

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR POR CARGA DE FUNDO  
NA DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ, PR**

PONTAL DO PARANÁ

DEZEMBRO / 2014

DANILO MILDEMBERGER DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR POR CARGA DE FUNDO  
NA DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ, PR**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, do curso de graduação em Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Renato Lamour

PONTAL DO PARANÁ

DEZEMBRO / 2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE:  
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar  
Liliam Maria Orquiza - CRB-9/712

O48c Oliveira, Danilo Mildemberger de  
Caracterização do transporte sedimentar por carga de fundo na desembocadura sul do  
Complexo Estuarino de Paranaguá, PR. / Danilo Mildemberger de Oliveira. – Pontal do  
Paraná, 2014.  
46 f.; 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Renato Lamour.

Monografia (graduação) - Curso de Oceanografia, Centro de Estudos do Mar,  
Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

1. Dinâmica costeira. 2. Corrente de maré. 3. Sedimentologia. I. Título. II. Lamour,  
Marcelo Renato. III. Universidade Federal do Paraná.

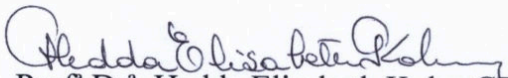
CDD 551.354

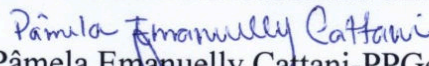
## TERMO DE APROVAÇÃO

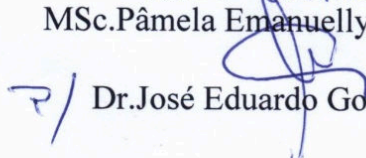
**Danilo Mildemberger de Oliveira**


**“Caracterização do transporte sedimentar por carga de fundo na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá, Pr”**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

  
Prof.<sup>ª</sup> Dr.<sup>ª</sup>. Hedda Elisabeth Kolm-CEM/UFPR

  
MSc. Pâmela Emanuelly Cattani-PPGeo/UFPR

  
r/ Dr. José Eduardo Gonçalves-SIMEPAR

  
Prof. Dr. Marcelo Renato Lamour-CEM/UFPR  
Presidente

Pontal do Paraná, 17 de dezembro de 2014

## RESUMO

Partículas sedimentares entram em movimento quando o atrito gerado pelas correntes sobre o leito excede a força gravitacional responsável pela manutenção do repouso dos grãos sedimentares. Nesse sentido, os sedimentos movimentados por essa mecânica apresentam uma dinâmica bastante complexa, que é responsável, em ambientes estuarinos, pela exportação/importação de partículas que regem a posição da costa e controlam as modificações da batimetria. O objetivo deste trabalho foi estimar a capacidade de transporte de sedimentos por carga de fundo em uma seção transversal da desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), a partir de dados hidrodinâmicos e sedimentológicos, a fim de auxiliar nos estudos de dinâmica costeira da região. Os dados de correntes foram obtidos com um equipamento ADP, em ciclos de maré de sizígia e quadratura. Estes dados, somados às cartas batimétricas, possibilitaram a segmentação da seção em três setores: Ponta do Poço (PP; -24m), Canal Navegável (CN; -15m) e Ilha do Mel (IM; -7m). As taxas de transporte sedimentar efetivas foram obtidas através de submersão de armadilha de sedimentos (Helley-Smith), que foi fundeada em cada um dos setores distribuídos ao longo da seção, durante as marés de quadratura e de sizígia. A partir dos dados de correntes e de batimetria, foram calculadas as taxas teóricas de transporte para cada setor analisado, de acordo com equações descritas na literatura. Estas taxas foram comparadas aos resultados obtidos em trabalho prévio na mesma área de estudo, a fim de validar os resultados e encontrar incoerências. As equações se mostraram representativas apenas durante o período de maré vazante, enquanto durante a enchente, as taxas foram subestimadas em relação ao transporte efetivo. As formas de fundo estimadas variaram de acordo com a profundidade da seção, com as maiores feições determinadas para áreas mais profundas. Com exceção do setor IM, que apresentou taxas maiores, as taxas teóricas e efetivas encontradas neste trabalho foram comparáveis aos resultados prévios. Ambos trabalhos verificaram a predominância de exportação de material pela desembocadura, entretanto, a área fonte deste material não foi identificada, sendo necessário levantamentos da geomorfologia da desembocadura e suas áreas adjacentes.

Palavras-chave: Dinâmica costeira; Corrente de maré; Sedimentologia

## ABSTRACT

Sedimentary particles start moving when the current friction on the bed exceeds the gravitational force that keeps the grain stationary. In this way, the grains transported by that mechanism show a complex dynamic, which is responsible, at estuarine environments, for export/import particles which affects the coast position and control bathymetric variations. The aim of this work was to estimate the sediment transport capacity by bedload at the south mouth of Paranaguá Estuarine Complex, from hydrodynamic and sedimentological data, in order to contribute to coastal dynamics studies of that area. The current data were obtained with an ADP equipment, during spring and neap tides. Those data, added to the nautical charts, enabled the cross section in three sectors: Ponta do Poço (PP; -24m), Navigable Channel (CN; -15m) and Mel Island (IM; -7m). The effective bedload transport rates were obtained from submersion of a sediment sampler (Helley-Smith) in each of the three sectors, during neap and spring tides. With the current and bathymetrical data, the theoretical rates were estimated for each sector, following the equations described in the literature. The effective and theoretical rates were compared to results obtained in previous work at the same study area, aimed to validate the results and find incoherencies. The theoretical transport rates were significant only during ebb tides, while flood tides, the rates were underestimated when it were compared to effective transport. The estimated bedloads vary according to depth, with bigger forms at the deepest areas. Excepted the IM sector, the theoretical and effective rates obtained by this work were comparable with previous results. Both studies found a predominance of particle export out of the estuary, however, the source of the exported particles is not known, being necessary geomorphological studies of the studied area and adjacent areas to satisfy that question.

Palavras-chave: Coastal dynamics; Tide currents; Sedimentology

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -Visão geral do CEP (a) com enfoque nas desembocaduras Sul e Norte e localização da seção transversal analisada (b).....	11
FIGURA 2 - Malha amostral de sedimentos de fundo .....	23
FIGURA 3 - Perfil batimétrico com separação dos setores e comportamento hidrodinâmico durante maré de sizígia (enchente [a] e vazante [b]) e quadratura (enchente [c] e vazante [d]).....	27
FIGURA 4 - Mapa de distribuição dos valores de diâmetro médio dos sedimentos de fundo da desembocadura sul do CEP. Af - Areia Fina; Am - Areia Média	29
FIGURA 5 - Mapa de distribuição do grau de seleção dos sedimentos de fundo da desembocadura sul do CEP .....	30
FIGURA 6 - Mapa de distribuição da concentração de carbonatos (CO <sub>3</sub> ) nos sedimentos de fundo da desembocadura sul do CEP .....	31
FIGURA 7 - Mapa de distribuição da concentração de matéria orgânica (MO) nos sedimentos de fundo da desembocadura sul do CEP.....	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Velocidade média por setor ( $\text{cm.s}^{-1}$ ) e taxas de transporte sedimentar efetivas e teóricas ( $*10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) durante marés de quadratura e sizígia .....	36
TABELA 2 - Estimativa das feições de fundo de acordo com o método de Van Rijn (1984) .....	39

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$ - Parâmetro de <i>Shields</i>	Re - Número de Reynolds
$\theta^*$ - Parâmetro de <i>Shields</i> crítico	s - Razão de densidades ( $\rho_s/\rho$ )
C - Comprimento da boca do amostrador	$\tau_c$ - Estresse por correntes
D* - Diâmetro adimensional do grão	$\tau_0$ - Tensão de cisalhamento sobre o leito
$d_{50}$ - Diâmetro mediano do grão	$\tau_{cr}$ - Estresse crítico por correntes
Fr - Número de Froude	T - Tempo de submersão do amostrador
$f_{silt}$ - fator síltico ( $6,2 \times 10^{-5} / d_{50}$ )	$T_s - (\tau_{0s} - \tau_{cr}/\tau_{cr})$
g - Aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ )	$u_*^2$ - Velocidade de cisalhamento
h - Profundidade da coluna d'água	U - Velocidade média do fluxo
$k_s$ - Rugosidade associada ao tamanho do grão	$V_c$ - Coeficiente de viscosidade cinemática
$\rho$ - Densidade da água	$\Delta_s$ - Altura da feição
$\rho_s$ - Densidade do sedimento	$\lambda_s$ - Comprimento da feição
P - Peso do material capturado	$z_0$ - Rugosidade associada a velocidade do perfil
$q_b$ - Taxa de transporte por carga de fundo	

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.1. ÁREA DE ESTUDO .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	13
2.1. OBJETIVO GERAL .....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
3.1. ESTUÁRIOS .....	14
3.2. TIPOS DE FLUXO .....	15
3.3. PARÂMETROS DE TRANSPORTE .....	16
3.4. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	17
3.5. ESTIMATIVA DE TRANSPORTE .....	18
3.6. FORMAS DE FUNDO .....	19
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
<b>5. RESULTADOS</b> .....	26
5.1. HIDRODINÂMICA.....	26
5.2. SEDIMENTOS DE FUNDO.....	27
5.3. TRANSPORTE EFETIVO .....	33
5.4. TRANSPORTE TEÓRICO .....	34
5.5. COMPARAÇÃO 2012 X 2014.....	36
5.6. ESTIMATIVA DAS FORMAS DE FUNDO .....	38
<b>6. DISCUSSÃO &amp; CONCLUSÕES</b> .....	40
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos em estuários é responsável pela alteração da batimetria, formação e migração de formas de fundo, como dunas e ondas de areia e alteração no posicionamento da linha de costa, sendo assim, desempenha importante função em vários aspectos da engenharia estuarina, costeira e oceânica. Devido a alta produtividade biológica dos estuários, e de suas águas abrigadas que proporcionam a navegação com segurança, estes ambientes apresentam elevado potencial econômico, fato que ocasiona uma alta concentração urbana em suas margens (Miranda, 2000; Van Rijn, 2007).

Impactos antropogênicos nos estuários vêm crescendo exponencialmente desde o final do Século XIX, devido ao intenso avanço tecnológico ocasionado pela revolução industrial. Com a possibilidade da indústria naval desenvolver navios cada vez maiores fez com que os portos se adaptassem para receber estas embarcações, sendo comum a dragagem de sedimentos para aprofundamento dos canais de acesso. Modificações significativas são feitas também nos rios que descarregam nos estuários, sendo a construção de barragens a mais comum. Estas alterações dão origem a uma série de impactos ambientais na zona costeira, como mudança nas características geomorfológicas, físicas, químicas e biológicas do ambiente. Portanto, para uma gestão eficiente e sustentável dos estuários, faz-se necessário o conhecimento dos padrões associados ao movimento dos sedimentos, a fim de harmonizar o desenvolvimento com as tendências naturais e mitigar os riscos relacionados, tais como inundações ou assoreamento dos canais de navegação (Perillo *et al.*, 2005; Prandle, 2009).

Partículas sedimentares entram em movimento quando a força exercida pela corrente sobre o leito excede a força gravitacional que mantém o grão em repouso. Conforme a velocidade do fluido aumenta, este exerce uma força - ou estresse - sobre as partículas suficiente para removê-las do fundo e entrarem em movimento. Este estágio é conhecido como o limiar de movimento, ou como o estágio crítico de erosão ou arraste. Uma vez que o limiar de movimento é excedido, os grãos movem-se, basicamente, de quatro maneiras: rolamento, arraste, saltação e suspensão, sendo que as três primeiras caracterizam a carga de fundo, e a última a carga em suspensão (Van Rijn, 1984). Em leitos com maiores graus de declividade, a gravidade também atua no transporte de sedimentos (Komar, 1976; Van Rijn, 1984).

