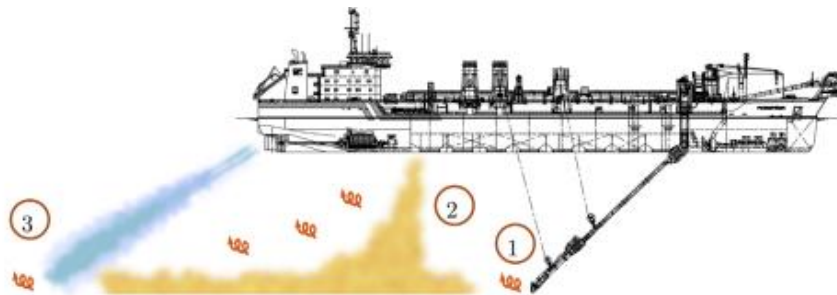




## **Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia Para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

### **Estudo da Dinâmica da Pluma de Sedimentos Oriundos de Actividades de Dragagens- Estuário da Beira**



Autor

**Nélio Das Neves Olívio Siteo**

Quelimane, 2019



## **Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras**

Monografia Para Obtenção do Grau de Licenciatura em Oceanografia

### **Estudo da Dinâmica da Pluma de Sedimentos Oriundos de Actividades de Dragagens- Estuário da Beira**

**Autor**

Nélio Das Neves Olívio Siteo

**Supervisor**

Ph.D. Avelino Langa

---

Quelimane, 2019

## **Dedicatória**

*“A sabedoria do homem faz brilhar o seu rosto, e a dureza do seu rosto se muda” 8.2*

*“Quem guardar o mandamento não experimentara nenhum mal; e o coração do sábio discernirá o tempo e o modo” 8.5*

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Jesus o Cristo, aos meus Pais Alexandrina Piedade, António Siteo e aos meus irmãos Luinel, Dário, Titos por me amarem e apoiarem em todas as circunstancias, vos amo muito.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus pela salvação da minha alma e vida durante o período cursando Oceanografia a ele seja louvado e exaltado para sempre.

Aos meus pais (Alexandrina Piedade e António Siteo), irmãos (Luinel, Dário, Titos) por acreditarem em mim e pelo apoio incondicional que sempre dedicaram a mim, Tios (Neves, Anita, Gil) e Primos (Laida, Kátia, Leila, Aristides) por me apoiarem mesmo distante.

Aos meus orientadores José Luís Pinho por me fornecer o modelo Delft3D e me encorajar a trabalhar, António Fernandes da Silva por acreditar que seria capaz de realizar este trabalho e me ajudar com informações relevantes do trabalho e Avelino Langa por dedicar tempo, paciência para me orientar e me colocar nos trilhos, muito obrigado a todos de coração.

Aos docentes da Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras em especial o Msc Teófilo Ferraz e Msc Noca Furaca pelos ensinamentos e apoio em para o meu aprendizado.

Aos meus amigos e parentes da fé, José Leonel, Júlia Cumbana, Agostinho Campira, Ganiza, Ricardo Mapulende, Levistónia Cumbe, Ivete da Gloria, Cacilda Mandlate e Sarmiento pelo amor, aconchego e por estarem sempre do meu lado, ganhei direcção de vida graça a vocês que Deus me deu.

Aos meus colegas de faculdade Anselmo Chaúque, Sónia Langa, Ana Madeira, Géscica Canivete, Adelina, Gerson, Oldim, Nora, Rocina, Nesia pelo carinho, companheirismo e por se mostrarem prontos para ajudar, muito obrigado a todos.

Aos meus afilhados Inácio Mariano, Hercildo, Arsénia e Farida pelo carinho e por se mostrarem disponíveis para me ajudar em todos os momentos, muito obrigado.

### **Declaração de honra**

Declaro que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, da Universidade Eduardo Mondlane.

Quelimane, 2019

Assinatura

---

(Nélio Das Neves Olívio Siteo)

## **Resumo**

O estuário da Beira é muito importante como um sistema marinho em Moçambique, contribuindo com biodiversidade e com melhores centros de pesca, é ainda importante para gestão portuária da cidade da Beira, sendo este o segundo maior porto de Moçambique a elevada movimentação de navios de grande calado implica manutenção do canal de acesso ao porto visto que tem sofrido grandes assoreamentos. As dragagens incontestavelmente têm influências no ambiente marinho e pode afectar temporariamente a abundância e distribuição de espécies marinhas, alteração da circulação e batimetria.

Este estudo foca a dispersão da pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagens no estuário da Beira, foi realizado com base na modelação e simulação computacional (modelo Delft3D).

Os resultados das simulações mostraram que as correntes de marés influenciam mais no transporte da pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagens na superfície e no transporte do fundo do que outras forçantes, as descargas fluviais de cheias têm contributo no transporte de sedimentos em suspensão, velocidades de ventos acima de 6 m/s são relevantes para a dispersão da pluma (induzindo correntes superficiais que transportam sedimentos), as correntes de marés seguem a configuração do canal de acesso ao porto da Beira, a concentração de sedimentos próximo à superfície foi menor relativamente próximo ao fundo, a pluma de sedimento volta a depositar-se no canal de acesso.

