$

### 5.3 DINÂMICA SEDIMENTAR

Foi utilizado o modelo numérico unidimensional Sedtrans05, para determinação de formas de fundo e taxas de transporte de carga de fundo. Este modelo trabalha com sedimentos coesivos ou não-coesivos e identifica a ação de ondas e correntes ou apenas de correntes. O programa oferece cinco opções de algoritmos para o transporte de sedimento não-coesivo baseados nas equações de Engelund-Hansen, Einstein-Brown, Bagnold, Yalin e Van Rijn (NEUMEIER *et al*, 2006).

O método escolhido foi o de Van Rijn, o mais conhecido para a determinação da geometria das formas de fundo. Este assume que as dimensões e migração das estruturas são controladas principalmente pelo transporte de sedimentos de fundo. Permite a previsão da altura e esbeltez das dunas como função de variáveis da corrente simples de se obter em campo, como: profundidade, velocidade média e granulometria dos sedimentos (STRASSER, 2002).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 DISPOSIÇÃO DE FORMAS DE FUNDO

*Ripples* e dunas de menor porte estocam menor volume de sedimento e por isso são passíveis de modificações ao longo de um mesmo ciclo de maré. A situação da maré durante as amostragens de ambos ambientes foi adquirida pela observação da tábua de maré com maior proximidade dos estuários (Tabela 3). Para o estuário do rio Caravelas utilizou-se a maré medida no porto de Ilhéus, enquanto para o Piraquê, foram utilizados os valores obtidos no porto da Barra do Riacho.

Tabela 3: Tábua de maré para os dias de amostragem em ambos ambientes. Cor azul significa maré baixa e cor vermelha, maré alta.

| TÁBUA DE MARÉ |              |             |              |
|---------------|--------------|-------------|--------------|
| Caravelas     |              | Santa Cruz  |              |
| Horário (h)   | Elevação (m) | Horário (h) | Elevação (m) |
| 05:34         | 0,7          | 01:32       | 0,3          |
| 11:26         | 1,7          | 08:06       | 1,1          |
| 17:54         | 0,6          | 13:58       | 0,6          |
|               |              | 19:38       | 1,1          |

Como também observado por Flemming (2000), a diferença na morfologia das dunas observada nos dois ambientes é devido à influência da profundidade, distribuição da granulometria, disponibilidade de sedimento e efeito da velocidade do escoamento. Uma vez que as características hidrodinâmicas sejam diferentes, as feições resultantes de sua ação também serão.

### 6.1.1 Estuário de rio Caravelas (BA)

A composição sedimentar do ambiente e sua distribuição ao longo do mesmo estão entre os fatores responsáveis pelo aparecimento das formas de fundo. A composição sedimentológica da região de entrada do estuário do rio Caravelas constitui-se, majoritariamente, de areia e silte (Figura 8). A fração granulométrica mais fina é encontrada próxima à desembocadura enquanto o restante do estuário é dominado por um fundo arenoso.

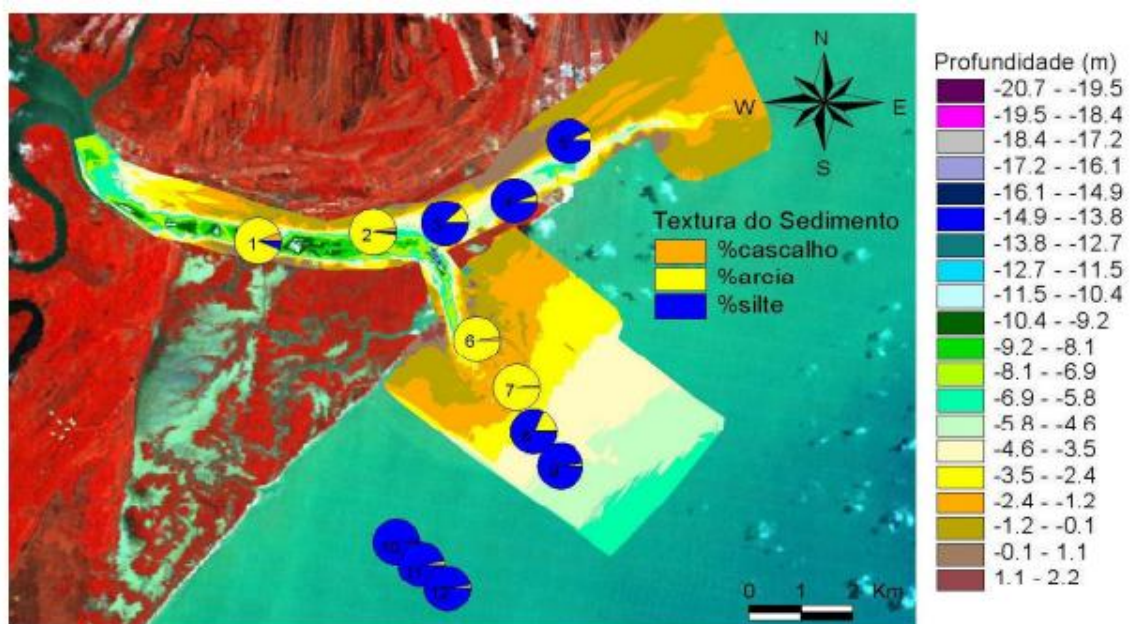


Figura 8: Distribuição sedimentar e batimetria na entrada do estuário do rio Caravelas. Fonte: HM Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda.

A amostragem das linhas sonográficas no estuário do rio Caravelas foi realizada no dia 15 de maio de 2009, entre 12:00 e 15:00 horas, aproximadamente e, portanto, durante a maré vazante. Constituiu-se de três linhas contínuas que juntas alcançam uma extensão de cerca de 10 km de comprimento (Figura 9).

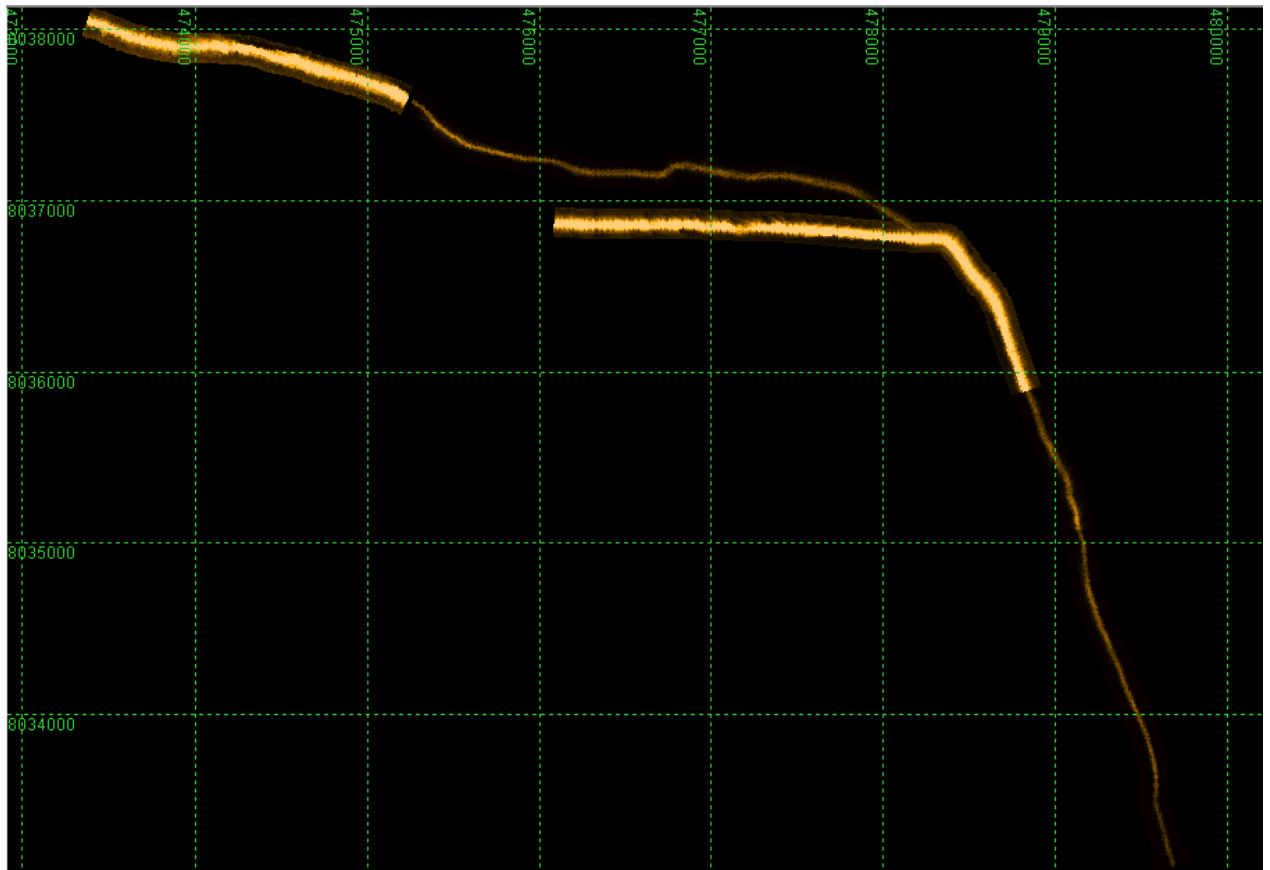


Figura 9: Mosaico referente ao trecho do estuário do rio Caravelas.

A partir das observações do mosaico foram identificadas formas de fundo específicas e sua distribuição ao longo da área de estudo para Caravelas (Figura10).