Em meio aquoso, o transporte de sedimentos varia conforme a hidrodinâmica, granulometria e batimetria da área de estudo. Quanto mais intenso for o comportamento das correntes exercidas sobre o fundo, maior será a competência desta corrente para movimentar as partículas. Por outro lado, o aumento da granulometria em grãos não-coesivos e a redução da granulometria para partículas com propriedades coesivas aumentam a resistência destas partículas ao transporte. A redução da batimetria aumenta o número de fatores que atuam no transporte sedimentar, como o transporte por ondas e o efeito do vento sobre as águas superficiais (Van Rijn, 2007).

A estimativa teórica do transporte sedimentar vem sendo aprimorada por diversos autores nas últimas décadas. Soulsby (1997) realizou um levantamento com as principais equações presentes na literatura como forma de estabelecer as melhores para cada condição da área estudada. No geral, a maior parte das equações leva em consideração as forçantes hidrodinâmicas associadas ao transporte (correntes, ondas ou uma combinação de ambas), e às características sedimentares e batimétricas da região (Souza, 2012). A aplicação de taxas teóricas na predição do transporte sedimentar é de grande ajuda no melhor conhecimento da dinâmica costeira, visto que é possível caracterizar áreas de estudo maiores, sem a necessidade de um elevado número de levantamentos *in situ*, que demandam maior esforço e elevado gasto financeiro. Entretanto, a correta aplicação das equações está condicionada ao levantamento de uma extensa série de dados para uma correta calibração e validação das equações.

Souza (2012) aplicou as formulações apresentadas por Soulsby (1997) na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), de forma a determinar as mais representativas para a área. Pioneiro para a região do CEP, o trabalho desenvolvido por Souza (2012) utilizou conjunto de dados hidrodinâmicos obtidos em uma seção transversal da desembocadura sul do CEP em 2008, somados à dados de transporte efetivos mensurados no ano de 2012. A diferença entre quatro anos entre as amostragens foi verificada como um ponto negativo no trabalho deste autor, visto que o ambiente de desembocadura é altamente dinâmico, e suas configurações de fundo podem ter sido alteradas consideravelmente durante este tempo, afetando na dinâmica sedimentar da região. Visando satisfazer estas incoerências, o presente trabalho foi realizado na mesma área estudada por Souza, entretanto, com conjunto de dados mais contemporâneos, com o objetivo de

caracterizar o transporte sedimentar com maior acurácia e comparar com os dados mensurados no trabalho de 2012.

### 1.1. ÁREA DE ESTUDO

O Complexo Estuarino de Paranaguá (Figura 1; 25° 30' S / 48° 25' W) possui 46 km de comprimento em seu eixo E-W, com 10 km de largura máxima. A profundidade média é de 5,4 m, com um volume total de água de  $14 \times 10^9 \text{ m}^3$  e tempo de residência de 3,5 dias. A conexão com o mar é realizada através de duas desembocaduras (Sul e Norte) que apresentam comportamentos hidrodinâmicos distintos. O CEP é classificado como parcialmente misturado do tipo B, com regime de marés semi-diurna (duas preamares e duas baixa-mares por dia) tendo sido verificadas heterogeneidades laterais e estrutura da coluna d'água essencialmente homogênea, com exceção em períodos de início de maré enchente, quando nota-se duas camadas de densidades diferentes bem marcadas (Marone *et al.*, 1997; Bigarella, 2001). Angulo (1992) classificou o estuário, geomorfologicamente, como de planície costeira, com presença de deltas de maré vazante na região externa da desembocadura. Na porção interna Angulo (1999) identificou um hemi-delta de maré enchente disposto junto a face oriental da Ilha do Mel, na região do Saco do Limoeiro.

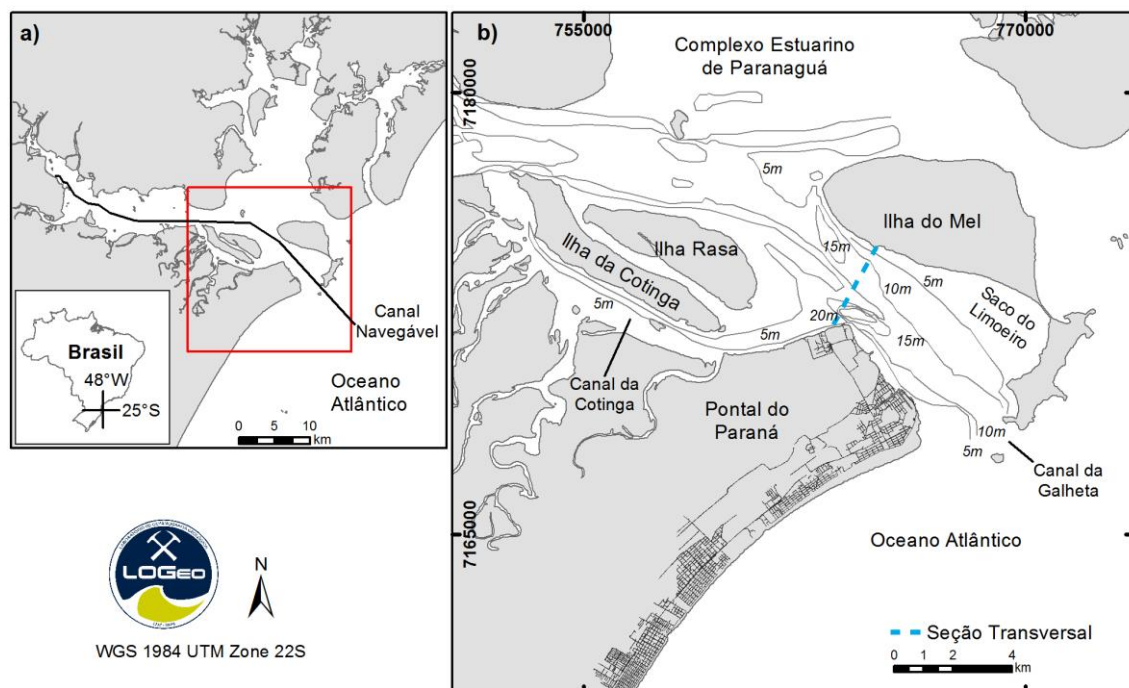


FIGURA 1 - VISÃO GERAL DO CEP (A) COM ENFOQUE NAS DESEMBOCADURAS SUL E NORTE E LOCALIZAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL ANALISADA (B)

A desembocadura sul tem como limites continentais as praias do município de Pontal do Paraná e da Ilha do Mel. Na região central da desembocadura está localizado o canal navegável que serve de acesso para os navios aos portos de Paranaguá e Antonina. Nas últimas décadas, este canal utilizado pelas embarcações vem sendo submetido à sucessivas obras de dragagem para aprofundamento e manutenção da segurança da navegação (Lamour & Soares, 2007). A hidrodinâmica da desembocadura sul é influenciada, basicamente, pela descarga dos rios, energia das marés e por ondas, com descarga de água doce pelos rios do eixo E-W estimada em  $41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  durante o inverno e  $182 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  no verão (Mantovanelli, 1999). A amplitude média das marés varia entre 1,3 m durante o período de quadratura e 1,7 m nas marés de sizígia (Marone & Jamiyanaa, 1997). As maiores velocidades de corrente atingem  $0,80 - 0,85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na enchente e  $1,0 - 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  na vazante (FUNPAR, 1997). As ondas, predominantemente de SE, possuem altura média de 0,5 m, com períodos de 3 - 7 s, podendo chegar a alturas de 2 - 3 m durante eventos extremos (Lana *et al.*, 2001).

Os sedimentos da região são caracterizados por areias finas, gradando para médias na porção mais externa da desembocadura, com grau de seleção variando de moderadamente a bem-selecionadas. A concentração de matéria orgânica e carbonatos não ultrapassa os 5%, enquanto a concentração de finos não passa dos 10% (Lamour, *et al.*, 2004).

As feições de fundo da desembocadura sul do CEP foram indentificadas por Lamour (2007), tendo identificado a presença de dunas subaquosas na porção média entre a Ilha do Mel e a Ponta do Poço, com ondulações sinuosas de grande porte, e comprimento de onda variando de 5 - 15 m para 20 - 30 m, conforme a profundidade aumenta de 5 para 15 m, de NW para S. Na região da Ponta do Poço, próximo a desembocadura do canal da Cotinga, este mesmo autor identificou ondulações sinuosas de médio porte, com comprimento de onda em torno de 8 m. Ondas de areia foram identificadas na margem E da Ponta do Poço, sendo caracterizadas por cristas assimétricas retilíneas de grande porte, espaçadas em 25 - 70m. Em todos os perfis analisados por Lamour (2007), foi identificada a predominância de transporte de sedimentos por correntes de vazante em relação às correntes de enchente.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. *Objetivo Geral*

- Caracterizar o transporte sedimentar por carga de fundo na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá, PR

### 2.2. *Objetivos Específicos*

- Avaliar a capacidade de formação de formas de fundo na desembocadura sul do CEP, procurando detectar intensidades de transporte residual na área de estudo, e
- Estimar taxas teóricas e quantificar o transporte efetivo por carga de fundo, avaliando as principais mudanças ocorridas ao longo do tempo pela comparação com dados anteriores.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### - *Estuários*

Estuários são ambientes de transição entre oceano e continente, onde a água doce do rio e a água salina dos oceanos misturam-se, e atuam como principal fonte de sedimentos terrígenos para a plataforma continental e como fonte ou sumidouro de poluentes (Prandle, 2009). Pritchard (1967) define estuário como um corpo de água costeiro semifechado, com livre ligação com o oceano aberto, e com água marinha mensuravelmente diluída no seu interior pela água doce fornecida pela drenagem fluvial. Do ponto de vista sedimentológico, Dalrymple *et al.* (1992) definem estuário como um sistema de vale afogado, com conexão com o mar, que recebe sedimentos de ambas as fontes (fluviais e marinhas), e que contém fácies influenciadas pela maré, ondas e processos fluviais. Perillo (1995) realizou uma ampla revisão sobre as definições de estuário, e propôs uma nova definição, buscando abranger aspectos geomorfológicos, físicos, químicos e biológicos. Para este autor, estuário é definido como um corpo de água semifechado que se estende até o limite da influência da maré, que aporta água salgada para o estuário através de uma ou mais entradas abertas ao oceano, e esta água é significativamente diluída com água doce oriunda da drenagem continental, sendo habitat de organismos eurialinos durante uma parte ou todo o seu ciclo de vida. Este trabalho irá utilizar a definição de estuário proposta por Perillo (1995) como base, uma vez que esta se mostra a mais completa disponível na literatura.

Os estuários predominantes na costa brasileira são denominados de planície costeira, e se formaram durante a transgressão do nível relativo do mar ao longo do Período Quaternário (Pleistoceno e Holoceno), que inundou os vales dos rios. O processo de inundação foi muito mais acentuado do que o de sedimentação e a topografia atual tornou-se muito semelhante ao vale do rio. Esses estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade. A área da seção transversal em geral aumenta estuário abaixo, às vezes de forma exponencial, e a configuração geométrica da seção transversal tem a forma de “V”. Devido ao processo recente de sedimentação, o fundo é preenchido com sedimentos finos (argilas e siltes) na sua parte superior, que se tornam mais grossos (areias) em direção à entrada do estuário (Miranda, 2002).

Os sedimentos presentes nos estuários podem ser de origem fluvial e marinha, podendo haver contribuição significativa de partículas biogênicas, originadas por organismos vivendo dentro do estuário. No geral, o estuário pode ser dividido em três zonas, de acordo com o processo dominante no transporte sedimentar (Dalrymple et al., 1992). A zona de desembocadura é dominada por processos marinhos, com as ondas e correntes de maré transportando areias marinhas para dentro do estuário. A zona central do estuário é caracterizada por baixa energia de correntes, o que faz com que partículas finas, como siltes e argilas, predominem nesta região. A área próxima à cabeceira do estuário é predominada por sedimentos fluviais, que se depositam logo após a desembocadura dos rios no estuário, devido à perda de energia das correntes (Bokuniewicz, 1995).