**Palavra-chave:** Modelação numérica computacional, Pluma de sedimentos, Forçantes estuarinas

## **Lista de Abreviaturas, Significados e Unidades**

JICA – Agência Japonesa para a Cooperação Internacional (Japan International Cooperation Agency)

$C_D$  – Coeficiente de arrasto do vento

ZMT – Zona de máxima turbidez

NEDECO – Netherlands Engineering Consultants

TSHD – Trailing Suction Hopper Dredge

UTM – Universal Transverse Mercator

INAHINA – Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação

CFM – Caminhos de Ferro de Moçambique

ARA-Centro – Administração Regional de Aguas do Centro

CDO – Climate Data Online (<https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/georegion>)

APDRC – Asian Pacific Data Research Center (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/>)

ASCAT – Advanced Scatterometer (Surface Wind Fields Level 3)

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer (infrared satellite)

SMAP (SSS) – NASA Soil Moisture Active Passive (Sea Surface Salinity)

TMD – Tide Driver Model

Consultec – Consultores Associados, Lda

2D, 2DH, 3D – Duas Dimensões, Duas Dimensões Hidrodinâmico, Três Dimensões

m/s – Metros por segundo

m – Metros

kg/m<sup>3</sup> – Quilograma por metro quadrado

m<sup>3</sup>/s – Metros cúbicos por segundo

mm/s – Milímetro por segundo

km – Quilómetros

kg/s – Quilogramas por segundo

m/s<sup>2</sup> – Metro por segundo quadrados

s/m<sup>1/3</sup> – Segundo por metro elevado a um sobre três

m<sup>2</sup>/s – Metro cubico por segundo

m<sup>3</sup>/s/m – Metro cubico por segundo, por cada metro



## Lista de figuras

<b>Figura 1:</b> (a) Mapa geral de Moçambique. (b) Localização do estuário da Beira em Sofala, Moçambique. Acoplada a grelha computacional de 55242 células (direcções $M= 208$ e $N= 343$ ) com espaçamento $\Delta x=150$ m e $\Delta y= 50$ m nas regiões mais finas. (c) Batimetria de toda área modelada.....	4
<b>Figura 2:</b> Secções de dragagem e locais de deposição (activo D4).....	7
<b>Figura 3:</b> Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente estacionária. As amplitudes da maré estarão desfasadas de $90^\circ$ (ou $270^\circ$ ) em relação as velocidades das correntes.....	8
<b>Figura 4:</b> Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente progressiva. As amplitudes da maré estarão em fase (ou desfasadas de $180^\circ$ ) com as velocidades das correntes. ....	9
<b>Figura 5:</b> Coeficiente de arrasto como função da velocidade do vento a 10 m acima da superfície do mar.....	10
<b>Figura 6:</b> Fonte de sedimento na coluna de água pela draga TSHD. (1) Arrasto pela cabeça do tubo de sucção; (2) Overflow; e (3) Distúrbio pelas hélices. ....	13
<b>Figura 7:</b> Vista de cima de um cenário de modelação da pluma onde encontram-se os campo proximo, zona de transicao e campo longinco. ....	14
<b>Figura 8:</b> Malha computacional com interpolação da batimetria e os pontos de observação. S14-1, S14, S13, S12, S11, S10 (Curva de Macuti), S9, S8, S7, S6-S15 correspondem a pontos de observação ao longo do canal de acesso ao porto da Beira; D4 corresponde ao ponto de observação no local de deposição sedimentos dragados; Beira-Gauge corresponde ao ponto de observação exactamente no Marégrafo no porto da Beira; Vertical e Horizontal corresponde a uma linha vertical e horizontal respectivamente (secção transversal) usada para calcular fluxos que passam pela secção e Pungue que é a boca do estuário do rio Púnguè.....	17
<b>Figura 9:</b> Comparação das velocidades de vento entre zona interior (terra, linha azul) e zona exterior (mar, linha vermelha). ....	19
<b>Figura 10:</b> Comparação entre a maré observada e astronómica para o porto da Beira. ....	20
<b>Figura 11:</b> Oscilação da maré no porto da Beira, durante 31 dias de simulação.....	26
<b>Figura 12:</b> Velocidade [m/s] e direcção da corrente de maré para todo o canal de acesso ao porto da Beira. (a) Vazante da maré de sizígia; (b) Enchente da maré de sizígia; (c) Vazante da maré de quadratura; (d) Enchente da maré de quadratura. Note que as barras de cores são específicas para Maré de sizígia e Quadratura. ....	28

<b>Figura 13:</b> Descarga acumulada de água em $m^3$ para as secções Vertical (linha azul) e Horizontal (linha vermelha). .....	29
<b>Figura 14:</b> Representação das zonas de acumulação (representada por valores positivos) e erosão (representados por valores negativos) de sedimentos.....	30
<b>Figura 15:</b> Concentração/Pluma de sedimentos na superfície devido a draga e a condição normal do estuário. (a) Concentração/Pluma de sedimentos na Vazante da maré de Sizígia; (b) Concentração/Pluma de sedimentos na Enchente da maré de Sizígia; (c) Concentração/Pluma de Sedimentos na Vazante da maré de Quadratura; (d) Concentração/Pluma de sedimentos na Enchente da maré de Quadratura. Note que as barras de cores são específicas para Maré de Sizígia e de Quadratura. ....	32
<b>Figura 16:</b> Transporte de sedimentos: somatório do transporte em suspensão e o transporte de carga do fundo. Note que é o somatório de todas as fracções de sedimentos (areia, areia fina e lodo). Note que este transporte é da condição normal do estuário mais a pluma oriundas de dragagem. ....	35
<b>Figura 17:</b> (a) Velocidade e direcção da corrente devida as descargas fluviais. (b) Transporte total (em suspensão e de carga de fundo) de sedimentos considerando todas as fracções de sedimentos (areia, areia fina e lodo) devida a correntes de descargas fluviais. Note que a elipse representa a dispersão da pluma oriundas de actividades de dragagem. ....	36
<b>Figura 18:</b> (a) Correntes induzidas pelo vento; (b) Transporte total (na superfície e no fundo) de todas as fracções de sedimentos; (c) Velocidade e direcção do vento que induziu a corrente superficial.....	37
<b>Figura 19:</b> Oscilação da maré no porto da Beira, durante 31 dias de simulação.....	26