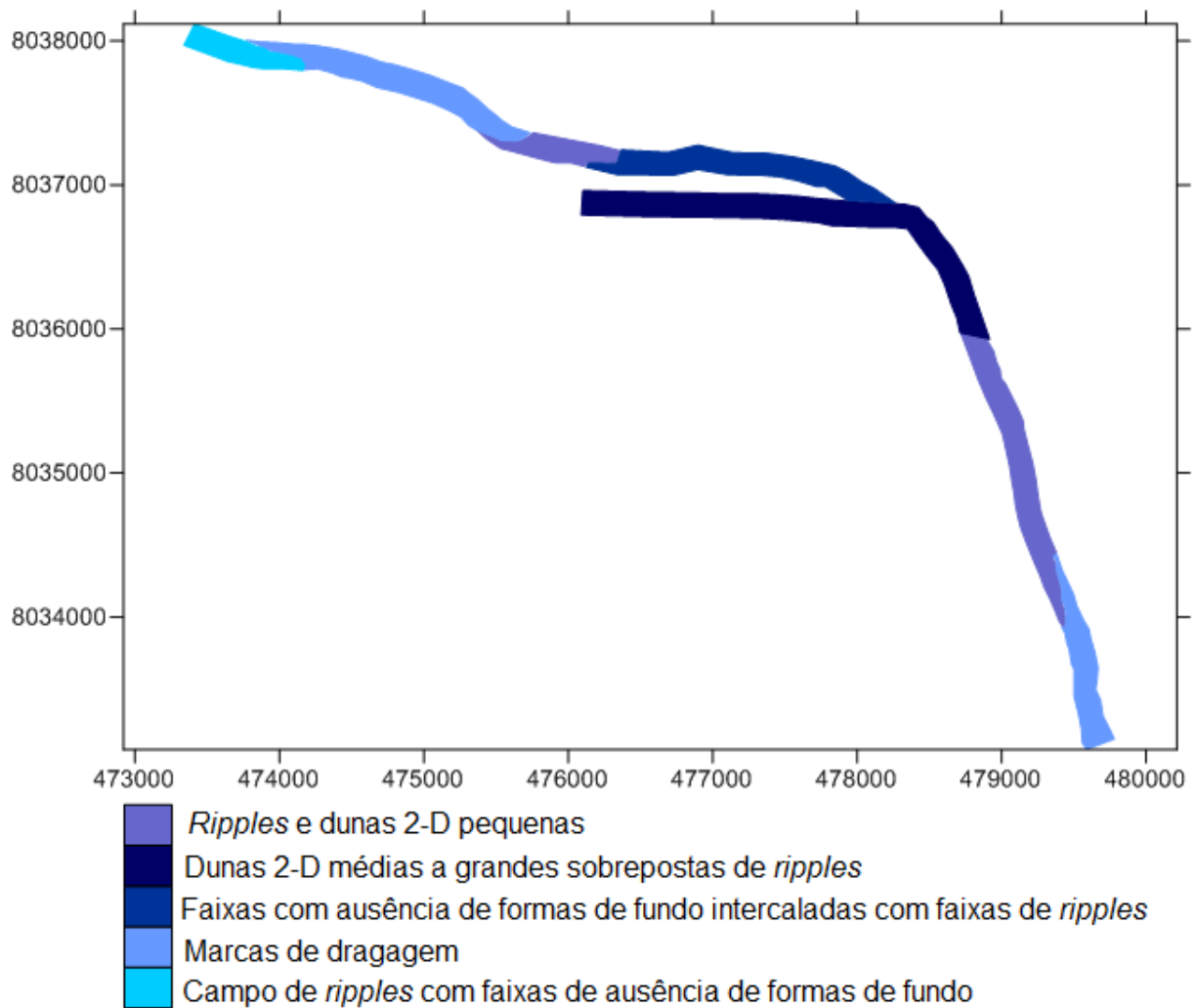


Figura 10: Tipos de formas de fundo encontrados para a entrada do estuário do rio Caravelas.

As formas de fundo encontradas foram principalmente dunas e *ripples* o que permite inferir uma forte característica sedimentar ao ambiente com predominância de sedimento arenoso e correntes de magnitudes capazes de mobilizar e transportar a carga sedimentar a fim de ser possível a observação das estruturas sobre o fundo. As principais estruturas encontradas foram:

- *Ripples* e dunas 2-D pequenas

As formas de fundo presentes correspondem a *ripples* e dunas 2-D pequenas de até 5 m de comprimento e aproximadamente 25 cm de altura (Figura 11).

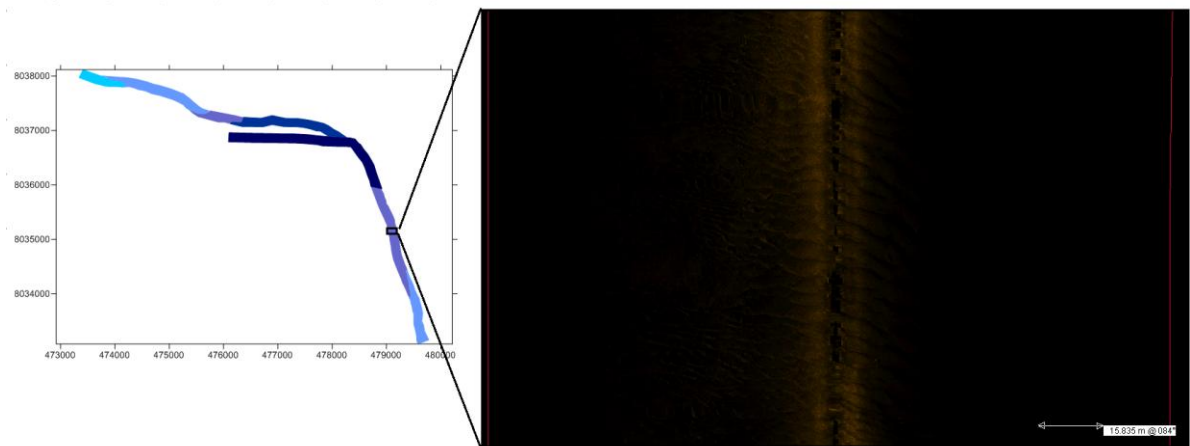


Figura 11: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D pequenas e *ripples*.

As cristas apresentam orientação voltada para *offshore* corroborando com a direção das correntes de maré que no momento da amostragem eram de vazante. As correntes de maré permitiram a formação de dunas 2-D, indicando um fluxo unidirecional com ausência de vórtices ou grandes turbulências.

- Dunas 2-D médias a grandes sobrepostas de *ripples*

As formas de fundo desta região equivalem a dunas 2-D médias com comprimento de até 9 m e altura de cerca de 40 cm a dunas 2-D grandes com até 35 m de comprimento e 1,20 m de altura espaçadas no registro e sobrepostas de *ripples* (Figura 12).

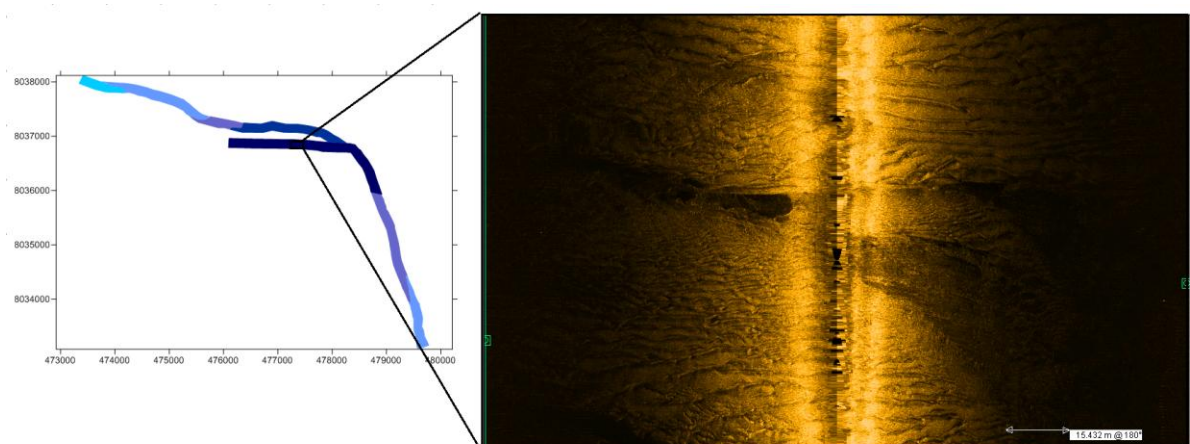


Figura 12: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D médias a grande sobrepostas de *ripples*.

A sobreposição de *ripples* em dunas de maiores dimensões indica uma relação complexa. Dalrymple e Rhodes (1995) propõem duas teorias para formação destas estruturas: 1) a formação das *ripples* devido ao aparecimento de uma camada de contorno interna próxima à superfície das dunas maiores; e 2) Mudanças temporais na profundidade da água as quais permitiria, após a formação das dunas, o aparecimento de *ripples* em profundidades menores, sendo que as dunas maiores permaneceriam devido a sua maior estabilidade. No caso das estruturas encontradas para o canal de Caravelas, a teoria de formação mais compatível seria a primeira, visto que o ambiente corresponde a parte mais externa do estuário e assim sendo a variação na profundidade d'água não é muito significativa.

Tendo em vista os fatores que permitem um maior crescimento das dunas podemos inferir que o local de formação das dunas 2-D médias a grandes (Figura 13) encontra-se sujeito a um escoamento de grande velocidade e a uma profundidade suficientemente grande para o estabelecimento das formas.

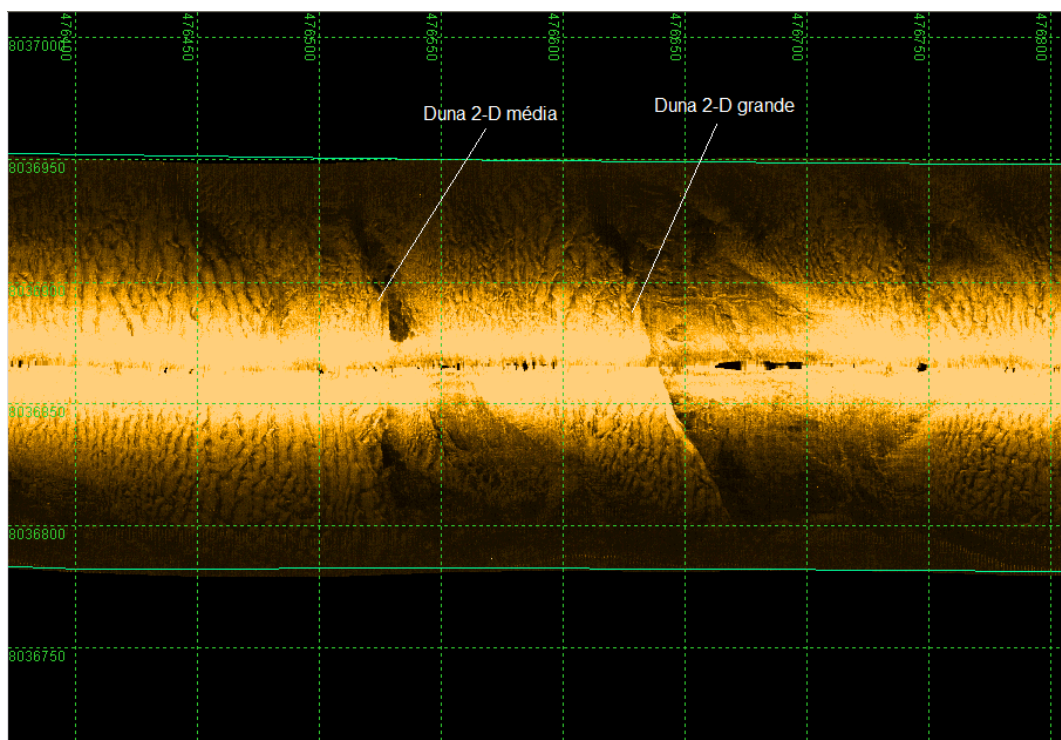


Figura 13: Duna 2-D média e grande amostradas no canal do estuário de Caravelas.