#### *- Tipos de Fluxo*

O tipo de fluxo é determinado pela velocidade de deslocamento do fluido, sendo caracterizado por fluxo laminar e turbulento. No fluxo laminar, as partículas movem-se em camadas sub-paralelas, conhecidas como linhas de corrente. Já no fluxo turbulento, as partículas movem-se de maneira aleatória e imprevisível. Os fluxos turbulentos são agentes de erosão e transporte mais eficientes do que fluxos laminares, sendo necessário a turbulência gerada pelo fluxo para o início do movimento das partículas. As condições hidráulicas do fluido e o transporte de sedimentos associados a este fluxo são descrita através de duas equações: os números de Reynolds e Froude (Dyer, 1986).

A transição do regime de movimento laminar para turbulento de um líquido num duto depende de uma quantidade física adimensional igual ao produto da velocidade média ( $U$ ) do movimento pelo diâmetro, dividido pelo coeficiente de viscosidade cinemática ( $\nu_c$ ). Essa quantidade passou a ser conhecida por número de Reynolds ( $Re$ ), mostrando-se muito importante para correlacionar dados experimentais, uma vez que teoricamente ela compara a importância relativa das forças de inércia e viscosa sobre o movimento. Pesquisas em canais amplos com superfície livre demonstraram que esse número, com o diâmetro substituído pela profundidade ( $H_0$ ), pode ser igualmente usado para prever o regime de movimento de líquidos de densidade uniforme (Miranda, 2002), passando a ser definido por:

$$Re = \frac{Uh}{V_c}$$

Quando  $Re < 2 \times 10^3$  o regime de movimento é laminar, mas quando esse número é da ordem de  $10^5$  ou maior, o movimento é totalmente turbulento e a mistura é intensificada. A intensidade da mistura em estuários também depende da estabilidade vertical na interface das camadas em movimento, e a turbulência pode ser gerada por diversos fatores, como a influência dos contornos sólidos, o cisalhamento vertical da velocidade, a tensão de cisalhamento do vento e ondas de gravidade superficiais e internas (Dyer, 1997; Miranda, 2002).

O número de Froude (Fr) é um parâmetro adimensional que relaciona a velocidade do fluxo com a taxa na qual uma onda é transmitida através da água. De uma forma simplificada, pode ser representado como:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gD}}$$

Para  $Fr < 1$ , o fluxo é calmo ou subcrítico e está associado a profundidades maiores, enquanto que para  $Fr > 1$ , o fluxo é agitado ou supercrítico, e presente em seções mais rasas (Dyer, 1986).

#### - Parâmetros de Transporte

Os efeitos das forças hidrodinâmicas na dinâmica sedimentar iniciam através da fricção exercida pelas correntes ou ondas sobre o leito. Esta fricção é expressa como tensão de cisalhamento sobre o leito ( $\tau_0$ ), que é a força friccional exercida pelo fluxo por unidade de área sobre o fundo (Soulsby, 1997), e representada através da seguinte formulação:

$$\tau_0 = \rho u_*^2$$

Para muitos propósitos, uma forma adimensional da tensão de cisalhamento foi proposta por Shields (1936), sendo denominada parâmetro de Shields ( $\theta$ ), e definida por:

$$\theta = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d} \quad \text{OU} \quad \theta = \frac{u_*^2}{g(s-1)d}$$

O parâmetro de Shields serve para medir as condições de resistência ao movimento da partícula no leito, caracterizando o seu grau de estabilidade para uma determinada condição hidráulica. Como resultado do seu estudo, Shields obteve um diagrama que expressa a relação funcional entre os parâmetros  $\theta^*$  e  $Re^*$ . O início do movimento da partícula é, assim, resultado da ação de fatores relacionados entre si: propriedades do sedimento, da água e nível de turbulência do fluxo (Moreira e Marin, 1998).

O estresse gerado sobre o leito depende não apenas da velocidade do fluxo, mas também pela rugosidade do fundo, que pode ser relacionada ao tamanho do grão ( $K_0$ ) ou derivada da velocidade do perfil ( $Z_0$ ). A relação entre estes dois parâmetros se dá da seguinte forma:

$$z_0 = k_s/30 ; k_s = 30z_0$$

#### - *Transporte de Sedimentos*

O transporte de partículas sedimentares por um fluxo de água pode ser realizado na forma de carga de fundo e carga por suspensão, dependendo do tamanho dos grãos e das condições do fluxo. A carga em suspensão também pode conter carga por lavagem, que é definida como uma porção da carga em suspensão que é governada pela taxa de suprimento a montante, e não pela composição e propriedades do material de fundo. Quando o valor do estresse exercido sobre o fundo excede o valor crítico para o início do movimento, as partículas entram em movimento por rolamento e/ou arrasto, em contato contínuo com o leito. Com o aumento da velocidade, as partículas começam a se deslocar através de saltos, constituindo o transporte por saltação. A partir do momento em que a velocidade do fluxo supera a velocidade de queda das partículas, estas são transportadas por suspensão (Van Rijn, 1984).

Bagnold (1966 *apud* Van Rijn, 1984) define o transporte por carga de fundo como aquele em que o sucessivo contato das partículas com o leito é estritamente limitado pelo efeito da gravidade, enquanto a carga em suspensão é definida como aquela na qual o excesso de peso das partículas é suportado por uma sucessão aleatória de impulsos ascendentes transmitidas por vórtices turbulentos. Einstein

(1950 *apud* Van Rijn, 1984), por outro lado, define carga de fundo como o transporte de partículas sedimentares em uma fina camada, correspondente a duas vezes o diâmetro da partícula acima do leito, que movimentam-se por arraste, rolamento e, algumas vezes, por saltos com uma distância longitudinal pequena. Para este mesmo autor, o movimento das partículas através de saltos maiores é considerado como transporte por suspensão, uma vez que a distância do salto destas partículas é consideravelmente maior do que o esperado por ele. Van-Rijn (1984) assume a classificação proposta por Bagnold (1966), no qual o movimento das partículas por carga de fundo é governado pelas forças gravitacionais, considerando os efeitos da turbulência pouco significativos na trajetória dos grãos.

#### *- Estimativa de Transporte*

A taxa de transporte sedimentar é definida como a quantidade de sedimentos por unidade de tempo passando por um plano vertical paralelo à direção do fluxo. A quantidade de sedimentos pode ser mensurada por massa ou volume ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  ou  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ). As taxas de transporte sedimentar são influenciadas por inúmeras variáveis que atuam sobre o movimento dos grãos, e um grande número de equações teóricas para estimar estas taxas vêm sendo propostas nas últimas décadas, muitas destas baseadas em estudos realizados em modelos reduzidos de canais (Leeder, 1982; Soulsby, 1997).

Souza (2012) realizou a caracterização do transporte sedimentar por carga de fundo e suspensão, na mesma desembocadura analisada neste trabalho. O autor realizou correlação estatística de nove equações de transporte com os dados de transporte efetivo. A aplicação de uma regressão do tipo II determinou as equações de Meyer-Peter & Müller (MM; 1948) e de Van-Rijn (VR; 1984, 2007) como as mais representativas, apresentando coeficiente de correlação ( $R^2$ ) igual a 0,39 e 0,36, respectivamente. Ainda neste trabalho, foi determinado para a área de estudo predominância do transporte durante a maré vazante ( $170 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ) em relação a enchente ( $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ), classificando a desembocadura como exportadora de sedimentos, gerando um transporte residual de sedimentos para fora do estuário na ordem de  $10^2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ .

As equações utilizadas neste trabalho foram as duas determinadas por Souza (2012) como mais representativas para a área de estudo:

$$\phi = 8(\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad (\text{MM; Meyer-Peter \& Müller, 1948})$$

Sendo o resultado desta apresentado em taxa adimensional, e convertida para transporte por carga de fundo pela seguinte relação:

$$\phi = \frac{q_b}{[g(s-1)d_{50}^3]^{1/2}}$$

$$q_b = 0,5\rho_s f_{silt} d_{50} D_*^{-0,3} (\tau_c/\rho)^{0,5} (\tau_c \tau_{cr}/\tau_{cr}) \quad (\text{VR; Van-Rijn, 2007})$$

Como forma de validação das equações teóricas, Helley & Smith (1971) desenvolveram um amostrador, tipo armadilha de sedimentos, para capturar partículas transportadas por carga de fundo. Segundo Emmet (1980), o amostrador Helley-Smith é indicado para fluxos com velocidades que não excedem 3 m.s<sup>-1</sup> e partículas entre 2 a 10 mm. A armadilha utilizada possui uma boca com 9 cm de comprimento e estrutura que se adapta conforme a direção da corrente. O material é armazenado em um ensacador com abertura de malha de 63 µm. A taxa instantânea de transporte é obtida através da aplicação da seguinte relação:

$$q_b = \frac{P}{C * T}$$

#### - Formas de Fundo

Uma característica marcante do transporte de sedimentos em leitos não-coesivos é o desenvolvimento de formas geométricas ou elementos em uma escala muito maior do que o próprio grão. Quando as forças hidrodinâmicas que atuam sobre o leito do escoamento são suficientemente fortes para mover as partículas sedimentares, identificam-se perturbações na superfície do leito, visualizadas como pequenas ondas, que refletem o resultado dos processos aleatórios de erosão e sedimentação dos grãos. Em muitas situações, essas ondulações desenvolvem-se dando lugar a diversas configurações morfológicas, comumente chamadas formas de fundo. Neste sentido, pode-se assumir que as formas de fundo são uma expressão

através das quais um curso de água tenta estabelecer condições de equilíbrio entre as características hidráulicas e sedimentológicas da seção (Komar, 1976; Raudkivi, 1998).

Quando o limiar de transporte não é excedido, o leito apresentará regime de leito plano inferior, indicando que o fluxo não é suficiente para a formação de formas de fundo. Conforme o fluxo aumenta, marcas onduladas, conhecidas como ripples, são construídas. Estas feições ocorrem em intensidades de fluxo menores, e leitos constituídos por areias com  $d_{50}$  inferior a 0,7 mm. O tamanho destas feições é controlado pelo diâmetro do grão, com a altura atingindo, geralmente, cerca de 100 vezes o valor de  $d_{50}$ , enquanto o comprimento 1000 vezes  $d_{50}$  (Liu, 2001). Em fluxos com baixa intensidade, as ripples possuem uma forma razoavelmente regular e, com o aumento do fluxo, estas formas tornam-se tridimensionais. O formato das dunas é muito similar às ripples, no entanto, sua presença está condicionada a fluxos mais intensos, e seu tamanho atinge escalas muito superiores às ripples. O tamanho das dunas é controlado pela profundidade do canal, e os grãos apresentam  $d_{50}$  superior a 0,6 mm. Com o aumento do fluxo, o tamanho das dunas aumenta, e a profundidade da coluna d'água sobre as cristas das dunas diminui, o que resultará em um aumento da velocidade do fluxo sobre a crista e a lavagem desta, resultando em um estágio de leito plano superior. Quando o número de Froude supera uma unidade, e o fluxo passa a ser supercrítico, a forma de fundo resultante é a antiduna, que possui comprimento e altura na mesma escala das dunas, entretanto, a migração das antidunas ocorre no sentido contrário à direção do fluxo, migrando para montante da seção (Komar, 1976; Liu, 2001).