## **Lista de tabelas**

<b>Tabela 1:</b> Tipos de dragas.....	6
<b>Tabela 2:</b> Descrição dos dados usados para implementação do modelo, fornecedores dos dados e observações relativas aos dados. ....	15
<b>Tabela 3:</b> Parâmetros e constantes usadas no modelo. ....	22
<b>Tabela 4:</b> Descrição das simulações controladas. ....	23
<b>Tabela 5:</b> Concentração de todas as fracções de sedimentos (areia, lodo, areia fina) na superfície para os 4 principais pontos de observação.....	34

## Índice

Dedicatória.....	I
Agradecimentos.....	II
Declaração de honra .....	III
Resumo .....	IV
Lista de Abreviaturas, Significados e Unidades .....	V
Lista de figuras .....	VII
Lista de tabelas .....	VIII
1. Introdução .....	1
1.1. Problematização.....	2
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Objectivo Geral .....	3
1.3.2. Objectivos Específicos .....	3
1.4. Área de estudo .....	3
1.5. Revisão de Literatura .....	5
1.5.1. Dragagens .....	5
1.5.1.1. Tipos de dragas .....	5
1.5.1.2. Locais de dragagens e de deposição .....	7
1.5.2. Correntes de maré.....	7
1.5.3. Ventos (Tensão do Vento).....	10
1.5.4. Descargas dos Rios.....	10
1.5.5. Transporte de Sedimentos.....	11
1.5.5.1. Assoreamentos de Canais de acesso a Portos.....	12
1.5.6. Pluma causada pela actividade de dragagem .....	12

1.5.6.1.	Pluma gerada pela <i>TSHD</i> .....	12
1.5.6.2.	Pluma de campo próximo e campo longinco .....	13
2.	Materiais e Métodos .....	15
2.1.	Materiais.....	15
2.2.	Método .....	16
2.2.1.	Digitalização da carta Náutica .....	16
2.2.2.	Definição de fronteiras fechadas do sistema.....	16
2.2.3.	Desenvolvimento da malha computacional e interpolação de batimetria .....	16
2.2.4.	Estabelecimento de condições iniciais .....	18
2.2.5.	Estabelecimento das condições de contorno.....	18
2.2.6.	Simulação da pluma (atribuição de uma fonte de sedimentos).....	21
3.	Resultados e Discussão.....	25
3.1.	Simulação da condição normal do Estuário (sem dragagem) .....	25
3.1.1.	Modelo 2DH (hidrodinâmica).....	25
3.1.2.	Modelo 2D (sedimentos) .....	30
3.2.	Simulação da pluma de actividades de dragagem .....	31
3.2.1.	Pluma considerando Corrente de maré, Descarga dos rios e Ventos .....	31
3.2.2.	Corrente de maré .....	34
3.2.3.	Descarga dos rios .....	35
3.2.4.	Vento .....	36
4.	Conclusão.....	38
5.	Limitações e Recomendações .....	39
6.	Referências Bibliográficas .....	40
Anexos	.....	42

## 1. Introdução

O processo contínuo de expansão portuária gera a demanda de infra-estrutura para atender um número cada vez maior de embarcações com um calado também cada vez maior. No caso de estuários, o comportamento hidrodinâmico é de difícil previsão, uma vez que geralmente existem muitas forçantes como correntes, ondas, marés, descargas fluviais e influências do vento. A actividade de dragagem é um processo contínuo de expansão portuária, mas consistem impactos ambientais por actividades de dragagem como a possível alteração do padrão de circulação, alteração das condições do local de deposição sedimentos dragados, poluição do ambiente por substâncias tóxicas que podem existir no ambiente, re-suspensão e transporte de sedimentos durante a actividade e alteração da qualidade de água (turbidez) (Castro e Almeida, 2012).

Desde a actividade de dragagem à deposição de sedimentos no local de deposição a formação de pluma é evidente dependendo das condições hidrodinâmicas do local, sendo que na actividade de dragagem, métodos como *overflow* são evidentes em dragas Auto-Transportadora de sucção (*overflow* – método pelo qual há remoção de excesso de água no tanque da draga para o ambiente marinho) onde há remoção de excesso de água no tanque da draga é acompanhado por sedimentos, formando pluma de sedimentos na superfície por *overflow* e no fundo pelo tubo de sucção (Van Rijn, 2019).

As correntes no interior do estuário da Beira são condicionadas pela topografia do fundo, sendo que a corrente principal segue o sentido do canal de acesso portuário (Nzualo, 2010; Silva, 2011).

Resultados do modelo de transporte de sedimentos realizado por Nzualo (2010) mostram que de um modo geral, são encontradas maiores vazões sólidas na sizígia, tanto da estação de verão quanto de inverno, entretanto, os valores das vazões que ocorrem no verão de sizígia superam os de inverno.

A mudança na duração da assimetria da maré durante 15 dias são explicados pela presença de bancos de areia e canais no local, e ainda a assimetria da corrente de maré actua como um mecanismo para a formação e manutenção de canais e bancos de areia do local e que ladeiam o canal de acesso ao porto da Beira (Nzualo, 2018).

Maior parte dos estudos sobre modelação numérica de dispersão de sedimentos oriundos de actividades de dragagens enfocam apenas nas áreas de deposição de sedimentos dragados, omitindo o impacto ambiental que pode ser gerado na operação de dragagem. Este impacto é consequência dos métodos usados na dragagem, que originam uma Pluma de sedimentos ao longo da região dragada durante a actividade de dragagem (Mattos, 2016).

Inserido nesse contexto, o estuário da Beira, possui grande movimentação portuária e um elevado tráfego de navios de grande porte. Esse quadro expõe a necessidade de planeamento estratégico para execução das inúmeras actividades de dragagem no local.