- Faixas com ausência de formas de fundo intercaladas com faixas de *ripples*

Ao longo desse registro foram encontradas regiões com presença de *ripples*, mas que se convertiam abruptamente em regiões planas com ausência de formas de fundo (Figura 14). Esta configuração pode ser encontrada devido a um aumento na intensidade das correntes, provavelmente associada ao estabelecimento das correntes de vazante. As *ripples* por constituírem uma estrutura de baixa estocagem de sedimento podem ser amplamente modificadas ao longo do ciclo de maré.

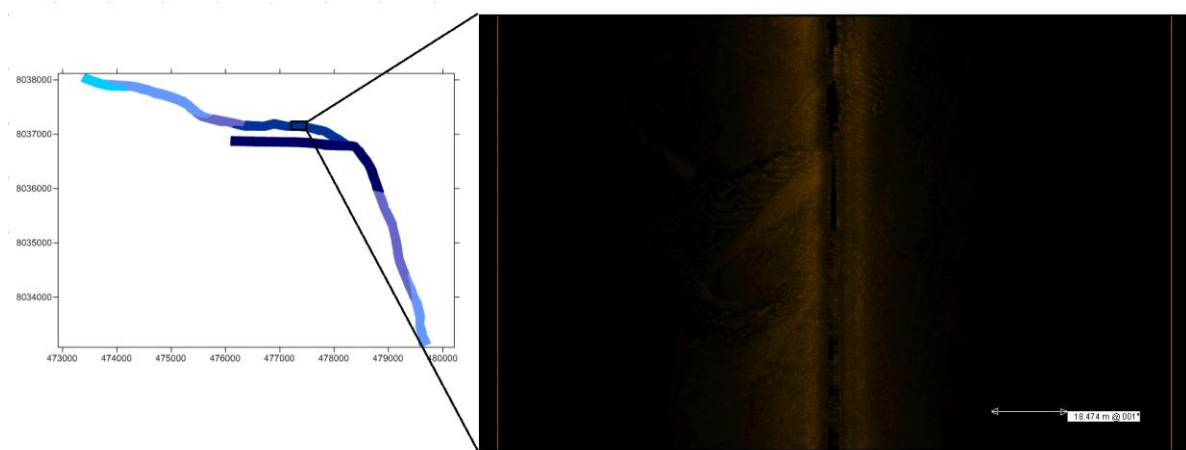


Figura 14: Faixas planas com ausência de formas de fundo e faixas com presença de *ripples*.

- Marcas de dragagem

As formas de fundo presentes aqui atravessam campos de *ripples* e possuem origem antrópica. Estas correspondem a sulcos oriundos da atividade de dragagem desenvolvidas na região para permitir a navegação segura até o terminal de barcas no interior do estuário (Figura 15).

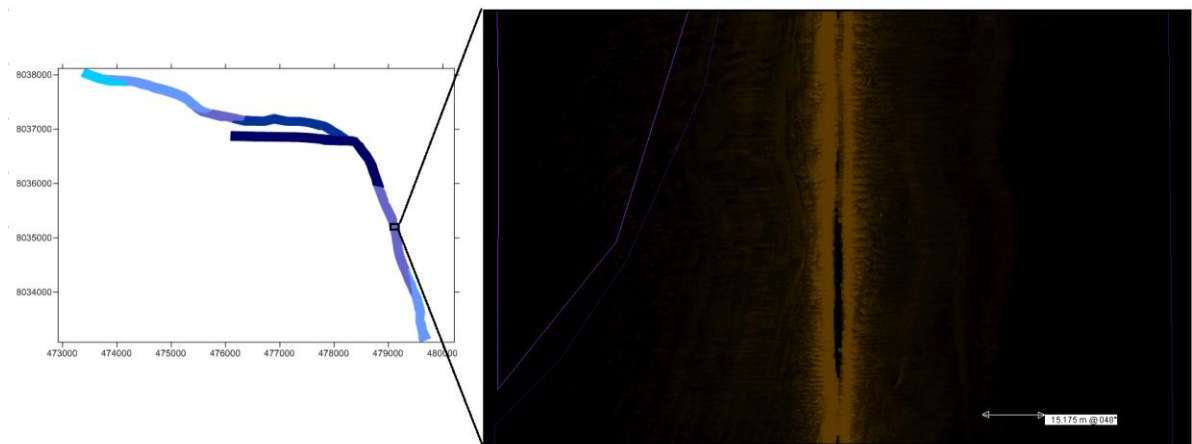


Figura 15: Formas de fundo artificiais correspondentes a sulcos de dragagem.

A partir da observação do mapeamento das estruturas foi possível identificar as áreas onde são impostas atividades de dragagem de manutenção periódicas por constituírem regiões críticas ao assoreamento. Foi possível, também, a observação do banco de dunas próximo à região dragada que confere criticidade ao canal navegável onde são encontradas dunas de até 1,2 metros de altura.

- Campo de *ripples* com faixas de ausência de formas de fundo

A região é dominada por *ripples*, mas apresenta também faixas com ausência de formas de fundo (Figura16).

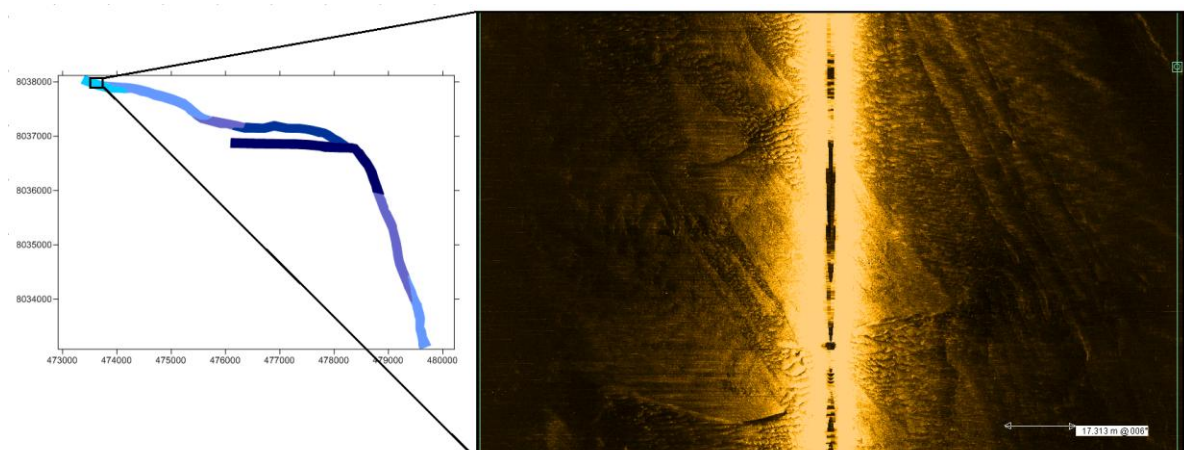


Figura 16: campo de *ripples* cortado planos com ausência de formas de fundo.

### 6.1.2 Estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim (ES)

Segundo Barroso (2004), o estuário do rio Piraquê-açu/Piraquê-mirim constitui um ambiente natural ainda pouco modificado pelo homem em termos de obras submarinas. Assim sendo, a distribuição sedimentar é função da hidrodinâmica do corpo d'água a qual rege o padrão de transporte de sedimento e conseqüentemente a configuração das formas de fundo.

Na região da área de estudo próxima ao encontro dos rios foram encontrados depósitos de areia com teores significativos de lama (Figura 17). Próximo a desembocadura ocorre a dominância de areia média e grossa, evidenciando a dominância do processo marinho, enquanto o banco arenoso está associado a um depósito de areia fina. Diversas amostras ao longo do estuário possuem sedimentos cascalhosos biodetríticos relacionados à produtividade biológica local (SILVA *et al.*, 2010).