Assim como as taxas de transporte, o comportamento das formas de fundo também pode ser previsto através de fórmulas teóricas. O comprimento das *ripples* geradas por correntes, geralmente atinge 0,14 m, e sua altura em torno de 0,016 m. Van Rijn (1984) propôs a seguinte fórmula para estimativa da altura e comprimento de feições maiores, como dunas e ondas de areia:

$$\Delta_s = 0,11h \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0,3} (1 - e^{-0,5T_s})(25 - T_s) \quad ; \quad \lambda_s = 7,3h$$

Sendo  $\Delta_s = 0$  se  $\tau_{0s} > 26\tau_{cr}$

Soulsby (1997), afirmou que apesar da grande quantidade de fórmulas disponíveis para o cálculo das formas de fundo, a proposta por Van Rijn é a mais

recomendada, por ter sido baseada e calibrada com uma maior série de dados em relação às demais. No entanto, o mesmo autor afirma que a fórmula é recomendada para fluxos constantes e unidirecionais, como em rios. A variação na velocidade das correntes de maré em ambientes estuarinos pode fazer com que os resultados não sejam tão representativos nestas áreas.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de correntes foram obtidos através de campanhas realizadas com correntômetro acústico tipo Acoustic Doppler Profiler (ADP) durante o mês de novembro de 2013, caracterizando dois ciclos de maré de sizígia (dias 05 e 19 de novembro) e quadratura (dias 11 e 25). Estes dados foram tratados através da utilização de *softwares* fornecidos pelo fabricante do equipamento (RiverSurveyor e ViewADP). A análise dos dados hidrodinâmicos, somados à cartas batimétricas, permitiram segmentar o transecto analisado em três setores com comportamento hidrodinâmico semelhantes, assim como foi executado por Souza (2012). Através destes dados, foram extraídos as velocidades das últimas camadas medidas em cada perfil, sendo calculada a velocidade média exercida sobre o fundo em cada um dos setores.

O mapeamento das características granulométricas foi estabelecido com uma malha amostral abrangendo a área da desembocadura sul do CEP e do Canal da Cotinga, contendo 75 pontos (Figura 2), com espaçamento de 500 m entre cada ponto. As amostras foram coletadas durante o mês de novembro de 2014, em maré de quadratura, com uma draga busca-fundo tipo *Petersen*. Em laboratório, as amostras foram secas em estufa para, em seguida, serem submetidas a quantificação dos teores de carbonatos ( $\text{CO}_3$ ), através de ataque químico por HCl, e matéria orgânica (MO) pela queima com  $\text{H}_2\text{O}_2$ . A análise granulométrica foi realizada através de granulômetro por difração laser (MICROTRAC *Bluewave*).

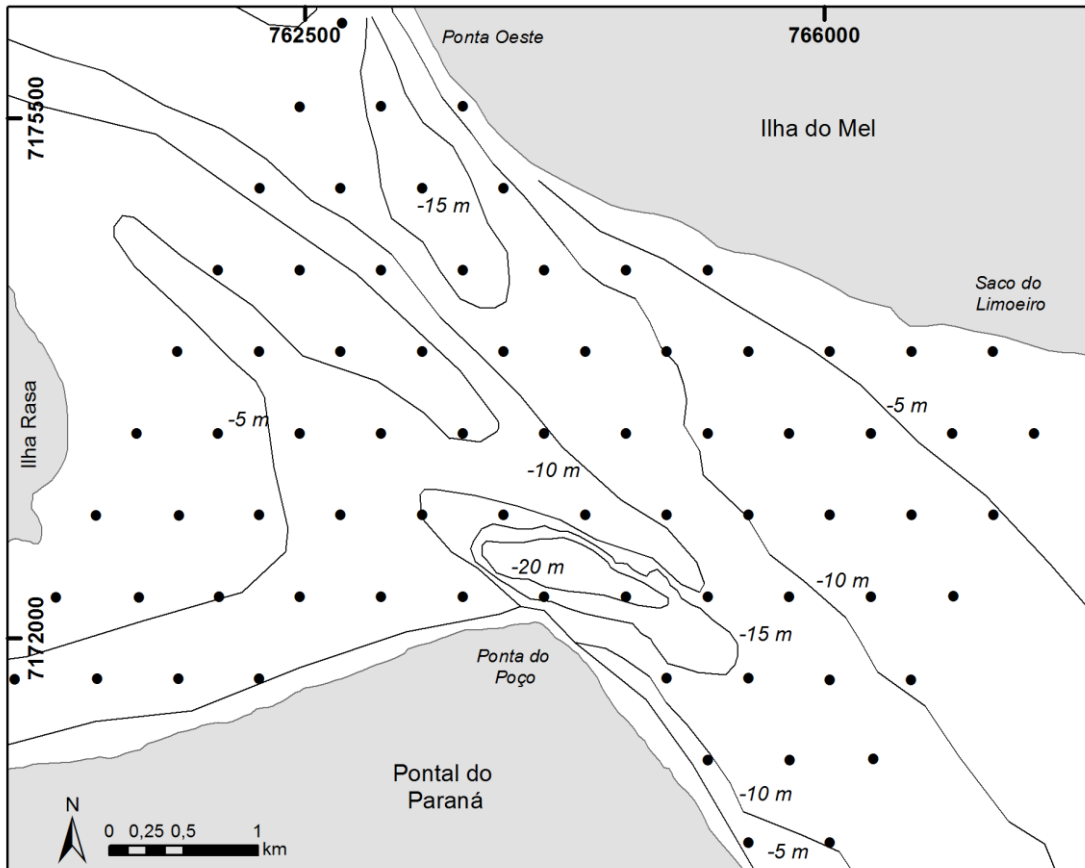


FIGURA 2 - MALHA AMOSTRAL DE SEDIMENTOS DE FUNDO

Os mapas de sedimentos de fundo foram realizados com auxílio do software ArcGis 10, através da interpolação dos resultados de diâmetro médio (DM), grau de seleção (GS) e concentração de carbonatos (CO) e matéria orgânica (MO) pelo método IDW (*Inverse Distances Weight*). Este método se baseia no inverso das distâncias, e considera que quanto mais próximo estiver um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores, atribuindo maior peso para as amostras mais próximas em relação às mais distantes do ponto interpolado (Varella & Junior, 2012). O cálculo é efetuado pelo ArcGis utilizando a equação abaixo:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Onde:

$z$  = valor estimado;

$n$  = número de amostras;

$z_i$  = valores conhecidos;

$d_i$  = distâncias entre  $z_i$  e  $z$

$p$  = ponderação (power)

O método IDW utiliza um parâmetro de ponderação matemática ( $p$ ), que permite controlar a significância dos valores conhecidos sobre os valores interpolados conforme a distância entre os pontos. Um valor de ponderação alto resulta em uma influência maior dos pontos mais próximos, fornecendo mais detalhes da superfície interpolada. Por outro lado, se o valor de ' $p$ ' for diminuído, os valores interpolados terão maior influência de pontos mais distantes, o que gera uma superfície mais suave e menos detalhada (ESRI, 2010). Para a confecção dos mapas, foram utilizados os valores padrão sugeridos pelo ArcGis, de modo a tornar os resultados mais próximos possível da distribuição real das características interpoladas. Para o parâmetro de ponderação (*power*) foi estipulado valor igual a 2, sendo o raio de busca (*search radius*) variável, com 12 pontos e sem distância definida.

As taxas de transporte sedimentar efetivas foram obtidas através de submersão de armadilha de sedimentos tipo Helley-Smith (Helley-Smith, 1997), adaptada com abertura de malha de 63  $\mu\text{m}$ . A armadilha foi fundeada em cada um dos setores distribuídos ao longo da seção, durante as meias marés de quadratura e de sizígia. O tempo de submersão foi de cinco minutos, de modo a evitar o preenchimento de mais de 40% da capacidade do saco coletor, para não interferir nas condições reais de fluxo, conforme indicado por Emmet (1981). As coletas foram realizadas nos dias 08 (quadratura) e 13 (sizígia) do mês de maio de 2014. Em cada um dos setores foram coletadas amostras de sedimento de fundo, com draga tipo Petersen, para efeito de comparação com o material capturado pela armadilha, na tentativa de verificação de suas semelhanças e/ou diferenças. O material capturado pela armadilha foi pesado em balança de precisão ( $10^{-4}$ ) para, em seguida, ser submetido a análise em granulômetro por difração laser (MICROTRAC *Bluewave*) juntamente com as amostras de sedimentos de fundo coletadas. O arredondamento e esfericidade dos grãos foi analisado através de imagens obtidas com o auxílio de lupa microscópica digital. Através da relação entre o peso das amostras e o tempo de submersão e comprimento da boca da armadilha, foram calculadas as taxas de transporte sedimentar em unidade de viscosidade dinâmica ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

A partir dos dados hidrodinâmicos e granulométricos, foram calculados os parâmetros críticos de transporte necessários para a determinação das taxas teóricas, de acordo com os cálculos propostos por Soulsby (1997). As taxas teóricas de transporte foram obtidas através da aplicação das equações descritas por van-Rijn (VR; 2007) e Meyer-Peter & Müller (MM; 1948). Estes resultados foram comparados com as taxas de transporte efetivas para verificar se estes encontravam-se em escalas razoáveis, permitindo uma validação de resultados. Ainda, os resultados foram comparados com as taxas obtidas por Souza (2012) na mesma área de estudo, de modo a avaliar as principais mudanças ocorridas ao longo do tempo e, também, validar os dados obtidos por Souza.

## 5. RESULTADOS

### *- Hidrodinâmica*

Através da análise dos dados hidrodinâmicos e batimétricos, a seção foi segmentada em três setores: Ponta do Poço (PP; -24 m), Canal Navegável (CN; -15 m) e Ilha do Mel (IM; - 7 m). As velocidades médias da seção apresentaram maiores velocidades durante as amostragens de sizígia em relação às de quadratura. Esta diferença também foi verificada entre os períodos de maré vazante e enchente, prevalecendo maiores velocidades no primeiro.

O setor PP apresentou considerável variação entre as velocidades médias de enchente e vazante. Durante o período de quadratura, a velocidade média na enchente chegou a  $0,14 \text{ cm.s}^{-1}$ , subindo para  $0,33 \text{ cm.s}^{-1}$  durante a vazante. No período de sizígia, a variação foi menor, indo de  $0,47 \text{ cm.s}^{-1}$  para  $0,61 \text{ cm.s}^{-1}$  na enchente e vazante, respectivamente. O setor CN apresentou comportamento hidrodinâmico relativamente semelhante durante os períodos de enchente e vazante. A variação durante a quadratura foi de  $0,24 \text{ cm.s}^{-1}$  na enchente a  $0,30 \text{ cm.s}^{-1}$  na vazante. Nas marés de sizígia, o setor apresentou pequeno predomínio das correntes de enchente ( $0,58 \text{ cm.s}^{-1}$ ) em relação às de vazante ( $0,56 \text{ cm.s}^{-1}$ ). O setor IM demonstrou as maiores velocidades da seção durante o período de quadratura, chegando a atingir  $0,45 \text{ cm.s}^{-1}$  durante a maré de vazante, enquanto na enchente chegou a  $0,25 \text{ cm.s}^{-1}$ . Nas amostragens de sizígia, IM apresentou leve predomínio das correntes de vazante, que apresentaram velocidade de  $0,6 \text{ cm.s}^{-1}$  contra  $0,56 \text{ cm.s}^{-1}$  durante a enchente.

De acordo com os cálculos propostos por Soulsby (1997), a velocidade crítica de cisalhamento foi determinada em  $0,45 \text{ cm.s}^{-1}$  para o setor PP,  $0,42 \text{ cm.s}^{-1}$  para o setor CN e  $0,38 \text{ cm.s}^{-1}$  para o setor IM. Com base nestas informações, é possível verificar que, durante as marés de quadratura, apenas o setor IM, na maré de vazante, atingiu velocidade suficiente para ocorrência de transporte de sedimentos, enquanto todas as demais medições resultaram em velocidades médias inferiores à velocidade crítica para início do movimento. Por outro lado, durante os períodos de sizígia, todas as velocidades médias obtidas durante as meia-marés superaram a velocidade crítica, demonstrando que o transporte de sedimentos é efetivo nos três setores nos ciclos de sizígia.