Este trabalho enfoca a dispersão da pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagens (durante a actividade e depois de ser depositado), avaliou o impacto da hidrodinâmica e outras forçantes na dispersão da pluma de sedimentos.

### **1.1. Problematização**

As dragagens e actividades relacionadas as dragagens incontestavelmente têm influências no ambiente marinho e pode afectar temporariamente a abundância e distribuição de espécies marinhas (Becker, 2011).

A re-suspensão de sedimento durante as actividades de dragagens, *overflow* e despejo resultam em grandes quantidades de sedimentos em suspensão na coluna de água. Isto poderá resultar no aumento da turbidez da água, reduzindo a penetração de luz, e, embora fisicamente seja pouco relevante, biologicamente tem implicações relevantes, em que o aumento da turbidez irá reduzir o nível de produtividade primária devido a falta de luz para a realização da fotossíntese (Van Rijn, 2019).

O processo de remoção de sedimento do canal de acesso ao porto da Beira em grandes quantidades de sedimentos (geralmente dragagens de emergências) pode significar uma provável alteração da batimetria do local. A dragagem pode alterar o padrão de circulação do local, isto em conjunto com a deposição de sedimentos visto que com a deposição há criação de bancos artificiais que irão resultar na alteração do curso e direcção das correntes de água da região.

Durante a dragagem, usando tecnologia de sucção, é acompanhado da re-suspensão de sedimentos, quer durante a fase de sucção dos dragados e do processo de *overflow* como também durante o despejo dos sedimentos.

Ao longo do canal de acesso ao porto da Beira predomina mais areias excepto na curva de Macuti onde abunda sedimento fino. Durante as actividades de dragagens, exactamente na curva de Macuti irá ocorrer grande dispersão de sedimentos, por serem finos e sobretudo as correntes de maré na vazante serem fortes (Consultec, 2007).

## **1.2. Justificativa**

O estuário da Beira é muito importante para gestão portuária da cidade da Beira, sendo este o segundo maior porto de Moçambique a elevada movimentação de navios de grande calado implica manutenção do canal de acesso ao porto visto que tem sofrido grandes assoreamentos. A dragagem é o principal meio para a manutenção do canal por conta de elevados níveis de assoreamento, e é importante que se saiba como realizar a actividade de dragagem por conta das consequências que podem advir da actividade. Por conta da actividade de dragagem causar uma pluma de sedimentos é importante adquirir conhecimento sobre concentração de sedimentos que é re-suspenso e quantificar o transporte da pluma no estuário da Beira, por ser um estuário com elevada biodiversidade marinha. Inserido neste contexto, este estudo tornou-se relevante por abordar um aspecto ambiental considerado actualmente como *não relevante* por estudos de impacto ambiental; a dispersão da pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagens.

## **1.3. Objectivos**

### **1.3.1. Objectivo Geral**

Estudar a dinâmica da pluma de sedimentos oriundas de actividades de dragagens no estuário da Beira usando o Modelo computacional Delft3D.

### **1.3.2. Objectivos Específicos**

- Avaliar o impacto individual e colectivo da corrente de maré, descarga dos rios e ventos na dispersão e concentração de sedimentos oriunda durante a actividade de dragagem.
- Estimar a largura e o alcance da pluma de sedimentos.

## **1.4. Área de estudo**

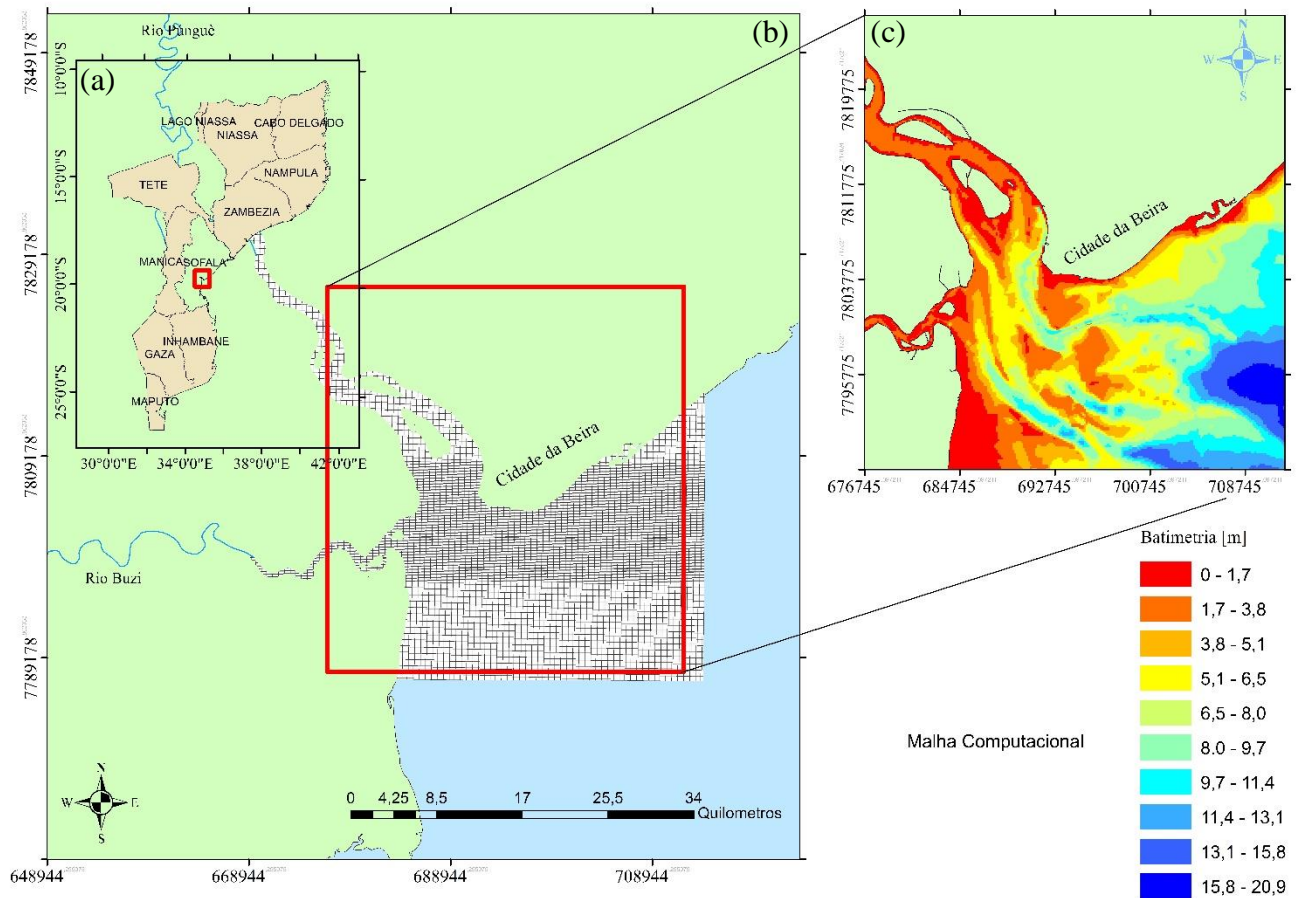
A área de estudo do presente projecto, compreende o estuário da Beira que se localiza na região central de Moçambique província de Sofala.