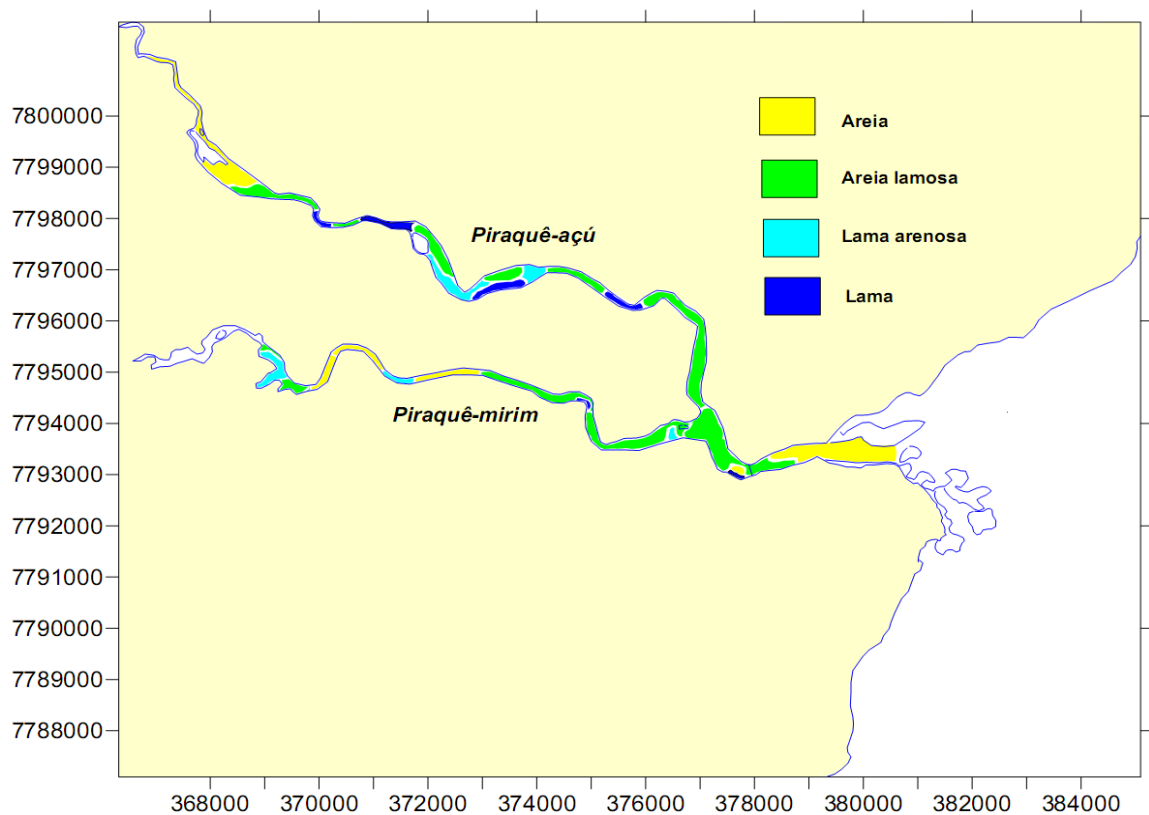


Figura 17: Mapa faciológico da classificação textural dos sedimentos modificado de Folk (1954).  
Fonte: SILVA *et al.*, 2010.

A batimetria do canal do estuário (figura 18) mostra a variação da profundidade ao longo do ambiente e fornece informações necessárias à explanação sobre a distribuição das formas de fundo no mesmo.

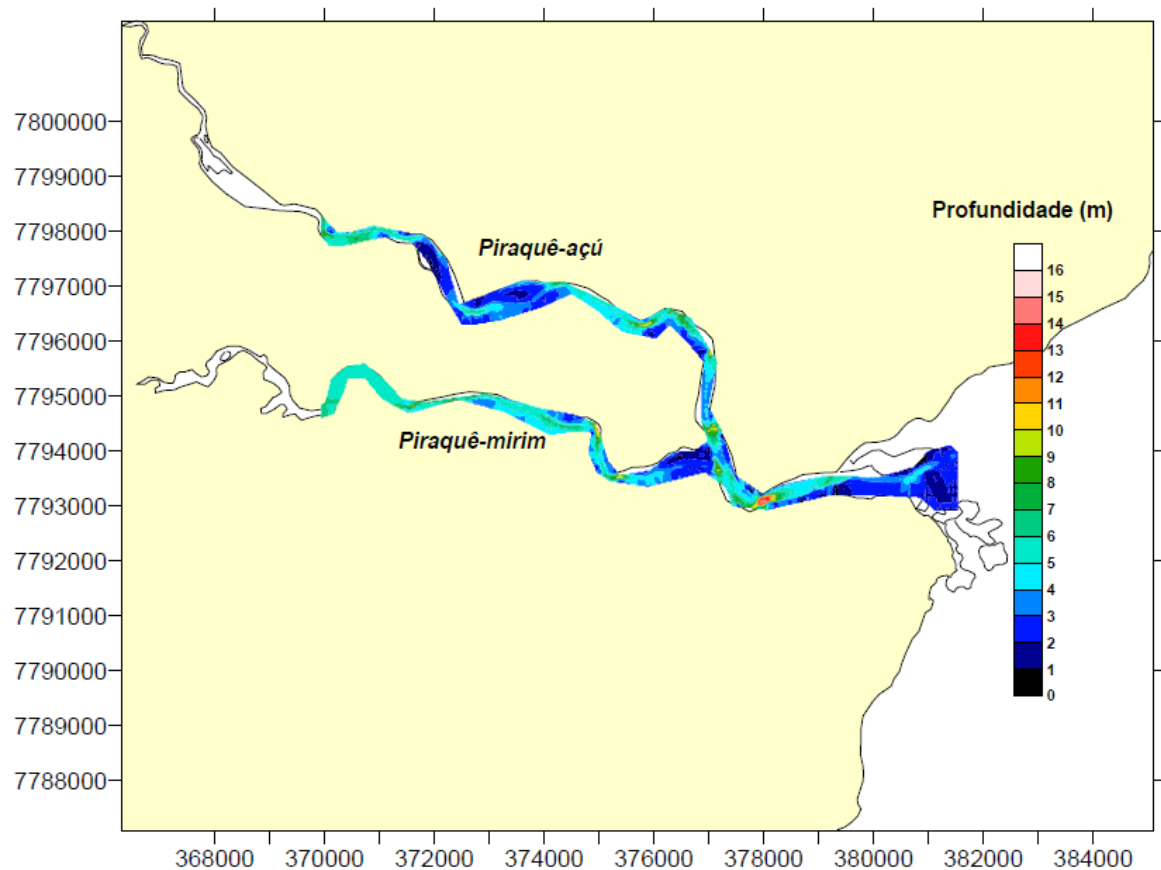


Figura 18: Batimetria do estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim. Fonte: SILVA *et al*, 2010.

A amostragem das linhas sonográficas no estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim constituiu-se de 38 linhas de aproximadamente perpendiculares à margem do canal, abrangendo uma extensão do fundo marinho de cerca de 12 km de comprimento (Figura 19). A amostragem foi realizada entre 12:00 e 15:00 horas o que correspondeu à estufa de maré baixa e à maré enchente adjacente no ciclo de maré.

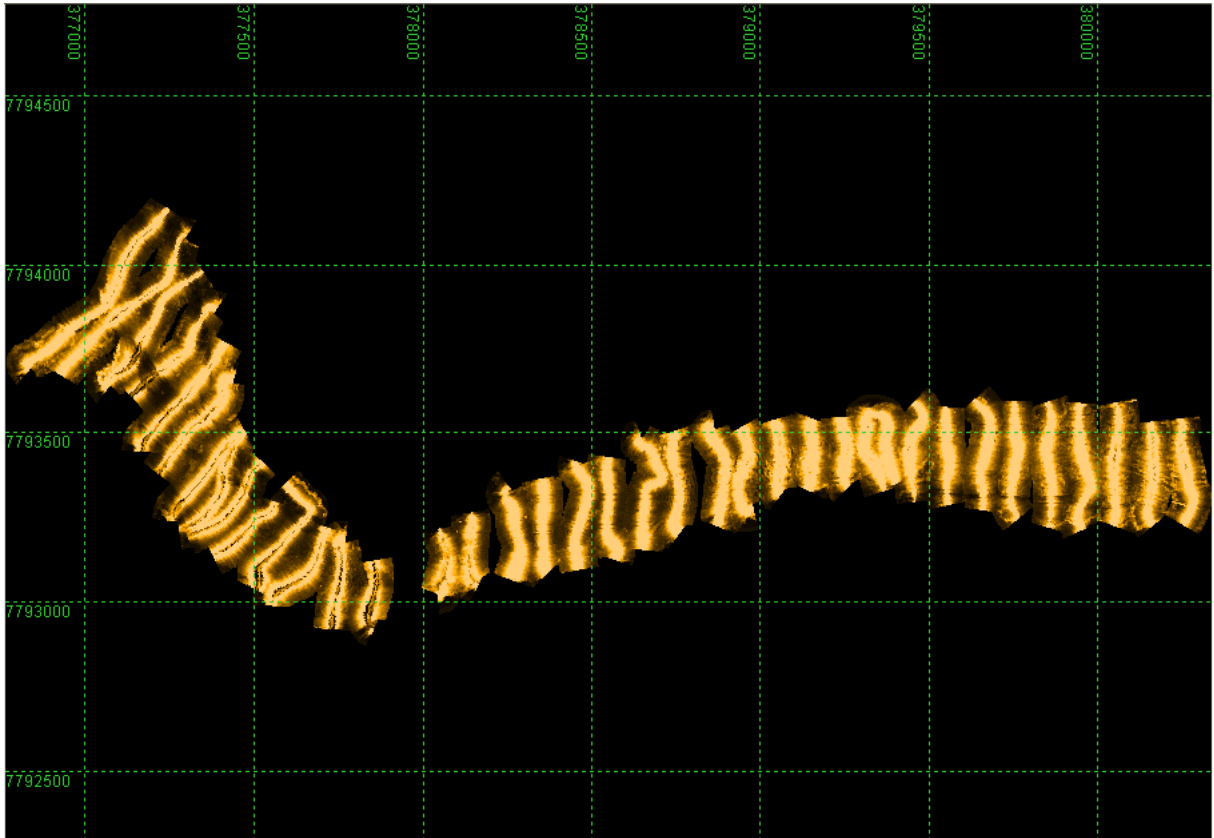


Figura 19: Mosaico referente ao trecho do estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim correspondente a uma das áreas de estudo.

A partir das observações do mosaico foram identificadas as formas de fundo presentes na área de estudo. A figura 20 corresponde ao mapa de distribuição das formas de fundo encontradas no Piraquê-açu/Piraquê-mirim.