Nas marés de quadratura e sizígia, PP apresentou as menores velocidades durante os períodos de enchente em relação aos demais setores. Entretanto, o setor apresentou altas velocidades durante as vazantes, sendo superado apenas pelo setor IM na quadratura.. Durante a sizígia, o setor CN apresentou a maior velocidade durante a enchente, enquanto que durante a vazante a velocidade ficou semelhante entre os três setores, com uma variação de  $0,05 \text{ cm.s}^{-1}$  entre a menor e a maior velocidade neste período. A variação de velocidade no setor IM foi pequena entre a enchente e vazante de sizígia.

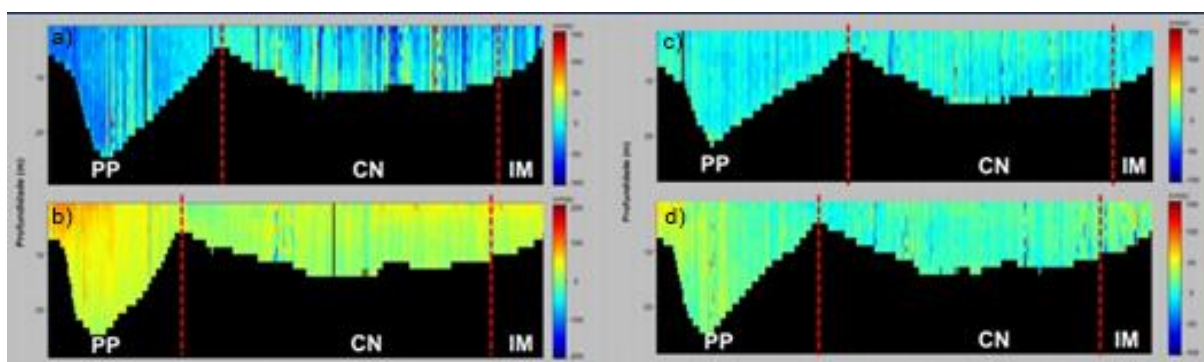


FIGURA 3: PERFIL BATIMÉTRICO COM SEPARAÇÃO DOS SETORES E COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DURANTE MARÉ DE SIZÍGIA (ENCHENTE [A] E VAZANTE [B]) E QUADRATURA (ENCHENTE [C] E VAZANTE [D])

#### - Sedimentos de Fundo

O diâmetro médio predominante nas amostragens foi areia fina e, conforme se aproxima da saída do estuário, nota-se a presença de areias médias (Figura 4). A presença de partículas finas (siltes e argilas) foi verificada apenas na área associada às menores granulometrias (125 - 175  $\mu\text{m}$ ), na região próxima a Ilha da Cotinha, sendo que a concentração destas partículas nesta área não ultrapassou 5% da amostra. Na área central da desembocadura, nota-se uma faixa intermediária, caracterizada por areias finas com diâmetro médio entre 175-215  $\mu\text{m}$ , e conforme se aproxima da saída do estuário, o diâmetro médio aumenta para 215 - 250  $\mu\text{m}$ , no limite das areias finas. Associado a esta região mais externa, nota-se manchas de areias médias na faixa entre 250 - 325  $\mu\text{m}$ , com apenas um ponto isolado que apresenta granulometria superior a esta. A região próxima a Ponta Oeste da Ilha do Mel apresenta areia fina entre 215 - 250  $\mu\text{m}$ , gradando para areias médias. Os maiores valores de diâmetro médio foram encontrados na margem W da Ponta do Poço e desembocadura do Canal da Cotinha, com valores de diâmetro médio

atingindo 371 mm no ponto próximo ao Canal da Cotinga, e chegando próximo ao nível de areia grossa na área da Ponta do Poço, chegando a 475 mm de diâmetro médio.

O grau de seleção das amostras variou de bem a moderadamente selecionados (Figura 5). De forma geral, o grau de seleção diminui conforme aproxima-se da área externa do estuário. Algumas manchas de partículas pobremente selecionadas foram verificadas na área da desembocadura do Canal da Cotinga, margem W da Ponta do Poço, margem NE da Ilha da Cotinga e entre a Ponta Oeste da Ilha do Mel e o Saco do Limoeiro. Na área mais externa, foram verificados amostras muito pobremente selecionadas, presentes no centro do estuário, no trecho do canal navegável e na área próxima ao Saco do Limoeiro. Estas amostras com baixo grau de seleção (pobre ou muito pobremente selecionado) estão associadas à maiores granulometrias (areias médias) e, no caso da amostra localizada no centro do canal navegável, também está associada a alta concentração de carbonatos na amostra.

A concentração de  $\text{CO}_3$  se manteve abaixo dos 4% em grande parte das amostras (Figura 6). Valores mais baixos, entre 0 - 2% foram verificados da área entre a Ponta Oeste e a margem norte da Ilha da Cotinga, na área próxima à desembocadura do canal do DNOS e também entre a margem W da Ponta do Poço e o Canal da Cotinga. Apenas um ponto superou 15% de  $\text{CO}_3$ , na região central da porção mais externa da desembocadura. Este ponto também está associado à maior diâmetro médio e baixo grau de seleção. Na margem E da Ilha da Cotinga e no Saco do Limoeiro foram verificadas amostras contendo entre 8 - 10% de  $\text{CO}_3$ .

No geral, a concentração predominante de MO ficou entre 2 - 4% (Figura 7). Valores acima de 5% do peso da amostra foram verificados apenas em dois pontos localizados na área externa da desembocadura, próximo a margem E da Ponta do Poço e na porção do canal navegável. Os menores teores de MO foram encontrados na região do Saco do Limoeiro, onde os valores apresentaram valores entre 0 - 2% e na região entre a margem W da Ponta do Poço e o Canal da Cotinga, onde a concentração variou entre 1 - 2%. Uma mancha na concentração entre 3 - 4% é verificada na região da Ponta do Poço, se estendendo para a região central do estuário.

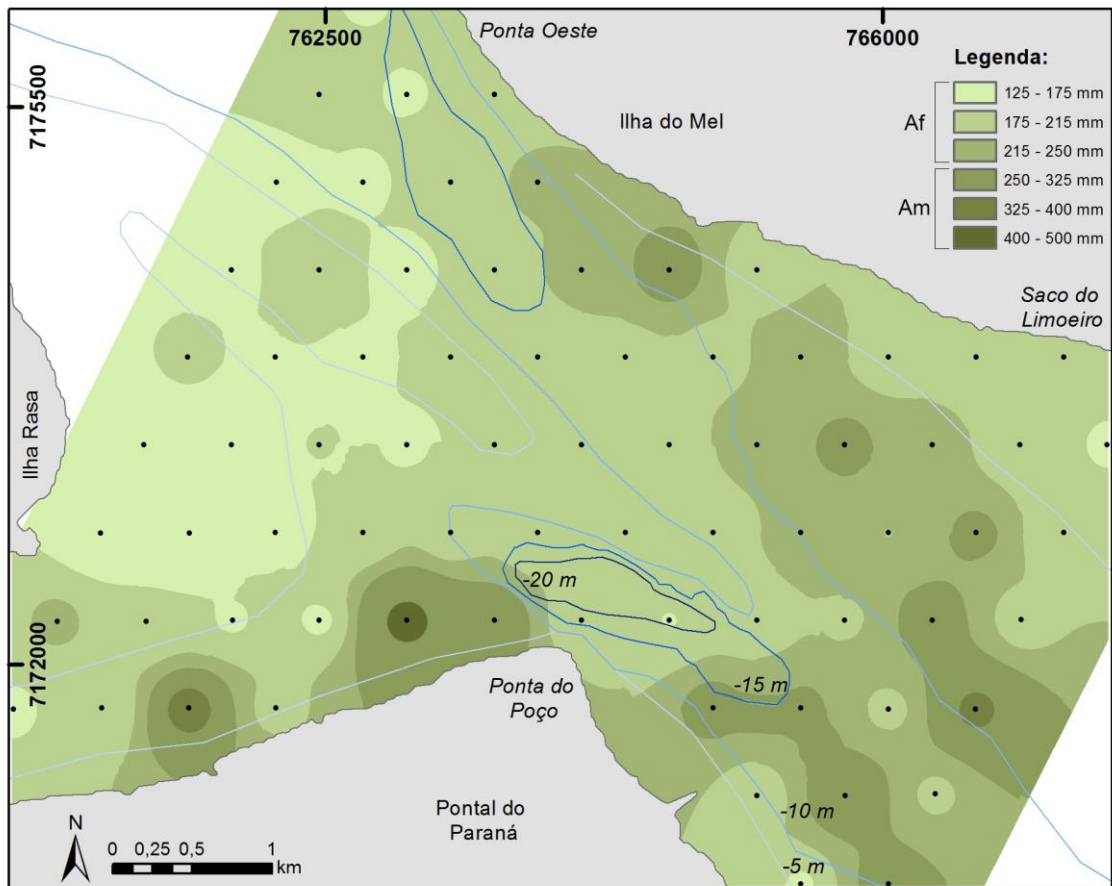


FIGURA 4: MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE DIÂMETRO MÉDIO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA DESEMBOCADURA SUL DO CEP. AF - AREIA FINA; AM - AREIA MÉDIA

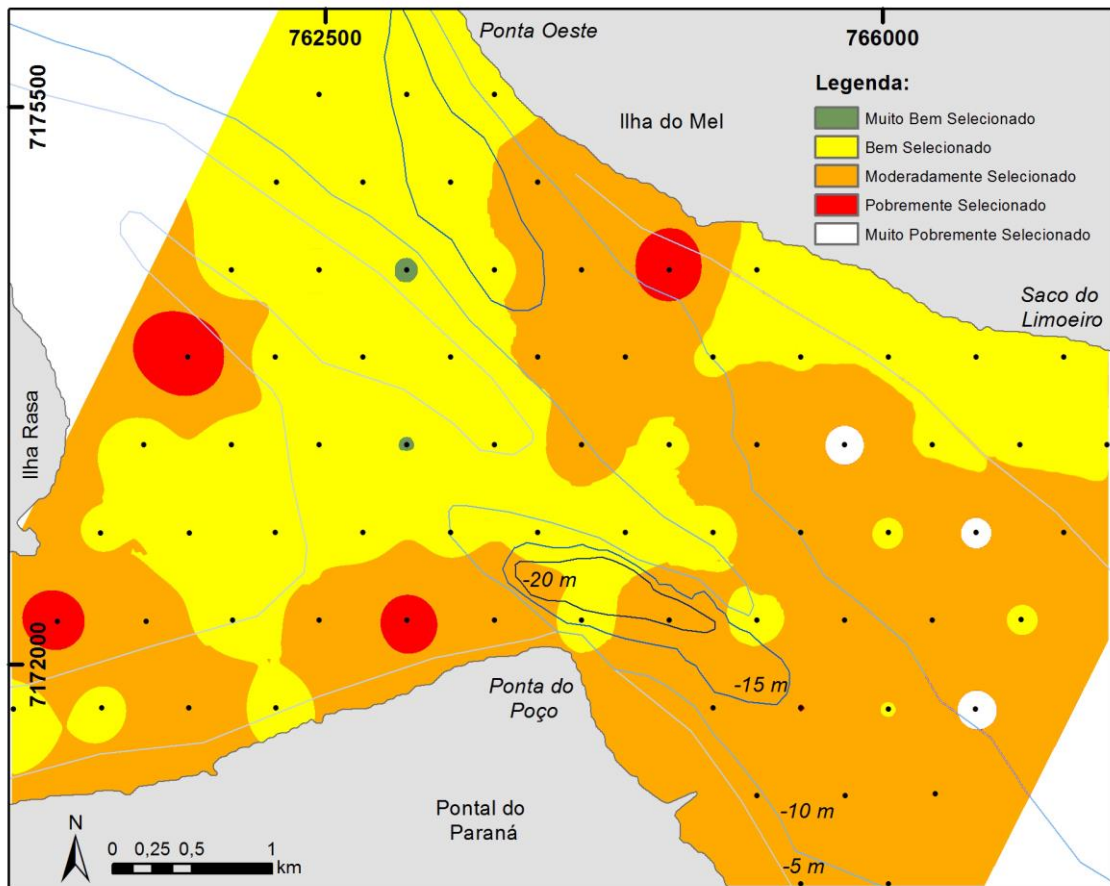


FIGURA 5: MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DO GRAU DE SELEÇÃO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA DESEMBOCADURA SUL DO CEP.