O estuário do rio Púnguè (Beira) tem uma embocadura de aproximadamente 10 km de comprimento, com presença de bancos de areia e uma média de profundidade de 10 m. Macro marés semidiurnas são dominantes no estuário com alturas maiores a 6 m durante as marés de sizígia (Nzualo, 2018).

Beira é a cidade capital da província de Sofala (Moçambique) é a segunda maior cidade de Moçambique e detém o segundo maior porto de Moçambique construído próximo a foz e margem esquerda do rio Púnguè. Beira é caracterizada por um clima tropical húmido com duas estações climáticas

bem distintas: a estação chuvosa de Outubro a Março e a estação seca, de Abril a Setembro, sendo a região dominada por massas de ar nevoentas e chuvas convectivas, mas também ciclónicas (Consultec, 2007).

A região estuarina (figura 1) é caracterizada por um sistema de deltas dos rios Púnguè e Búzi que compreende regiões cobertas por mangal de mangal e a baixa região costeira e pantanosa que é grandemente influenciada pelas marés.



**Figura 1:** (a) Mapa geral de Moçambique. (b) Localização do estuário da Beira em Sofala, Moçambique. Acoplada a grelha computacional de 55242 células (direções  $M= 208$  e  $N= 343$ ) com espaçamento  $\Delta x=150$  m e  $\Delta y= 50$  m nas regiões mais finas. (c) Batimetria de toda área modelada.



## **1.5. Revisão de Literatura**

A presente revisão de literatura aborda assuntos relevantes sobre o trabalho com vista a um enquadramento teórico onde conceitos principais como dragagens, tipos de dragagens, corrente de maré, ventos, descargas dos rios, transporte de sedimentos, pluma causada pela actividade de dragagem foi abordado.

### **1.5.1. Dragagens**

Dragagem em um processo de remoção, desobstrução, alargamento e remoção do material do fundo (sedimentos) em estuários, rios e canais de acesso a portos com o objectivo de fazer manutenção do canal e aumentar profundidades de navegação em canais para entrada e navios de grande tonelagem (Mattos, 2016).

As dragagens são consequências antrópicas que levam a dispersão de sedimentos em estuários (Mattos, 2016).

Os três elementos essenciais da dragagem são: escavação, transporte e despejo. Frequentemente, os elementos mais críticos são a escavação e o despejo de sedimentos no local do descarte devido a problemas de poluição ambiental. Em muitos casos, o material dragado deve ser despejado no estuário externo ou em mar aberto. Despejar em rios e estuários internos geralmente não é permitido se o material dragado estiver poluído (Van Rijn, 2019).

#### **1.5.1.1. Tipos de dragas**

A dragagem pode ser efectuada por dois tipos de dragas, classificadas em mecânica e hidráulica sendo que cada uma destas possui diferentes tipos de mecanismo e operação.

As dragas hidráulicas como as Auto-transportadoras no seu funcionamento e conforme os tanques das dragas se vão enchendo, é necessário eliminar a água excedente fazendo-a transbordar para fora da embarcação, no qual tal processo é designado de *overflow* (Consultec, 2007). As dragas hidráulicas são mais adequadas para a remoção de areia e silte pouco consolidado, removendo e transportando o sedimento na forma líquida. São em geral bombas centrífugas, accionadas por motores a diesel ou eléctricos, montadas sobre barcas e que descarregam o material dragado através de tubulações que variam de 0,15 m a 1,2 m de diâmetro, mantidas sobre a água através de flutuadores. A bomba produz vácuo na entrada da tubulação e a pressão força água e sedimento através da tubulação (Mattos, 2016).

As dragas mecânicas são utilizadas para a remoção de cascalho, areia e sedimentos muito coesivos, como argila, turfa, e silte altamente consolidado. Estes tipos de dragas remove sedimentos de fundo

através da aplicação directa de uma força mecânica para escavar o material, independente de sua densidade (Mattos, 2016).

Para dragar o canal de acesso ao porto da Beira usa-se dragas Auto-transportadoras que é do tipo hidráulico.