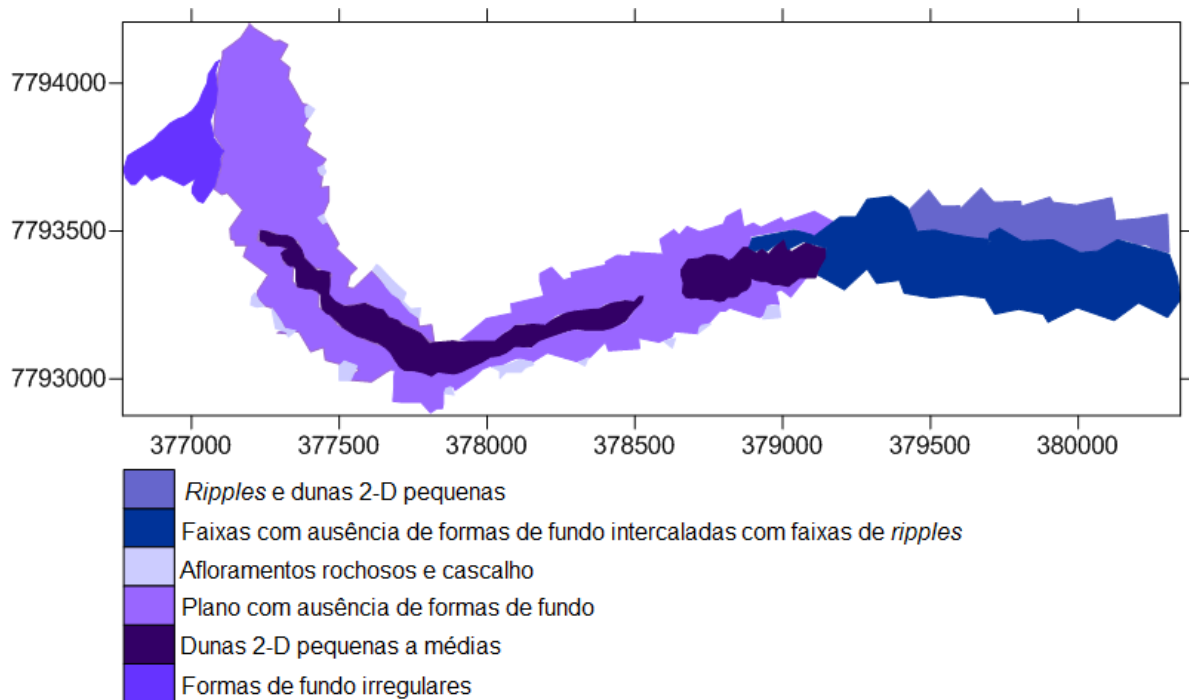


Figura 20: Tipos de formas de fundo encontrados para a entrada do estuário do rio Piraquê-açu.

As formas de fundo para o trecho amostrado do estuário do Piraquê-açu/Piraquê-mirim foram, principalmente:

- *Ripples* e dunas 2-D pequenas

As formas de fundo aqui representadas correspondem a *ripples* e dunas 2-D pequenas de até 5 m de comprimento e aproximadamente 25 cm de altura (Figura 21). Os menores valores nas dimensões das dunas podem estar associados ao afinamento dos grãos na região do banco. As cristas apresentam orientação voltada para desembocadura do estuário, identificando um padrão peculiar visto que a maré no momento de amostragem era de enchente.

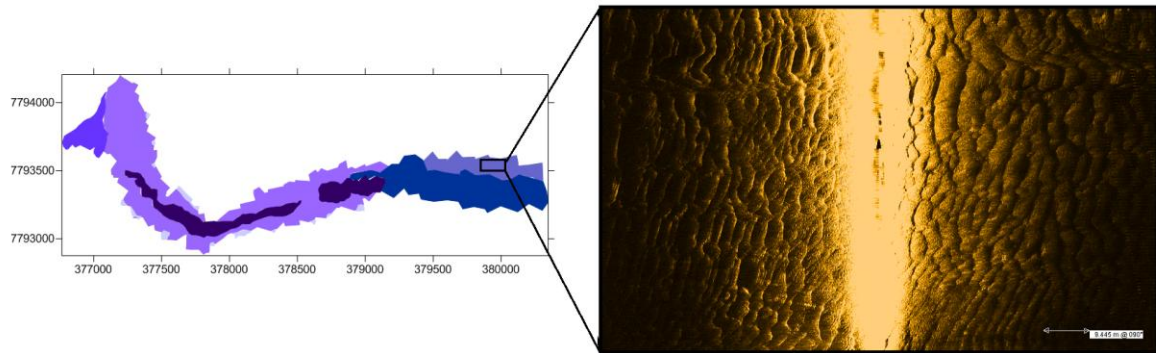


Figura 21: Formas de fundo correspondentes a dunas 2-D pequenas e *ripples*.

- Faixas com ausência de formas de fundo intercaladas com faixas de *ripples*

Presença de campos de *ripples* interrompidos por regiões planas com ausência de formas de fundo. Esta configuração pode ser encontrada devido a um aumento na intensidade das correntes, provavelmente associado ao estabelecimento das correntes de vazante, momento no qual ocorre maior intensificação das correntes. As *ripples* começam a adquirir características de estruturas 3-D, evidenciando ainda mais a intensificação das correntes. As *ripples* por constituírem uma estrutura de baixa estocagem de sedimento podem ser amplamente modificadas ao longo do ciclo de maré (Figura 22).

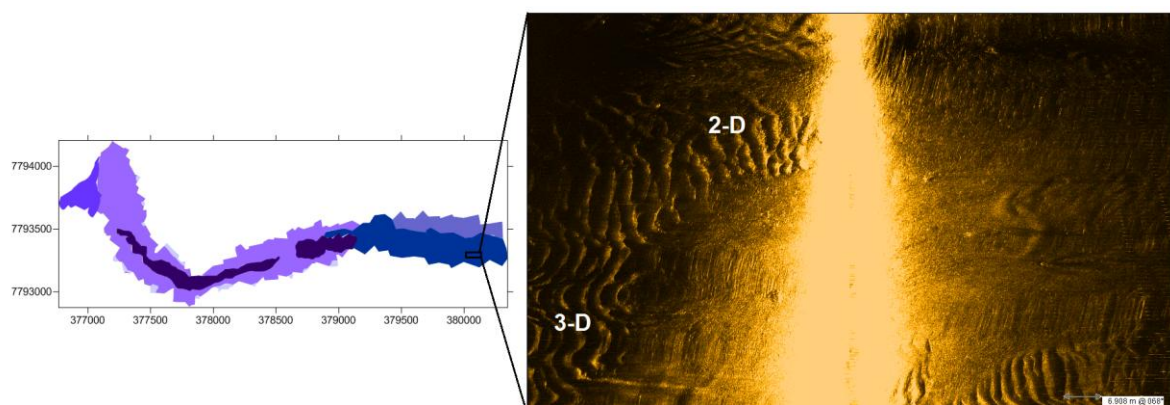


Figura 22: Faixas com ausência de formas de fundo intercaladas com faixas de *ripples*

- Afloramentos rochosos e cascalho

Foram encontrados afloramentos rochosos e sedimentos cascalhos associado à feição, muito encontrados ao longo deste estuário (Figura 23).

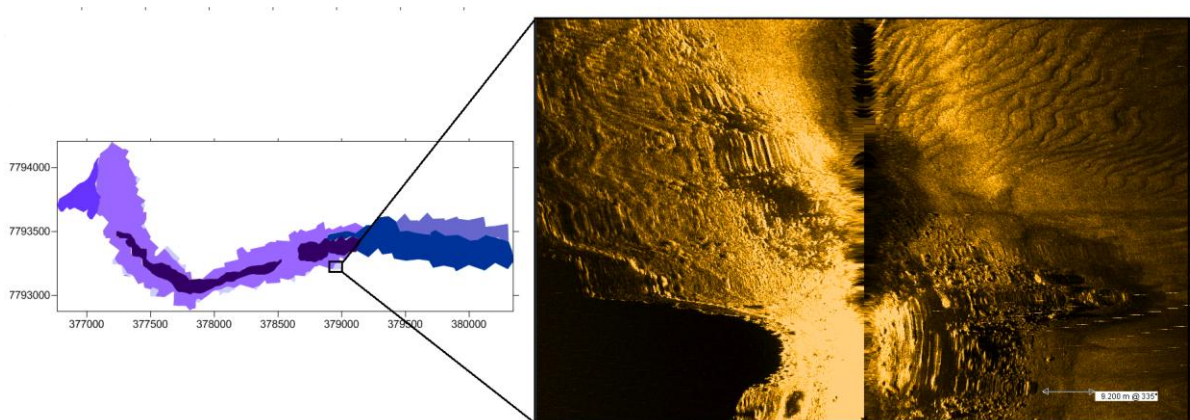


Figura 23: Cascalhos e afloramentos rochosos.

- Plano com ausência de formas de fundo

A região é caracterizada pela ausência de formas de fundo, constituindo uma região plana (Figura 24).

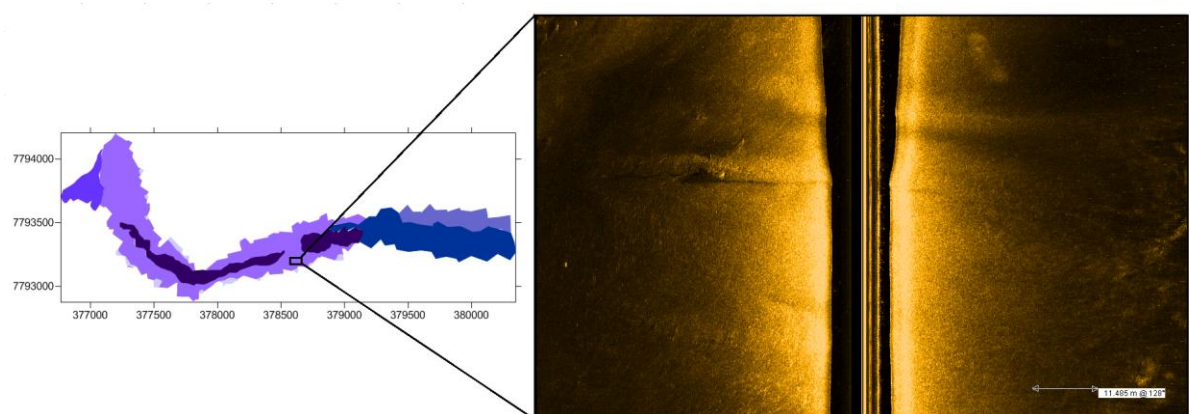


Figura 24: Padrão homogêneo sem presença de formas de fundo.

A ausência de formas de fundo muito provavelmente indica um aumento na velocidade do escoamento de forma a ultrapassar a velocidade de cisalhamento crítica impedindo o assentamento das partículas (transporte em suspensão) (FLEMMING, 2000).

A disposição das regiões com este aspecto permite inferir locais de maior intensidade das correntes. Essa intensificação ocorre, provavelmente, devido ao encontro das águas dos dois rios, e devido à diminuição da profundidade nas laterais do canal (Figura 19).

- Dunas 2-D pequenas a médias

As estruturas sedimentares encontradas no fundo são dunas 2-D pequenas de comprimento médio de 4 m e altura de 20 cm, a dunas 2-D médias com comprimento e altura de 9 m e 40 cm, respectivamente (Figura 25).