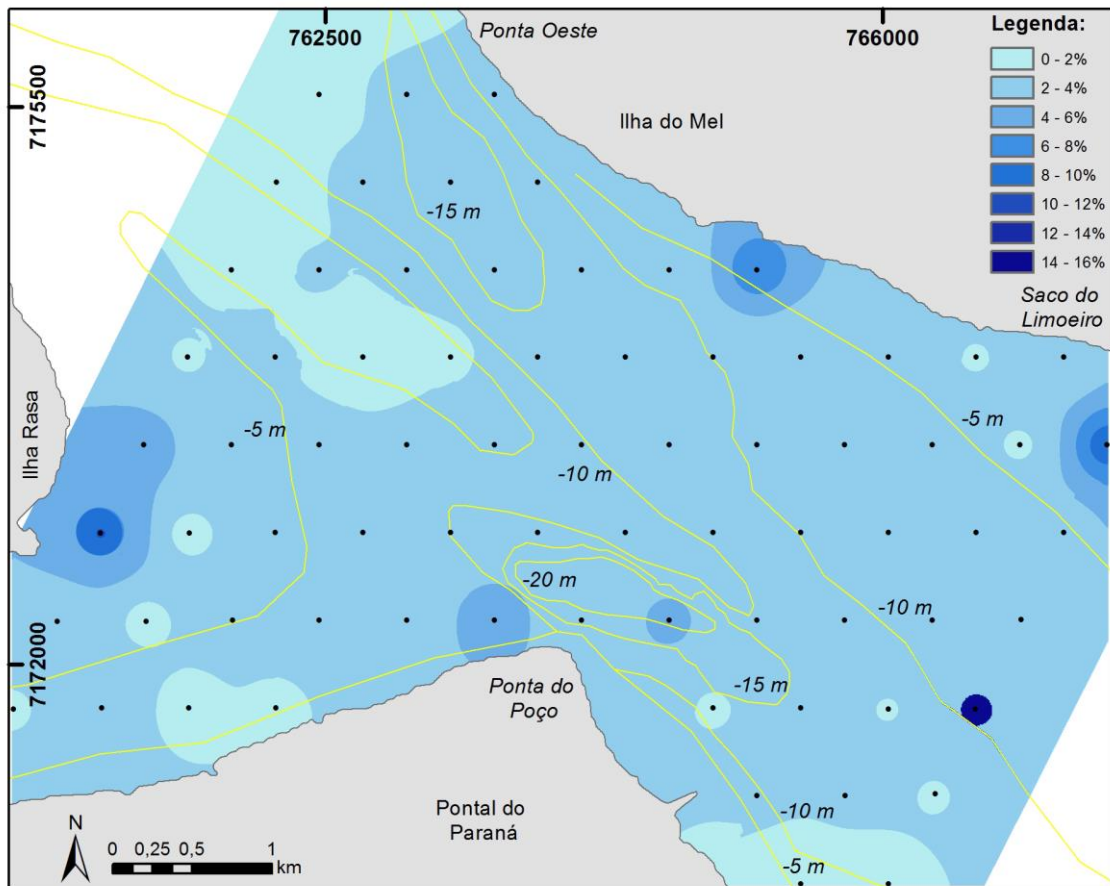


FIGURA 6: MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CARBONATOS ( $\text{CO}_3$ ) NOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA DESEMBOCADURA SUL DO CEP.

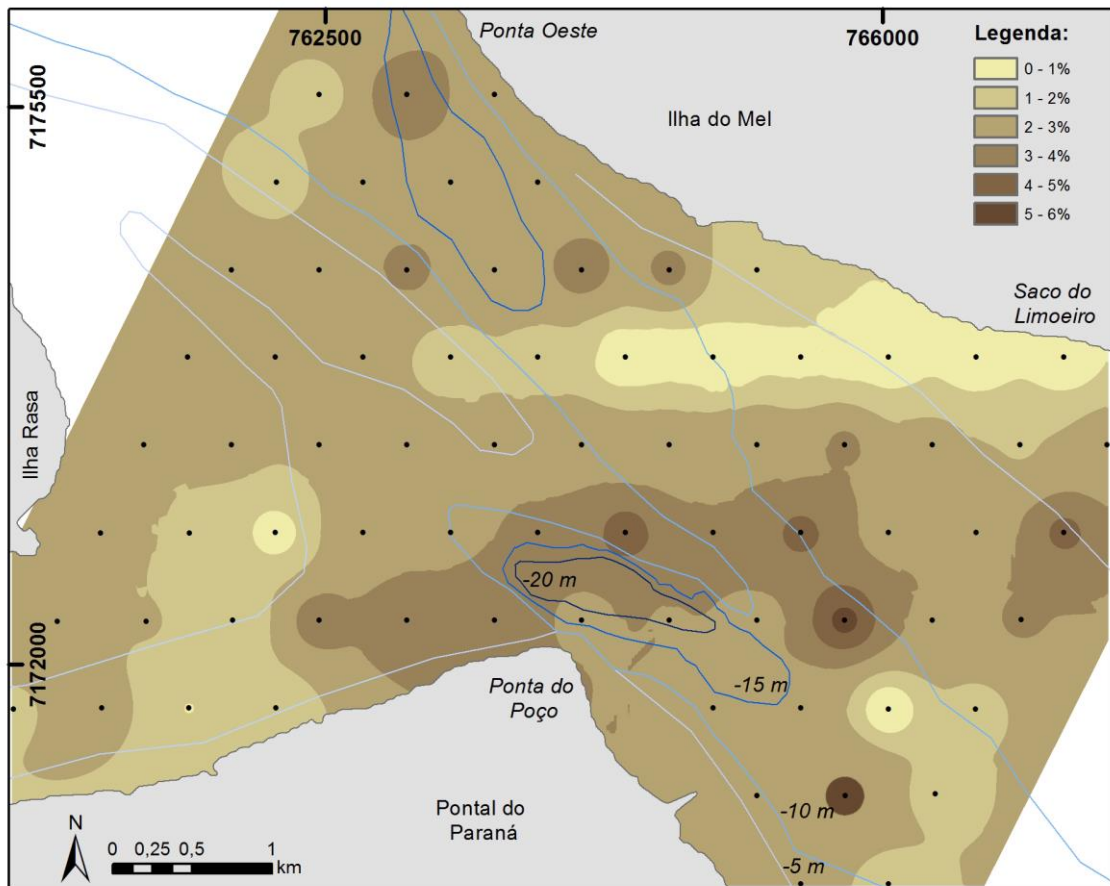


FIGURA 7: MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA (MO) NOS SEDIMENTOS DE FUNDO DA DESEMBOCADURA SUL DO CEP.

- *Transporte efetivo*

Os sedimentos amostrados nos três setores apresentaram características semelhantes, variando entre areias finas (PP e CN) a médias (IM), com grau de seleção variando de bem (PP) a moderadamente selecionado (CN e IM). A granulometria das amostras obtidas com a armadilha Helley-Smith correspondeu às amostras obtidas com a draga, confirmando que as partículas foram submetidas ao transporte por carga de fundo. A concentração de matéria orgânica nos sedimentos amostrados foi inferior a 5% em todas as amostras, sendo as menores concentrações encontradas no setor IM, que ficaram abaixo dos 2% em todas as amostras, enquanto o setor PP apresentou os teores mais próximos de 5% e o setor CN variou entre 2 - 3% de matéria orgânica. A quantidade de CO<sub>3</sub> presentes nas amostras de sedimento de fundo não ultrapassaram 3% nos três setores. Entretanto, no material capturado pela armadilha, as concentrações de CO<sub>3</sub> superaram 35% durante as amostragens de quadratura. No setor IM a concentração de CO<sub>3</sub> atingiu 15%, enquanto no setor PP chegou a 10%, ambos durante a amostragem de quadratura. Durante a maré de sizígia, as concentrações ficaram conforme o material capturado pela draga, com teores abaixo dos 5%.

As taxas de transporte mostraram relação com os dados hidrodinâmicos, com grande variação entre as amostragens de quadratura e sizígia. Todas as amostragens de sizígia apresentaram taxas superiores a 10 vezes às taxas de quadratura. O predomínio das marés de vazante também foi constatado nas taxas efetivas, com exceção dos setores CN e IM, durante a sizígia, que demonstraram maiores taxas durante a maré enchente.

O setor PP se mostrou como o mais eficiente no transporte de sedimentos, atingindo a maior taxa medida para a seção ( $32 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) durante a vazante de sizígia. Na enchente deste mesmo período, o setor apresentou taxa de  $22 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , demonstrando o predomínio das correntes de vazante neste setor. Este mesmo predomínio foi verificado durante as marés de quadratura, variando de  $0,205 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  para  $0,912 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , durante enchente e vazante, respectivamente. O setor CN variou de  $0,104 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  na enchente para  $0,990 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  durante a vazante de quadratura, demonstrando o predomínio das correntes de vazante neste período. Entretanto, no período de sizígia, CN demonstrou a redução das taxas de vazante ( $14 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) em relação às de enchente ( $23$

$\times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ). Assim como nos dados hidrodinâmicos, IM apresentou as maiores taxas durante a vazante de quadratura ( $1,1 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ), porém foi superado por PP durante a enchente deste mesmo período, quando atingiu  $0,120 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . Nas marés de sizígia, IM resultou em  $26 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  durante maré de enchente, sendo a maior taxa deste período nos três setores. Já durante a vazante, o setor IM apresentou taxa consideravelmente inferior aos demais setores, atingindo  $4,7 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , quase 7 vezes menos à taxa mensurada em PP, apesar das condições hidrodinâmicas semelhantes.

#### *- Transporte teórico*

Com exceção do setor IM durante a vazante, os parâmetros críticos de transporte não foram superados durante o período de quadratura, resultando em taxas nulas em grande parte das amostragens. No geral, ambas equações apresentaram valores inferiores às taxas efetivas, e MM superou VR em quase todas as amostragens, com exceção da maré vazante de quadratura, onde VR foi superior a MM nos setores PP e CN.

O setor PP não apresentou taxas durante as marés de quadratura em nenhuma das medições. Durante a sizígia, as taxas teóricas corroboraram com os dados hidrodinâmicos e efetivos, demonstrando a predominância das correntes de vazante. Durante a enchente, MM ( $0,91 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) apresentou maior taxa em relação a VR ( $0,08 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ), entretanto, na vazante, VR ( $3,9 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) superou MM ( $\times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ). Ambas equações foram significativamente menores do que as taxas efetivas medidas, tendo VR apresentado taxas cerca de 8 vezes abaixo, enquanto MM foi 23 vezes menor em relação às taxas efetivas.

Assim como em PP, no setor CN a equação MM foi superior a VR durante a maré enchente, enquanto VR apresentou maiores valores na vazante. Ao contrário do mensurado pelas taxas efetivas, as taxas teóricas demonstraram maiores valores durante as correntes de vazante neste setor. Durante a enchente, MM apresentou taxa de  $3,7 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , cerca de 6 vezes inferior à taxa efetiva, enquanto VR chegou a  $0,51 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , quase 45 vezes menor do que o transporte efetivo. Por outro lado, durante a vazante as taxas se mostraram comparáveis aos dados de transporte efetivo, tendo VR resultado em  $11,4 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e MM  $6,8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

$1.s^{-1}$ . Estes resultados se mostraram semelhantes à taxa efetiva ( $14,3 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ ), sendo VR a equação que mais se aproximou do resultado real.