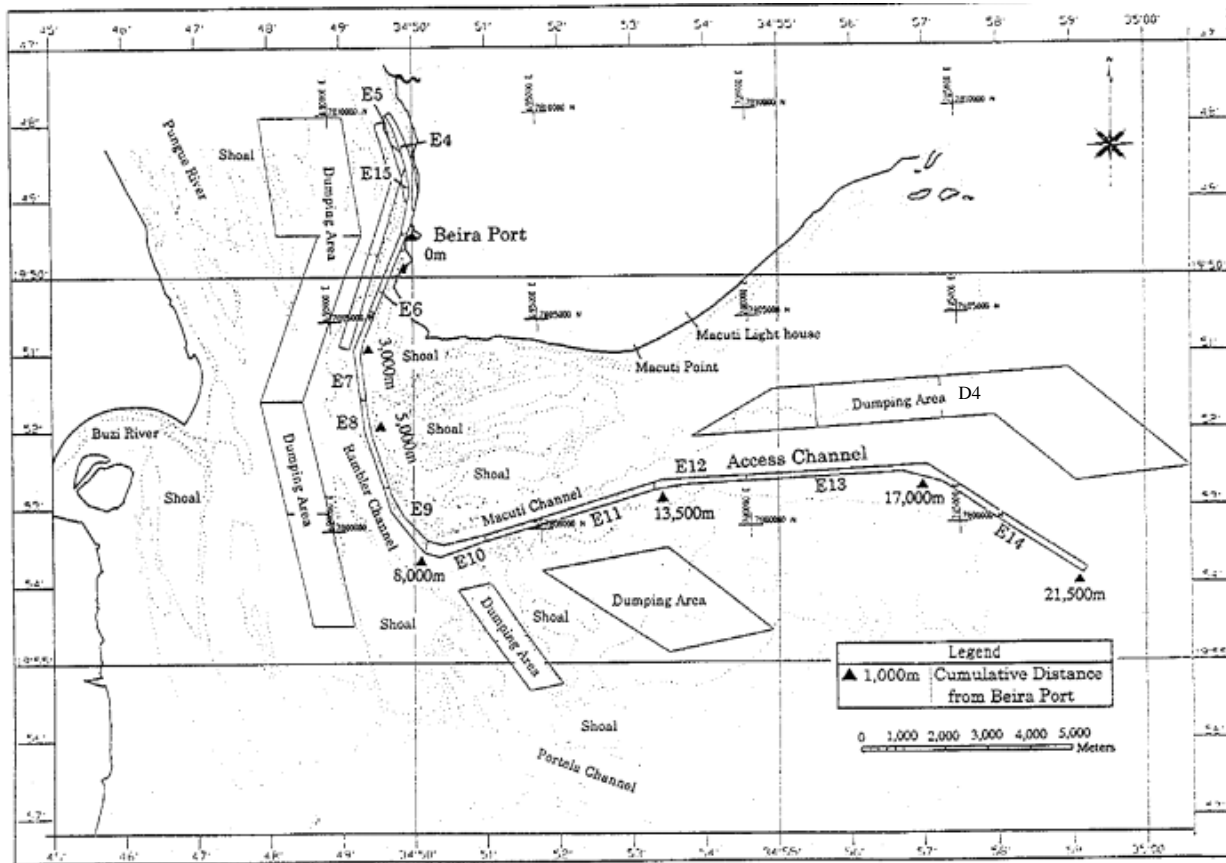
**Tabela 1:** Tipos de dragas. Fonte (Consultec, 2007)

<b>Categoria</b>	<b>Tipo</b>
Mecânica	Dragas de Alcatruzes ( <i>bucket dredge</i> )
	Dragas de báscula ( <i>grab dredge</i> )
	Dragas escavadoras ( <i>dippert dredge</i> )
Hidráulica	Dragas de sucção ( <i>suction dredge</i> )
	Dragas de sucção com desagregadores ( <i>cutter suction dredge</i> )
	Dragas Auto-transportadoras de sucção ( <i>trailing hopper dredge</i> )

Actualmente a Emodraga faz a dragagem com a draga do tipo Auto-transportadoras de sucção TSHD.

### 1.5.1.2. Locais de dragagens e de deposição

O canal de acesso ao porto da Beira conta com 15 secções que são realizadas as dragagens e 5 locais de deposição de sedimentos dragados definidas em 1998 pela companhia Japonesa JICA, sendo que actualmente o local de deposição de sedimentos é o D4 (vide a figura 2).