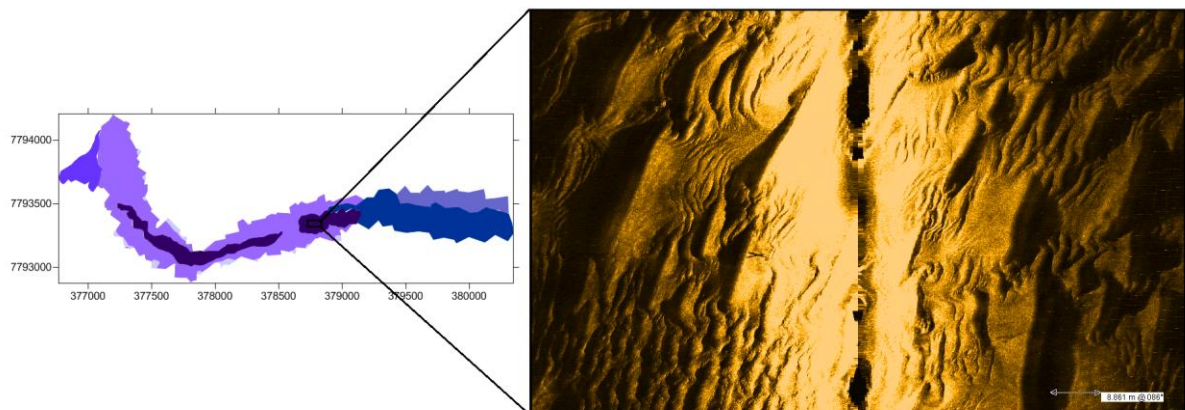


Figura 25: Dunas 2-D pequenas e médias.

É a região onde ocorrem as estruturas com maiores dimensões, dispostas perpendicularmente à direção do fluxo principal no canal, indicando ser a região onde se encontram as melhores condições de profundidade e correntes para o desenvolvimento de dunas subaquosas no canal.

A análise das direções das cristas das dunas e *ripples* próximas a estas permitem observação das diferenças dos padrões de instabilidades das estruturas. A maré no período de amostragem estava iniciando a enchente, ou seja, a direção das correntes no estuário começava a se inverter. As dunas 2-D médias, por possuírem maior estabilidade devido à maior capacidade de estocagem do sedimento, ainda mostravam uma direção de crista voltada para a desembocadura do estuário no sentido das correntes de vazante, ao passo que as *ripples* encontradas próximas a elas, já apresentavam uma direção de crista voltada para o interior do estuário, segundo o sentido das correntes de enchente (Figura 26).

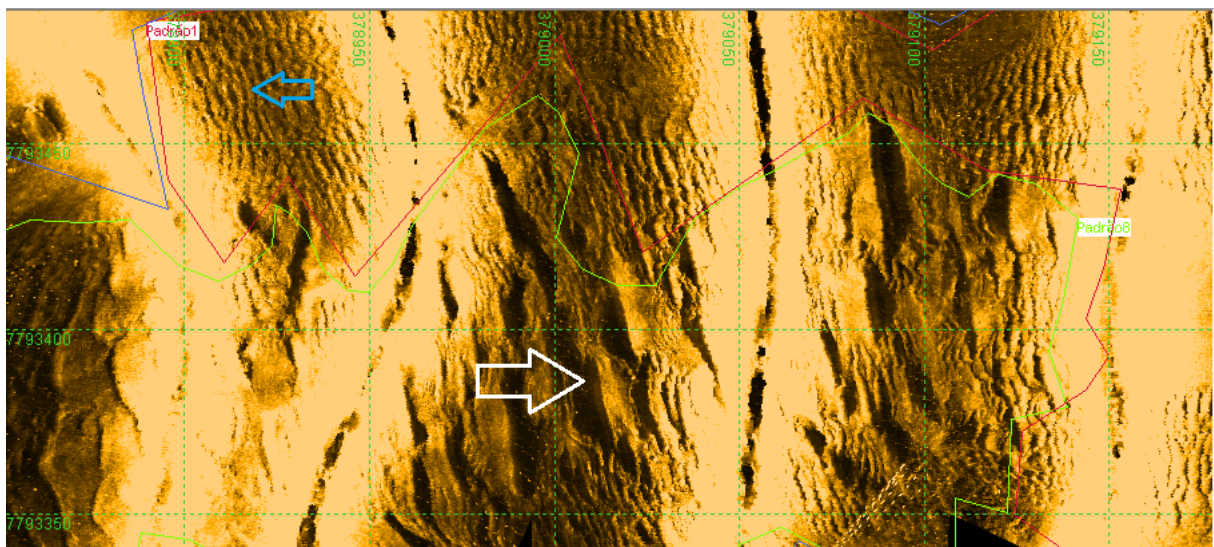


Figura 26: Direção das cristas de dunas e *ripples* indicando a maior estabilidade das estruturas de maior porte durante a reversão no sentido das correntes. A seta branca indica a direção das cristas das dunas 2-D médias voltadas para a desembocadura do estuário, a seta azul, a direção das cristas de *ripples* voltadas para o interior.

- Formas de fundo irregulares

Nesta região são visíveis algumas formas de fundo correspondentes à *ripples*, entretanto, ocorrem muitas feições indistintas provavelmente devido à fração lamosa associada ao local que aumenta a concentração de sedimento na coluna d'água e pode prejudicar a aquisição das imagens (Figura 27).

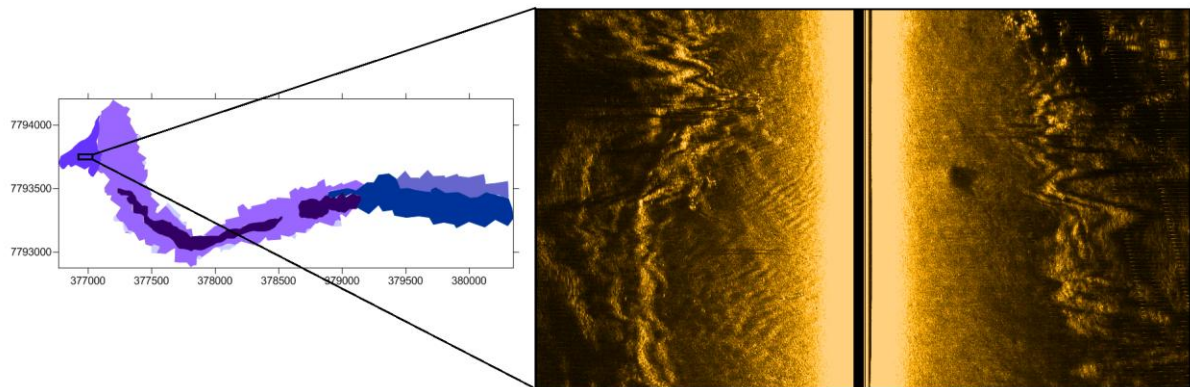


Figura 27: Feições indistintas provavelmente decorrentes da presença da fração lamosa no sedimento.

## 6.2 DINÂMICA SEDIMENTAR

Por meio da utilização do modelo unidimensional de transporte de sedimento Sedtrans05 podem-se calcular as taxas de transporte de sedimento junto ao fundo a quais estão diretamente relacionadas à formação de formas de fundo.

### 6.1.2 Estuário do rio Caravelas (BA)

Os dados de velocidade de corrente para o estuário do rio Caravelas foram adquiridos segundo Pereira (2009) e adquiridos em uma estação fixa com profundidade média de 11 metros (Figura 28). A granulometria assumida foi de areia média (0,5 milímetros de diâmetro).



Figura 28: Local de coleta dos dados hidrodinâmicos utilizados pelo modelo. Fonte: Google.

A relação entre a velocidade da corrente e a taxa de transporte de sedimento junto ao fundo mostrou-se ser direta uma vez que os maiores valores de taxa de transporte foram alcançados nas maiores magnitudes de velocidade (Figura 29). O aumento na taxa de transporte permite ao ambiente a formação de formas de fundo, uma vez que são necessários a mobilização e transporte do sedimento de fundo para a origem de estruturas sedimentares tais como as dunas subaquosas. As menores taxas de transporte ocorreram com as menores intensidades de corrente e, portanto, podemos inferir que a gênese das dunas está associada às correntes de vazante e enchente do estuário.

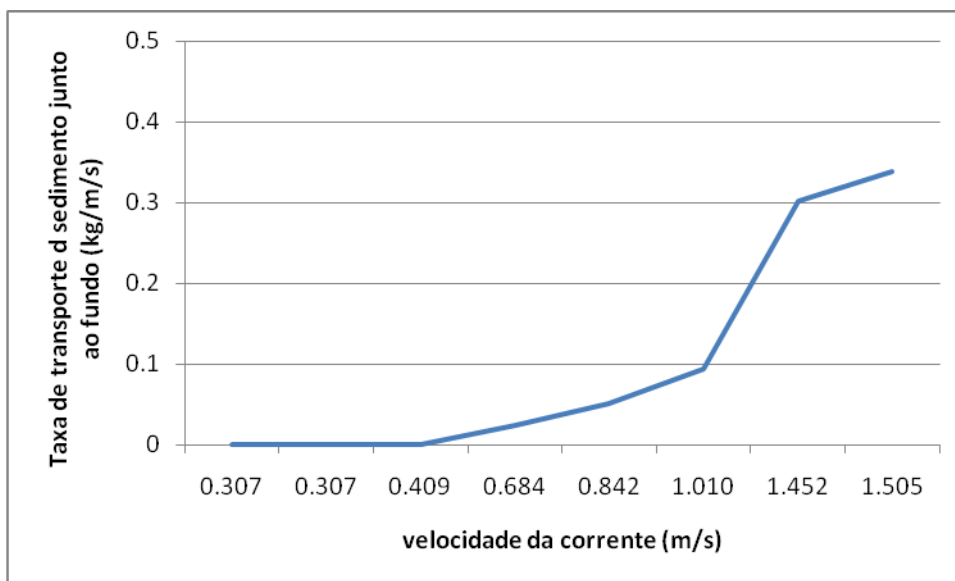


Figura 29: Variação na taxa de transporte de sedimento junto ao fundo com o aumento da velocidade das correntes para o estuário do rio Caravelas.