O setor IM foi o único a apresentar taxas teóricas durante as medições de quadratura. Durante a maré vazante deste período, VR resultou em  $0,12 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ , enquanto MM apresentou  $0,75 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ . A equação de MM ficou muito próxima ao valor medido efetivamente ( $1,1 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ ). Durante as amostragens de sizígia, as taxas teóricas obtidas no setor IM foram significativamente inferiores às taxas efetivas durante maré de enchente, tendo VR ( $0,54 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ ) ficado quase 50 vezes abaixo do transporte efetivo, enquanto MM ( $3,8 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ ) foi cerca de 7 vezes inferior ao valor real medido. Assim como no setor CN, nas amostragens de vazante o setor IM apresentou taxas teóricas comparáveis às efetivas. MM ( $5,6 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ ) superou a taxa efetiva em cerca de  $1 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ , sendo a única taxa teórica, em todas as medições, que apresentou resultados acima do transporte efetivo. Por outro lado, VR apresentou taxa de  $0,78 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ , que se mostrou cerca de 6 vezes inferior ao valor efetivo.

			<b>PP</b>	<b>CN</b>	<b>IM</b>
<b>QUADRATURA</b>	<b>ENCHENTE</b>	Velocidade média	0,14	0,24	0,25
		VR	0	0	2,904
		MM	0	0	5,027
		Efetivo	0,205	0,104	0,120
	<b>VAZANTE</b>	Velocidade média	0,33	0,3	0,45
		VR	0	0	0,121
		MM	0	0	0,758
		Efetivo	0,912	0,990	1,136

			<b>PP</b>	<b>CN</b>	<b>IM</b>
<b>SIZÍGIA</b>	<b>ENCHENTE</b>	Velocidade média	0,47	0,58	0,56
		VR	0,0888	0,515	0,541
		MM	0,911	3,729	3,896
		Efetivo	22,871	23,352	26,607
	<b>VAZANTE</b>	Velocidade média	0,61	0,56	0,6
		VR	3,925	11,436	0,782
		MM	1,389	6,865	5,625
		Efetivo	32,669	14,325	4,793

TABELA 1: VELOCIDADE MÉDIA POR SETOR (CM.S<sup>-1</sup>) E TAXAS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR EFETIVAS E TEÓRICAS (\*10<sup>-3</sup> KG.M<sup>-1</sup>.S<sup>-1</sup>) DURANTE MARÉS DE QUADRATURA E SIZÍGIA.

*- Comparação 2012 x 2014*

De um modo geral, as taxas efetivas obtidas no ano de 2014 se mostraram inferiores ao trabalho realizado por Souza (2012). Ambos trabalhos demonstraram a predominância do transporte sedimentar durante correntes de vazante. A diferença entre as taxas de quadratura e sizígia também foram significantes em ambos os trabalhos, sendo encontradas taxas nulas ou muito baixas durante as amostragens de quadratura em 2012 e 2014, determinando a baixa influência destas correntes no transporte de sedimentos e na construção de formas de fundo associadas a esta mecânica. As taxas obtidas em 2012 se mostraram maiores do que as mensuradas neste trabalho, o que pode ser justificado pelas maiores velocidades medidas em 2012, que chegou a 0,85 cm.s<sup>-1</sup> no setor PP, 0,89 cm.s<sup>-1</sup> em CN e 0,98 cm.s<sup>-1</sup> em IM,

enquanto em 2014 foram obtidos  $0,61 \text{ cm.s}^{-1}$ ,  $0,56 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $0,6 \text{ cm.s}^{-1}$  para os três setores, respectivamente. Em regimes de fluxo semelhantes, as taxas apresentaram valores comparáveis nos dois trabalhos, com exceção das taxas efetivas no setor IM, onde Souza (2012) encontrou resultados inferiores aos encontrados no trabalho atual.

As maiores taxas efetivas encontradas por Souza foram de  $25,9 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  no setor PP,  $17,8 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  no setor CN e  $2,42 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  em IM. Estas taxas variaram de acordo com as taxas obtidas durante a maré de vazante de 2014, que apresentou taxas de  $32,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ,  $14,3 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e  $4,7 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  para os setores PP, CN e IM, respectivamente. Entretanto, as taxas obtidas durante as marés de enchente se mostraram muito superiores em 2014 em relação a 2012, onde no setor IM não foi encontrada nenhuma taxa superior a 1 durante a enchente, sendo determinada uma taxa de  $26,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  nas medições atuais. As taxas teóricas relacionadas às maiores medições efetivas de 2012 também se mostraram comparáveis às obtidas no trabalho atual durante maré de vazante. No setor PP, a equação de MM resultou em  $3,49 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e VR  $3,43 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , para uma velocidade de  $0,67 \text{ cm.s}^{-1}$  em 2012, enquanto em 2014 MM foi  $1,38 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e VR  $3,92 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  em um fluxo de  $0,61 \text{ cm.s}^{-1}$ . No setor CN, em 2012, com velocidade média de  $0,80 \text{ cm.s}^{-1}$ , MM resultou em  $10,20 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , enquanto VR atingiu  $10,10 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ . Já em 2014, MM apresentou  $6,86 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e VR  $11,43 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  para uma velocidade de  $0,56 \text{ cm.s}^{-1}$ . IM foi o setor com as maiores diferenças entre as taxas obtidas nos dois trabalhos, tendo sido definido uma taxa de  $1,01 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por MM e  $0,83 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por VR em uma velocidade de  $0,49 \text{ cm.s}^{-1}$ , em 2012. Por outro lado, as medições de 2014 foram determinadas com uma velocidade de  $0,6 \text{ cm.s}^{-1}$ , resultando em  $5,62 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  para MM e  $0,78 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  para VR.

Considerando as maiores velocidades determinadas em 2012, as taxas teóricas associadas a estas velocidades se apresentaram consideravelmente maiores do que as taxas obtidas em 2014. Para a velocidade de  $0,85 \text{ cm.s}^{-1}$  encontrada em PP, atingiram os valores de  $9,50 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por MM e  $10,60 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por VR, enquanto em 2014 a maior taxa teórica deste setor foi mensurada por VR (3,92). No setor CN, que apresentou velocidade máxima de  $0,89 \text{ cm.s}^{-1}$ , MM ficou em  $15,20 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  e VR  $15,6 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , sendo o valor máximo encontrado em 2014 igual a  $11,43 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ , por VR. O setor IM apresentou a maior velocidade média da seção nos dois trabalhos, atingindo  $0,98 \text{ cm.s}^{-1}$ , e resultando em uma taxa de  $31,1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por VR e  $31,4 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  por MM. Souza (2012) eliminou esta amostra por considerar a diferença entre as taxas teóricas em relação a efetiva, que apresentou  $0,25 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$  (cerca de 125

vezes menor do que as taxas teóricas) muito grande para comparação dos dados. No entanto, esta amostra ainda pode ser utilizada para comparar as taxas teóricas obtidas nos dois trabalhos, visto que as taxas efetivas não estão sendo consideradas neste caso.

*- Estimativa das Formas de Fundo*

De acordo com a formulação proposta por Van Rijn (1984), as formas de fundo são construídas apenas durante as marés de sizígia, enquanto nas marés de quadratura as partículas não são movimentadas pela corrente. De acordo com a equação, o comprimento da feição é dependente apenas da profundidade da seção. Sendo assim, o maior comprimento está presente no setor PP, que apresentou formas com 175 m, enquanto o menor no setor IM, com 51 m. O setor CN resultou em feições com 109 m.

A altura da feição depende da granulometria e também do comportamento hidrodinâmico, portanto, os resultados apresentados variaram conforme o estágio da maré, e a altura apresentada é a média durante as medições. As correntes de vazante mostraram maior capacidade na formação de feições quando comparado às correntes de enchente, e a variação ao longo dos setores se mostrou semelhante ao comprimento, com as maiores alturas em PP e as menores em IM. O setor PP apresentou altura média de 0,97 m durante a maré de vazante, enquanto na maré enchente, a média foi 0,4 m, menos da metade a altura obtida durante a vazante. O setor CN apresentou resultados semelhantes em ambos períodos, variando de 0,64 m durante a enchente, para 0,63 m na vazante. Já o setor IM indicou um pequeno aumento de 6 cm na altura durante a maré de vazante, que resultou em 0,47 m contra 0,41 m da maré de enchente.

		Comprimento ( $\lambda_s$ )	Altura ( $\Delta_s$ )
<b>ENCHENTE</b>	<i>PP</i>	175,2	0,4
	<i>CN</i>	109,5	0,64
	<i>IM</i>	51,1	0,41
<b>VAZANTE</b>	<i>PP</i>	175,2	0,97
	<i>CN</i>	109,5	0,63
	<i>IM</i>	51,1	0,47

TABELA 2: ESTIMATIVA DAS FEIÇÕES DE FUNDO DE ACORDO COM O MÉTODO DE VAN RIJN (1984).

## 6. DISCUSSÃO & CONCLUSÕES

A análise das taxas teóricas e preditas demonstrou a predominância do transporte sedimentar na desembocadura sul durante as marés de sizígia, tendo sido verificado taxas significativas de transporte durante a quadratura apenas no setor IM, o que pode ser justificado por ser uma área relativamente rasa, que permite correntes menos intensas chegarem ao fundo. A identificação de um hemi-delta de maré enchente na região do Saco do Limoeiro por Angulo (1999) e a presença de formas de fundo orientadas neste mesmo sentido verificadas por Possenti (2009), que confirmam o predomínio das correntes de enchente neste setor. Por outro lado, as formas de fundo identificadas por Lamour (2007) na região da Ponta do Poço, indicam que este setor é dominado por correntes de vazante, conforme indicado nos dados hidrodinâmicos. Noernberg *et al.* (2007) também verificou a baixa capacidade de transporte durante as marés de quadratura, tendo pouca influência quando comparada ao transporte gerado durante períodos de sizígia. Com base nestas informações, pode-se afirmar que o transporte sedimentar na desembocadura sul é significativo apenas durante as marés de sizígia, havendo importação de sedimentos marinhos na área do Saco do Limoeiro (delta de enchente) e exportação de sedimentos pelo estuário para a costa na área da Ponta do Poço, onde predomina o delta de maré vazante.

A predominância das marés de vazante em relação às de sizígia também foi verificada nas taxas teóricas e efetivas, possibilitando inferir que o estuário atua como exportador de sedimentos para a plataforma continental. Esta condição de exportação de material também foi verificada por Souza (2012), enquanto o predomínio de marés de vazante foi descrito nos trabalhos de Mantovanelli *et al.* (2004) e Noernberg *et al.* (2007), que analisaram o comportamento hidrodinâmico do estuário. A predominância das correntes de maré vazante é justificada devido a grande influência da descarga fluvial no interior do CEP (Mantovanelli, 1999). Durante a maré de enchente, as águas fluviais são aprisionadas na área próxima a suas desembocaduras, sendo transportadas em direção ao oceano durante os períodos de vazante. Do ponto de vista geomorfológico, Angulo (1999) e Lamour (2007) também identificaram feições que indicam o transporte de sedimentos mais intenso durante marés de vazante.

Noernberg *et al.* (2007) ainda salientam que as correntes de vazante apresentam menor variação na sua direção, intensificando a componente longitudinal, o que torna mais eficaz o transporte de sedimentos por estas correntes, quando comparadas às correntes de quadratura, que possuem menor componente longitudinal, não possuindo intensidade suficiente para movimentar partículas com eficiência.

A baixa influência das correntes de enchente sobre o leito no setor PP pode ser justificada pela maior profundidade deste setor, o que gera estratificação da coluna d'água, verificada por Marone & Jamiyanna (1997), fazendo com que a corrente de maré enchente não consiga atuar no leito com grande influência. As maiores velocidades de vazante no setor PP podem ser ocasionadas devido à influência do canal da Cotonga, que além de ocasionar o estrangulamento das correntes de maré, também influi com a descarga de rios, como o Maciel e Guaraguaçu (Lamour, 2000).