**Figura 2:** Secções de dragagem e locais de deposição (activo D4) (JICA, 1998).

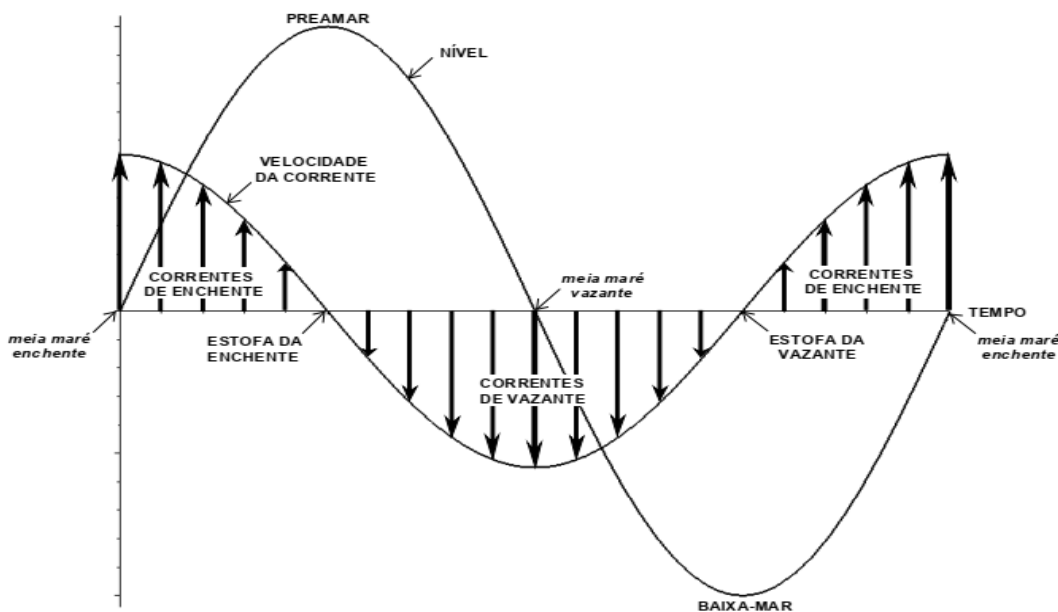
### 1.5.2. Correntes de maré

Considera-se maré a onda progressiva na qual as partículas da água descrevem órbitas fechadas situadas em planos verticais. A oscilação vertical das partículas superficiais chama-se maré, enquanto os movimentos horizontais das mesmas partículas chamam-se corrente de maré (Silva, 2011). Assad *et al.* (2009) afirmam que as correntes de maré podem ser definidas como movimentos horizontais periódicos da água causados pela subida e descida da maré. Regiões oceânicas abertas onde os movimentos oceânicos não são restringidos por nenhuma barreira continental as correntes de maré são constituídas de movimentos rotatórios. Em estuários, estreitos ou baías o fluxo associado à corrente de maré possui basicamente duas direcções, de acordo com o instante do ciclo de maré (enchente ou vazante) e passa

por períodos de corrente quase nulos, nos instantes de reversão da corrente, conhecido por estofo de maré.

Correntes de maré aumentam à medida que as ondas são diminuídas em águas rasas (The Open University, 1999). Segundo Stewart (2008) a corrente de maré pode ter velocidades de até 5 m/s nas águas costeiras, impedindo a navegação e mistura das águas costeiras, pode ainda colocar em suspensão s sedimentos do fundo em águas costeiras mesmo em águas profundas.

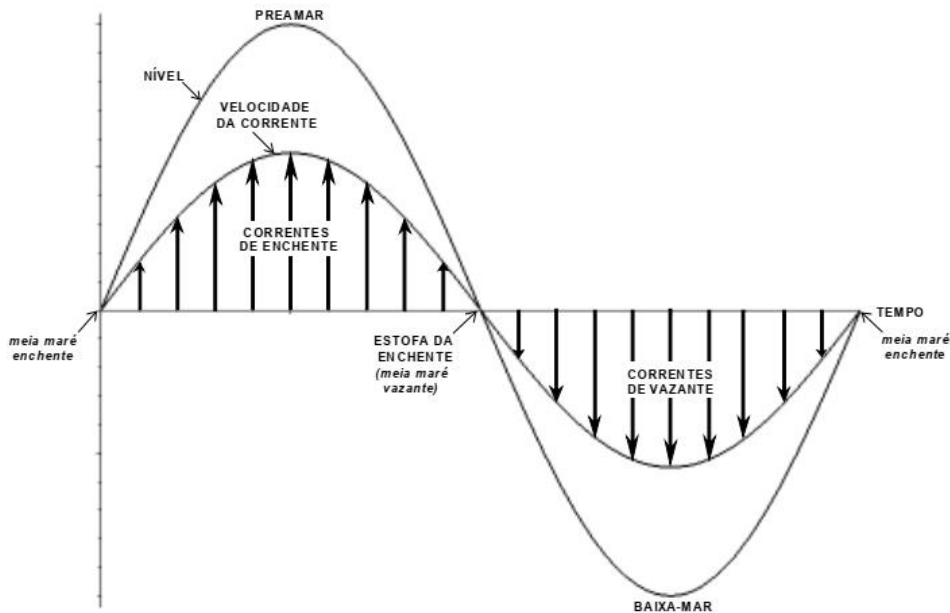
Segundo Nzualo (2010) a velocidade da corrente de maré em estuários depende da profundidade da coluna de água. As preamares (PM) e baixa-mares (BM) ocorrerão quase que simultaneamente em toda a extensão do corpo d'água e irão coincidir com o instante de inversão das correntes. As amplitudes da maré puramente estacionária (vide Figura 3) e as velocidades das correntes estarão desfasadas de  $90^\circ$  e as velocidades máximas das correntes de marés ocorrerão nos instantes em que o nível passa pelo nível médio.



**Figura 3:** Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de maré sintética idealizada puramente estacionária. As amplitudes da maré estarão desfasadas de  $90^\circ$  (ou  $270^\circ$ ) em relação as velocidades das correntes (Nzualo, 2010).

Quando a energia da onda de maré for completamente dissipada antes da reflexão, ou se o canal do estuário for infinitamente longo, então a onda de maré torna-se puramente progressiva (vide Figura 4). A amplitude da maré e a magnitude das correntes diminuem em direcção à cabeceira do estuário, havendo uma progressão nos instantes das preamares e baixa-mares em relação ao instante de inversão das

correntes. Assim, as amplitudes da maré e as velocidades das correntes estarão em fase, isto é, as velocidades máximas das correntes de maré de enchente irão ocorrer nos mesmos instantes das preia-mares e as velocidades máximas das correntes de vazante ocorrerão nos mesmos instantes das baixamares (Nzualo, 2010).



**Figura 4:** Relação entre as variações de níveis causados pela maré e velocidades de correntes em um sistema de onda de maré sintética idealizada do tipo puramente progressiva. As amplitudes da maré estarão em fase (ou desfasadas de  $180^\circ$ ) com as velocidades das correntes (Nzualo, 2010).