De acordo com os resultados do modelo as formas de fundo passam a ser originadas a partir de correntes de cerca de 0,6 m/s ao alcançarem uma taxa de transporte em torno de 0,024 kg/m/s. As dimensões das dunas no modelo são dadas por Yalin (1964) e Allen (1970), os quais indicam o comprimento e a altura da estrutura respectivamente. As formas de fundo encontradas de acordo com o modelo foram dunas pequenas com 0,5 metros de comprimento e 0,078 metros de altura.

Os resultados obtidos pelo modelo corroboraram com o observado em campo uma vez que a posição do local de coleta dos dados por Pereira (2009) encontra-se dentro da região caracterizada pela presença de *ripples* e dunas 2- D pequenas que se encaixam na feição resultante do modelo.

### 6.2.2 Estuários dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim (ES)

Os dados utilizados pelo modelo para o estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim foram coletados na porção média da área correspondente à região de estudo onde

ocorre um estreitamento do canal e provável intensificação das correntes através da utilização de um ADP fixo ao barco (*River Surveyor* – SonTek).

A estação de coleta dos dados encontra-se próximo à lateral do canal e possui profundidade de cerca de 5 metros (Figura 30). A granulometria no local de amostragem corresponde à fração areia fina com cerca de 0,1 milímetros de diâmetro.



Figura 30: Local de coleta dos dados hidrodinâmicos utilizados pelo modelo. Fonte: Google.

Mesmo em intervalos de amostragens diferentes, ambos ambientes apresentaram uma relação direta positiva entre a velocidade das correntes e as taxas de transporte de sedimento junto ao fundo (Figura 31).

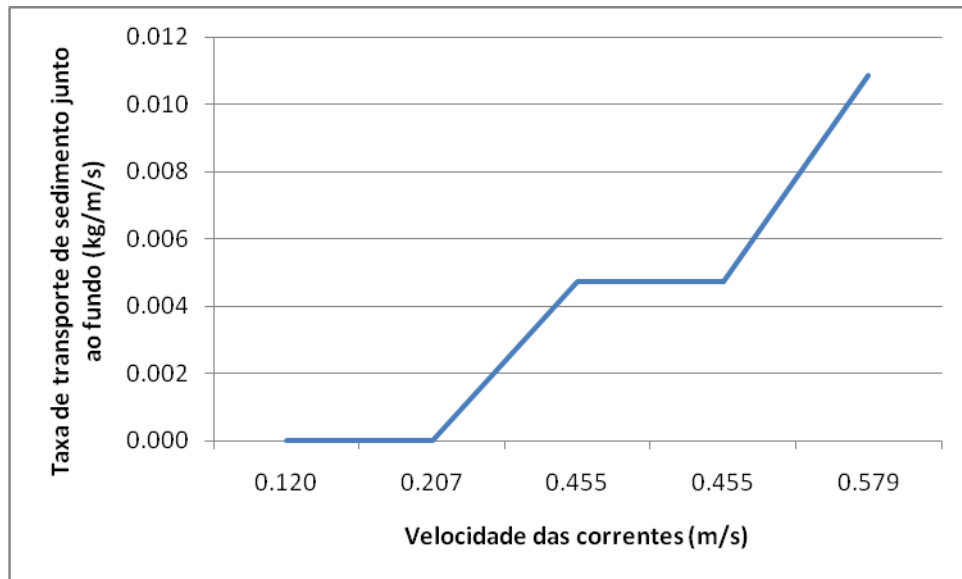


Figura 31: Variação na taxa de transporte de sedimento junto ao fundo com o aumento da velocidade das correntes para o estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim.

No estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim, no entanto, o padrão de formas de fundo originado pelo modelo difere do observado em campo. O modelo gera como resultado formas de fundo correspondentes à *ripples* com 0,1 e 0,011 metros de comprimento e altura, respectivamente, ao passo que as imagens caracterizam um fundo plano com ausência de formas de fundo. Porém, *ripples* são estruturas muito dinâmicas ao longo do ciclo de maré e por isso não constituem um erro significativo no resultado do modelo.

Ainda no mesmo estuário, porém situado no banco arenoso, foi realizado o fundeio de outro correntômetro acústico ADP (*Aquadopp* - Nortek) em que se obteve medições da intensidade e direção resultante das correntes associadas à desembocadura do estuário ao longo de um dia. Por meio da utilização do modelo Sedtrans05 pode-se obter a taxa de transporte de sedimento junto ao fundo (Figura 32).

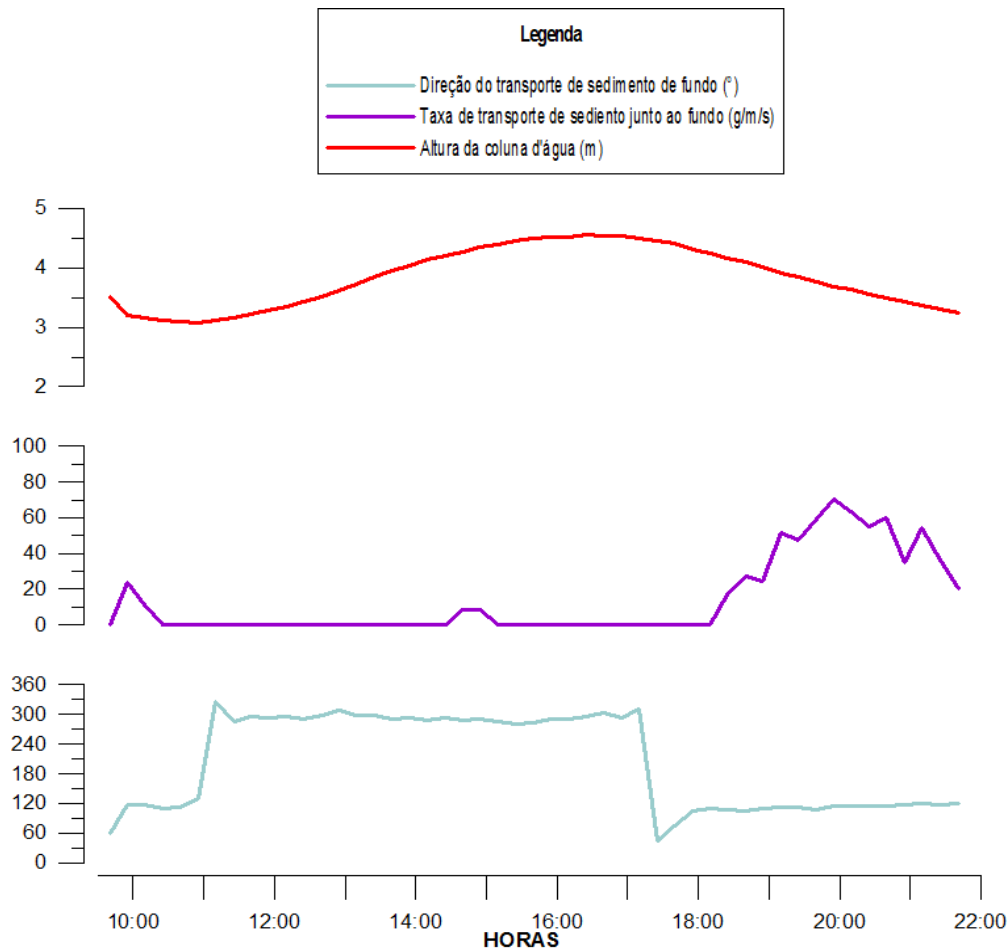


Figura 32: Direção e taxa de transporte de sedimento no fundo ao longo de uma amostragem de cerca de um dia e a variação do nível relativo d'água durante a amostragem.

No decorrer da maré enchente e estufa de maré alta, a direção principal do transporte de sedimento no fundo é voltada para o interior do estuário seguindo as correntes da maré, entretanto, a taxa de transporte não foi significativa nesse momento, alcançando no máximo taxas de 20 g/m/s. A baixa carga de sedimento transportada nesse período pode ser devido ao trapeamento ocasionado pelo encontro das duas massas d'água, fluvial e marinha, em sentidos opostos.

Com o estabelecimento da maré vazante, a direção no transporte de sedimento passa a ser orientada para fora do estuário e começam a ocorrer as maiores taxas de transporte de sedimento, alcançando 70 g/m/s. A análise do gráfico permite-nos aferir que há um transporte preferencial de sedimento de fundo com sentido a saída do estuário, ou seja, em direção a plataforma continental adjacente.

## 7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturas sedimentares como dunas subaquosas e *ripples* possuem influência direta dos padrões de dinâmica sedimentar do ambiente em que se formam e por isso apresentam em seu registro indícios das características dos mesmos. O estudo deste tipo de formas de fundo permite inferir grande parte dos processos envolvidos no ambiente tais como o momento da maré, o transporte líquido de sedimento, regiões de maior erosão/acresção, entre outros.

No estuário do rio Caravelas foi identificado um campo de dunas já observado em outros trabalhos (PIANCA BARROSO, 2009; ANDRADE e DOMINGUEZ, 2002) onde se encontram dunas 2-D médias a grandes sobrepostas de *ripples* que podem caracterizar grande disponibilidade de sedimento não consolidado, provavelmente areia média, suficientes para manter as estruturas. Também foram identificados campos de *ripples* que se desenvolvem provavelmente em regiões de menores profundidades. Em certas regiões dos campos de *ripples* encontramos locais com faixas planas, sem a formação de formas de fundo, que podem se estabelecer devido a um aumento na intensidade das correntes ao longo do ciclo de maré ou a um maior aporte de sedimento. Além das feições naturais foi possível a observação das marcas deixadas pela constante dragagem desenvolvida no canal de navegação do Terminal Marítimo de Navios-Barcaça Luciano Villas Boas Machado, indicando o impacto da atividade no substrato.

Já no estuário do rio Piraquê-açu/Piraquê-mirim As estruturas foram de menor porte provavelmente devido às menores profundidades encontradas, menor aporte sedimentar ou à presença de maiores concentrações de sedimentos coesivos. As formas de fundo de maiores dimensões foram dunas 2-D médias encontradas na porção central do canal onde são encontradas às maiores profundidades e as velocidades das correntes possuem intensidade suficiente para mobilizar e trabalhar o sedimento do fundo. *Ripples* são encontradas por quase todo o registro, mas concentram-se na região do banco arenoso e na porção mais próxima a desembocadura do estuário onde são encontradas profundidades menores. O campo de *ripples* próximo à entrada do estuário se mostra truncadas devido a influência da ação das ondas e as maiores intensidades de correntes em relação às

encontradas sobre o banco. Ladeando o canal principal encontramos uma região onde não há formação de formas de fundo o que provavelmente está associado ao estabelecimento de menores profundidades que também acarretam uma intensificação do fluxo. Sob correntes que ultrapassem a velocidade de cisalhamento crítica do sedimento não há a formação de dunas sobre o leito.