A presença de maiores taxas teóricas em relação às efetivas durante as marés de enchente podem ter sido ocasionadas pela influência das ondas na desembocadura. Souza (2012) verificou o potencial de transporte por ondas próximo à costa da Ilha do Mel, entretanto, apesar da fórmula de Van Rijn poder calcular a influência das ondas no transporte, a ausência de dados impossibilitou a inserção deste fator na equação, sendo as taxas obtidas neste trabalho representadas apenas pelo transporte por correntes.

A forma arredondada e o grau de desgaste dos grãos demonstra um elevado estágio de maturidade destas partículas, indicando que foram submetidas a longos períodos de transporte, evidenciando a distância da área fonte. Com base nisto e no mapa apresentado por Lamour *et al.* (2004), que indica a presença de partículas finas (silte e argila) na região central do estuário, fica evidente que a origem dos sedimentos presentes na desembocadura não foram fornecidos pela bacia de drenagem do CEP (Lessa *et al.*, 1998; Lamour, 2000). Este fato também foi verificado por Souza (2012), que sugeriu possível importação de partículas a partir da desembocadura norte do CEP, justificado por estudos de Angulo (1999), que identificou intensa quebra de ondas na região, podendo atuar como importadora de partículas. Souza (2012) ainda ressalta que o material exportado pela desembocadura sul pode ser originado pela contribuição do eixo N-S do CEP (Lessa, 1998) ou erosão e transporte do material presente no canal da Cotonga (Lamour, 2000). As duas últimas hipóteses não puderam ser verificadas devido a falta de estudos batimétricos e sedimentológicos nas duas áreas.

A variação no comportamento das feições de fundo estimadas foram de acordo com a identificação feita por Lamour (2007), com maiores feições na região da Ponta do Poço, e feições de pequeno porte próximo a Ilha do Mel. Entretanto, o comprimento das feições parece ter sido superestimado pela equação utilizada. Enquanto as equações indicaram comprimento de 175 m para PP, Lamour identificou ondulações com comprimento entre 20 - 30 m na região da Ponta do Poço, cerca de 5 - 6 vezes menor do que o fornecido pela equação. Esta diferença pode ter sido ocasionada devido a indicação destas equações para feições em fluxos contínuos, como leitos de rios (Soulsby, 1997), sendo que quando replicadas em ambientes influenciados por correntes de maré, os valores obtidos são instantâneos para a condição hidrodinâmica medida, e a variação na direção e intensidade das correntes ao longo dos ciclos de maré fazem com que as estimativas sejam superestimadas. Entretanto, os resultados das equações não podem ser desconsiderados sem um novo levantamento das feições de fundo presentes na desembocadura sul, visto que período de tempo considerável se passou desde os levantamentos realizados por Lamour (2007), podendo ocasionar alterações significantes na geomorfologia do local.

A granulometria dos sedimentos de fundo variou de acordo com os resultados obtidos por Lamour *et al.* (2004), onde as areias finas ocorreram na área próxima à Ilha da Cotinha, tendendo ao aumento da granulometria conforme se aproxima da saída do estuário. O grau de seleção também concordou com o proposto por Lamour *et al.* (2004). A comparação entre os dados de diâmetro médio e grau de seleção permite inferir que os piores índices de grau de seleção estão associados às maiores granulometrias, sendo os sedimentos da área mais externa da desembocadura menos selecionados do que o material presente na região interna. Isto pode ser justificado devido a maior dinâmica nestas áreas, que encontram-se sob influência de ondas e correntes, ocasionando maior turbulência e, por consequência, a menor seleção dos grãos transportados.

No geral, a concentração de carbonatos foi baixa na desembocadura sul, indicando a predominância do leito arenoso e a baixa influência de fatores biológicos neste ambiente. A única amostra com índice de carbonatos superior a 15% apresentou grande quantidade de fragmentos de conchas, e está localizada na extensão do canal navegável dragado. A presença de fragmentos de conchas na região do canal navegável pode ser ocasionada pela influência de ondas na região mais externa do estuário, que perturba e transporta os organismos marinhos. As demais amostras

com índices mais elevados encontram-se próximas a ambientes praias (Ponta do Poço, Ilha do Mel e Cotinga), e apresentaram fragmentos de conchas e bivalves inteiros. A presença de quantidade considerável destes organismos pode ser ocasionada pela baixa intensidade de ondas e correntes verificada nestes locais, permitindo a instalação de comunidades macrobentônicas no leito. A concentração de matéria orgânica nos sedimentos apresentou maiores resultados na área próxima a Ponta do Poço e Canal da Cotinga. A alta concentração de matéria orgânica nestas regiões pode estar associada a presença de manguezais na margem W da Ponta do Poço e nas Ilhas Rasa e da Cotinga. Somado a influência dos manguezais, também pode haver influência da descarga dos rios no Canal da Cotinga, fornecendo nutrientes que aumentam a produção biológica nas áreas próximas.

A análise dos três setores com comportamentos distintos permitem concluir que o transporte sedimentar na desembocadura sul do CEP variou conforme a granulometria, batimetria e hidrodinâmica. Durante todas as medições ficou evidente o predomínio das correntes de vazante no estuário, indicando potencial de exportação de sedimentos pela desembocadura sul para a plataforma continental. As taxas obtidas em 2012 e 2014 se mostraram comparáveis, quando analisadas em condições de fluxo semelhante. Entretanto, o trabalho atual obteve condições de fluxo menos intensas, resultando em taxas inferiores às encontradas por Souza (2012). Ambos trabalhos verificaram a predominância do transporte sedimentar durante marés de vazante, indicando a exportação de partículas pelo estuário. Entretanto, a origem destas partículas é incerta. Três hipóteses foram levantadas em trabalhos prévios, porém a verificação destas não foi possível devido a falta de dados. Estes questionamentos poderão ser solucionados com o levantamento das feições de fundo da desembocadura e suas áreas adjacentes, visando a identificação das direções predominantes de transporte e, por consequência, a origem das partículas exportadas pela desembocadura sul.

## REFERÊNCIAS

ANGULO, R. J. Geologia da planície costeira do Estado do Paraná. **São Paulo**, v. 334, 1992.

ANGULO, R.J. Morphological characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná. **ANAIS-ACADEMIA BRASILEIRA DE CIENCIAS**, v. 71, n. 4 PART 2, p. 935-960, 1999. ISSN 0001-3765.

BAGNOLD, R. An approach to the sediment transport problem from general physics. **US Geol. Surv. Prof. Pap.**, 422, v. 1, p. 231-291, 1966.

BIGARELLA, J. J. Contribuição ao estudo da planície litorânea do Estado do Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, p. 65-110, 2001. ISSN 1516-8913.

BOKUNIEWICZ, H. Sedimentary systems of coastal-plain estuaries. **Geomorphology and Sedimentology of estuaries**, p. 49-68, 1995.

DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications: perspective. **Journal of Sedimentary Research**, v. 62, n. 6, 1992. ISSN 1527-1404.

DYER, K. R. **Coastal and estuarine sediment dynamics**. John Wiley & Sons, Inc, 1986. ISBN 0471908762.

DYER, K. R. **Estuaries: A physical introduction**. 2. Ed. Chichester: Wiley & Sons, 1997.

EMMET, W. W. A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler. **Geological Survey Professional Paper**, v. 1139. 1980.

ESRI. **ArcGis 10 Resource Center**, 2010. Disponível em: <http://links.esri.com/resources/>

FUNPAR - Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico da Universidade Federal do Paraná. **Estudo de impacto ambiental (EIA) de uma usina termelétrica na Baía de Paranaguá e do Porto de desembarque, subestação e linha de transmissão associados**. Companhia Paranaense de Eletricidade. Curitiba: GETEP, 1997. 1v. Relatório técnico.

HELLEY, E. J.; SMITH, W. Development and calibration of a pressure-difference bedload sampler. **GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT, DECEMBER 3, 1971. 18 P, 8 FIG, 2 TAB, 4 REF.**, 1971.

KOMAR, P. The transport of cohesionless sediments on continental shelves. **Marine sediment transport and environmental management: New York, Wiley**, p. 108-126, 1976.

LAMOUR, M. R. Dinâmica sedimentar do Canal da Galheta, via de acesso ao Porto de Paranaguá. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 51, 2000. ISSN 0067-964X.

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. C. Mapas de parâmetros texturais de sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, 2004. ISSN 0067-964X.

LANA, P.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: (Ed.). **Coastal marine ecosystems of Latin America**: Springer, 2001. p.131-145. ISBN 3642086578.

LEEDER, M. R. M. R. Sedimentology: process and product. 1982 1982. ISSN 0-04-551053-9; 0-04-551054-7.

LESSA, G. C.; MEYERS, S. R.; MARONE, E. Holocene stratigraphy in the Paranaguá Bay estuary, southern Brazil. **Journal of Sedimentary Research**, v. 68, n. 6, 1998. ISSN 1527-1404.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da Dinâmica Hídrica e do Material Particulado em Suspensão na Baía de Paranaguá e em sua Bacia de Drenagem**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 169p., 1999.

MANTOVANELLI, A.; MARONE, E.; SILVA, E. T.; LAUTERT, L. F.; KLINGENFUSS, M. S.; PRATA-JR, V. P.; NOERNBERG, M. A.; KNOPPERS, B. A.; ANGULO, R. J. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 59, n. 4, p. 523-537, 2004. ISSN 0272-7714.

MARONE, E.; SOARES, C. R. **Caracterização física do complexo estuarino da Baía de Paranaguá**. Pontal do Sul: UFPR, 1997. Relatório consolidado do convênio APPA/CEM

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the estuarine complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. **Nerítica**, v. 11, n. 1-2, p. 95-107, 1997.

MEYER-PETER, E.; MÜLLER, R. Formulas for bed-load transport. **Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research**, 1948, Stockholm. p.39-64.

MIRANDA, L. B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários Vol. 42**. Edusp, 2002. ISBN 8531406757.

MOREIRA, L. F. F.; MARIN, E. M. Fator de encobrimento e seletividade no transporte: análise do fenômeno e estudo experimental. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 1998, v.3, p.53-63

NOERNBERG, M.A.; MARONE, E.; ANGULO, R.J. Coastal currents and sediment transport in Paranaguá Estuary Complex navigation channel. **Boletim Paranaense de Geociências**, 2007, 60-61:45-54

PERILLO, G. M. E. Definitivos and geomorphologic classifications of estuaries. **Geomorphology and Sedimentology of estuaries**, p. 17-47, 1995.

POSSENTI, S. **Características do transporte sedimentar em um delta de maré enchente no litoral do Paraná**. 2009. Monografia de Graduação (Bacharelado em Oceanografia) Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná. Pontal do Paraná, PR.

PRANDLE, D. **Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation and morphology**. Cambridge University Press, 2009. ISBN 0521888867.

PRITCHARD, D. W. What is an estuary: physical viewpoint. **Estuaries**, v. 83, p. 3-5, 1967.

RAUDKIVI, A. J. **Loose boundary hydraulics**. CRC Press, 1998. ISBN 9054104481.

SOULSBY, R. **Dynamics of marine sands: a manual for practical applications**. Thomas Telford, 1997. ISBN 072772584X.

SOUZA, M. M. **Caracterização do Transporte Sedimentar na Desembocadura Sul do Complexo Estuarino de Paranaguá**. Monografia de Graduação (Bacharelado em Oceanografia) Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná. Pontal do Paraná, PR. 51p., 2012.

VAN RIJN, L. C. Sediment transport, part I: bed load transport. **Journal of hydraulic engineering**, v. 110, n. 10, p. 1431-1456, 1984. ISSN 0733-9429.

VARELLA, C. A. A.; JUNIOR, D. G. S. **Estudo do interpolador IDW do Arcview para utilização em Agricultura de Precisão**. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 26p., 2012.