O estuário do rio Caravelas apresenta as maiores estruturas observadas (dunas 2-D grandes) indicando ser o ambiente mais favorável a formação destas formas de fundo, entretanto, essa característica aparece como desvantagem no referido estuário uma vez que prejudica o canal de navegação do terminal de navios-barcaça instalado no local. Já o estuário dos rios Piraquê-açu/Piraquê-mirim apresentam formas de fundo de menor porte o que favorece a navegação no ambiente, entretanto, as menores dimensões das estruturas também indicam uma profundidade reduzida comparada ao canal de Caravelas, sendo assim o estuário capixaba fica restrito a embarcações de pequeno porte.

A delimitação de áreas onde estão presentes campos de dunas subaquosas é importante na instalação de obras navegacionais e na alocação de estruturas junto ao fundo que requerem estabilidade do mesmo. As regiões com presença de dunas nos dois estuários da área de estudo são consideradas de instabilidade por constituírem áreas com movimentação excessiva do sedimento do fundo e, portanto, esse aspecto deve ser levado em consideração mediante qualquer tipo de instalação de estruturas submarinas principalmente dutos de óleo e gás e instalações portuárias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. C. **Distribuição espacial e temporal do ariocó, *Lutjanus synagris* (LINNEUS, 1758), no estuário dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim (ES) e seu crescimento em ambiente estuarino.** Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- ALBINO, J.; VALE, C. C.; GOMES, R. C. **Modelagem, monitoramento, erosão e ocupação costeira: descrição climática do litoral do Espírito Santo.** Vitória: Instituto do Milênio/Recos, 2005.
- ANDRADE, A. C. da S.; DOMINGUEZ, J. M. L. Informações geológico-geomorfológicas como subsídios à análise ambiental: o exemplo da planície costeira de caravelas – Bahia. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 51, p. 9-17, 2002.
- ARACRUZ CELULOSE. **A Aracruz Celulose e a construção do terminal marítimo de navios - barcaça Luciano Villas Boas Machado.** Disponível em: [http://www.aracruz.com.br/show\\_amb.do?act=stcNews&menu=false&id=1316&lang=1](http://www.aracruz.com.br/show_amb.do?act=stcNews&menu=false&id=1316&lang=1). Acesso em: 01 de julho de 2010.
- ASHLEY, G. M. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, n. 1, p. 160-172, 1990.
- AYRES NETO, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.
- BARROSO, G. F. Development of an evaluation framework for sustainable bivalve aquaculture: a strategic plan approach in Espirito Santo, Brazil: Unpublished PhD Thesis (Geography), University of Victoria, Canada, p. 229, 2004.
- BLONDEL, P.; MURTON, B.J. **Handbook of Seafloor Sonar Imagery.** John Wiley & Sons Ltd. p. 314, 1997.
- BROWN, E. *et al.* **Waves, tides and shallow-water processes:** Prepared by an Open University course team. 2nd ed. England: Open University, 2001.

COLLIER, J. S.; BROWN, C. J. Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments. **Marine Geology**, v. 214, p. 431–449, 2005.

CRUZ, U. R. F. **Caracterização da comunidade fitoplanctônica no trecho final dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim, Aracruz-ES**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

CUNHA, K. J. O. **Variações espaciais e temporais da biomassa fitoplanctônica no trecho final dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim, Aracruz - ES**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

D'AGOSTINI, D. P. **Fácies sedimentares associadas ao sistema estuarino da baía de Vitória (ES)**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

DALRYMPLE, R. W. *et al.* Dynamic sand facies models of microtidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada. **Sedimentology**, v. 41, p. 1069-1091, 1990.

DALRYMPLE, R. W.; RHODES, R.N. Estuarine dunes and bars. In: PERILLO, G. M. E. (org.). **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**. Developments in Sedimentology. n. 53, Elsevier Science, 1995. p.359-422.

DIEGUES, A. C.; ROSMAN, P. C. C. **Caracterização dos ativos ambientais em áreas selecionadas da zona costeira brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1998. 136 p. Disponível em: <<http://www.usp.br/nupaub/artigos.html>>. Acesso em: 20 jun. 2010.

DOMINGOS, F. X. V. **Biomarcadores de contaminação ambiental em peixes e ostras de três estuários brasileiros e cinética de derivados solúveis do petróleo em peixes**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Paraná, Brasil, 2006.

DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**. 2nd ed. Chichester: Wiley, 1997.

FLEMMING, B.W. The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. **Marine Sandwaves Dynamics**, Lille, France, 23 & 24 march 2000. p. 55-60.

FISH, J. P.; CARR, H. A. **Sound underwater images: A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data**. Lower Cape Publishing, p. 188. Massachusetts – Orleans. 1990.

GAIGHER, L. **Avaliação das concentrações de fósforo total e nitrogênio total na região estuarina dos rios Piraquê-Açú e Piraquê-Mirim (Aracruz - ES**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

HM Consultoria e projetos de Engenharia Ltda. **Relatório integrado e consolidado dos monitoramentos realizados durante a dragagem do acesso ao canal do Tomba – Caravelas – BA**. Monitoramentos de fevereiro e março de 2007, Volume I/II. Aracruz, junho de 2007.

HM Consultoria e projetos de Engenharia Ltda. **Relatório integrado e consolidado dos monitoramentos realizados durante a dragagem do acesso ao canal do Tomba – Caravelas – BA**. Monitoramentos de fevereiro e março de 2007, Volume II/II. Aracruz, junho de 2007.

HULSCHER, S. J. M. H.; KNAAPEN, M. A. F.; SCHOLL, O. Regeneration of dredged sand waves. **Marine Sandwave Dynamics**, Lille, France - 23 & 24 March 2000. p. 93-95.

HULSCHER, S. J. M. H.; VAN DEN BRINK, G. M. Comparison between predicted and observed sand waves and banks in the North Sea. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n.C5, p. 9327-9338, 2001.

JESUS, H. C.; SANTANA, E. J.; BELO, M. J.; SILVA, L. B.; CEOTTO, C. S.; CASTRO NEVES, D. M.; CASTRO, L. B. **Avaliação da poluição ambiental dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim (Santa Cruz – ES) através da análise de águas, biomonitores e sedimentos**. Relatório Técnico - Projeto Aracruz Celulose. 2009.

KNAAPEN, M. A. F.; HULSCHER, S. J. M. H. Regeneration of sand waves after dredging. **Coastal Engineering**, v. 46, p. 277–289, 2002.

KRÖGEL, F.; FLEMMING, B. W. Evidence for temperature-adjusted sediments distributions in the back-barrier tidal flats of the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). In: ALEXANDE, C. R.; DAVIS, R. A.; HENRY, V. J. (Org.). **Tidalites: Processes and products**. SEPM Special Publication. n. 61, p. 31-34. 1988.

LANGHORNE, D. N. **A study of the dynamics of a marine sandwaves**. International Association of Sedimentologists, v. 82, p. 57-593, 1982.

LANGHORNE, D. N. **Offshore engineering and navigational problems – The relevance of sandwave research**. Institute of Oceanographic Sciences, 1978.

MACIEIRA, R. M. **Aspectos ictiofaunísticos do sistema estuarino dos rios Piraquê-Açú e Piraquê-Mirim, ES**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

MAGRIS, R. A. **Estrutura e dinâmica espaço-temporal das larvas de decapodas no estuário dos rios Piraquê-Açú e Piraquê-Mirim, Aracruz, ES**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

MARTIN, L.; SUGUIO, K; FLEXOR, J. M.; ARCHANJO, J. D. Coastal Quaternary formations of the southern part of the state of Espírito Santo (Brazil). **Academia Brasileira de Ciências**. v. 68, p. 389-404, 1996.

MIRANDA, L. B. **Projeto Institutos do Milênio: Produtividade, sustentabilidade e utilização do ecossistema do banco de Abrolhos (PROABROLHOS)**. Subprojeto: Trabalhos estuarinos. 2009.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Edusp, 2002.

NEUMEIER, U. *et al.* Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments. **Computers & Geosciences**, n. 34, p. 1223-1242, 2008.

NITTROUER, C. A.; WRIGHT, L. D. Transport of Particles Across Continental Shelves. **Reviews of Geophysics**. Nova Iorque: v. 32, n. 1, p. 85-113, 1994.

OLIVEIRA, C. M. S. **Avaliação dos nutrientes no estuário dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim (Aracruz - ES)**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PEREIRA, M. D. **Caracterização sazonal da hidrodinâmica e do transporte de material particulado em suspensão em um estuário dominado por maré: estuário de Caravelas (BA)**. Tese (Mestre em Geociências) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PIANCA BARROSO, C. **Dinâmica de bancos e pontais arenosos associados à desembocadura do estuário de Caravelas, BA**. Dissertação (mestre em ciências). São Paulo, 2009.

PIMENTEL, C. R. **Padrões de utilização do sistema estuarino dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim por juvenis da família Lutjanidae (Teleostei: peciformes)**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

PRITCHARD, D. W. Estuarine Circulation Patterns. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng.**, v. 81, n. 717, p. 1-11, 1955.

SANT'ANNA, R. O. **Variação espacial, sazonal e nictemeral da comunidade ictioplanctônica no estuário dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim (ES-Brasil)**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

SILVA, A. E. DA; MENANDRO, P. S.; QUARESMA, V. DA S.; BASTOS, A. C. **Distribuição sedimentar do estuário Piraquê-açu, Aracruz – ES**. III Seminário de Geoquímica Ambiental Niterói - RJ, 2010.

SILVA, C. G. et al. Ambientes de sedimentação costeira e processos morfodinâmicos atuantes na linha de costa. In: BAPTISTA NETO, J. A.; PONZI, V. R.

A.; SICHEL, S. E. B (Org.). **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 175-218.

STRASSER, M. A. **Estudo da geometria das formas de fundo no curso médio do rio Amazonas**. Tese (Mestre em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

YALIN, M.S. On the formation mechanism of dunes and ripples. **Euromech. Collep. Proc.**, n. 261, 1987.