Segundo Graas e Savenije (2008), o Pungué é um estuário em forma de funil onde os bancos estão a convergir em direcção à montante. Os estuários em forma de funil são formados quando o suprimento de sedimentos do rio não é suficiente para manter o ritmo com a quantidade de sedimentos que é removido por ondas e correntes de maré. O sedimento em um estuário em forma de funil é o contrário de um estuário em forma de delta, não somente fluvial, mas também tem uma origem marinha desde a enchente e as ondas que trazem sedimento do mar. Entretanto, segundo JICA (1998) a corrente de vazante no estuário da Beira persiste por tempo mais longo do que a de enchente, porque a vazão fluvial resulta numa vazão residual rumo ao mar.

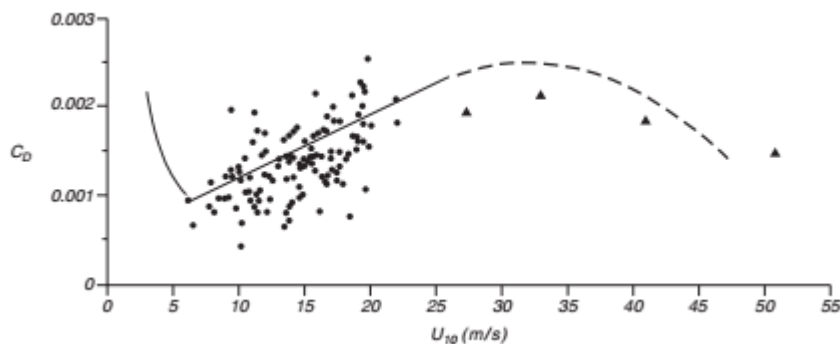
As medições realizadas pelo JICA (1998) no estuário mostraram que a corrente de vazante variavam entre 0.83 a 0.88 m/s e os de enchente entre 0.19 a 0.31 m/s, entretanto, as correntes mais intensas observadas foram as de vazante e da ordem de 2.5 m/s.

### 1.5.3. Ventos (Tensão do Vento)

O vento como tal não é muito importante como contributo para processos estuarinos. Neste caso o maior interesse é na força exercida pelo vento, ou o trabalho feito pelo vento na superfície do mar. A força horizontal do vento na superfície do mar é chamada tensão do vento. De outra forma é a transferência vertical do momento horizontal. Este momento é transferido da atmosfera para o oceano pela tensão do vento e é calculada (vide equação 2.3.1) a partir da velocidade do vento a 10 m de altura da superfície, densidade do ar e o coeficiente de arrasto. Este coeficiente de arrasto depende da velocidade do vento a 10 m (vide figura 5) (Stewart, 2008).

$$T = \rho_a \times C_D \times U_{10}^2 \quad (\text{equação 2.3.1})$$

Onde  $\rho_a = 1.3 \text{ kg/m}^3$  é a densidade do ar,  $U_{10}^2$  é a velocidade do vento a 10 m, e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto.



**Figura 5:** Coeficiente de arrasto como função da velocidade do vento a 10 m acima da superfície do mar (Stewart, 2008).

Segundo a Consultec (2007), no período de 1961 a 2005 a direção predominante do vento na estação do aeroporto na cidade da Beira foi de Sudeste (46%) seguido por uma ordem decrescente, dos quadrantes Este (23%), Sudoeste (13%) e Sul (8%), cabendo aos restantes, uma percentagem inferior a 4%.

### 1.5.4. Descargas dos Rios

As descargas máximas dos rios Púnguè e Búzi ocorrem no período chuvoso que compreende os meses de Dezembro e Janeiro, sendo que a média de fluxo das descargas destes rios no período seco decai para 13% ou 17% em relação ao período chuvoso (Nzualo, 2010). Segundo NEDECO (1982a), as descargas máximas dos rios Púnguè são de 600 e 80 m<sup>3</sup>/s e do Búzi de 300 e 50 m<sup>3</sup>/s para os períodos seco e chuvoso respectivamente.

A profundidade da água média ao longo do estuário do rio Púnguè é 3.3 m, mas na boca do estuário o canal principal pode ter mais de 6 m de profundidade (Graas e Savenije, 2008; Abas e Hagedooren, 2017).

### **1.5.5. Transporte de Sedimentos**

O transporte de sedimentos e as conseqüentes mudanças morfológicas em estuários são assuntos recorrentes em estudos actuais dados os diversos impactos ambientais possíveis e demais problemas associados, sobretudo para portos e canais de navegação (Mattos, 2016).

Os sedimentos dominam muitos processos estuarinos. Visto que as concentrações de sedimentos em suspensão em estuários são elevadas, as partículas coesivas (grãos muito finos) propensas a floculação e ricas em matéria orgânica são encontradas em estuários turvos. Estas partículas podem ser afectadas pelos ciclos de maré, as partículas frequentemente sofrem processos físicos como erosão, transporte e deposição. Dessa forma não só o aporte de sedimentos não coesivos pode gerar assoreamento, mas o aporte de sedimentos coesivos pode resultar em assoreamentos de canais de navegação, restringindo a operação portuária (Dyer, 1995).

O comportamento de sedimentos em suspensão é geralmente observado com base em valores de concentração, que pode ser representada pela razão entre volume de sólidos e volume de fluido ou em massa de sólido por volume de fluido. É possível perceber que a presença de sedimentos finos aumenta a viscosidade e a densidade do fluido, criando um efeito de retardo da velocidade de queda das partículas, ou velocidade de sedimentação (Van Rijn, 1993).

Os sedimentos com partículas de areia ( $d < 4 \mu\text{m}$ ) propriedades coesivas devido às forças electrostáticas. Conseqüentemente, as partículas de sedimentos não se comportam como partículas individuais, mas tendem a se agrupar formando agregados cujo tamanho, densidade e velocidade de sedimentação podem atingir valores muito maiores, influenciando o comportamento hidrodinâmico (Van Rijn, 1993).

O lodo é uma mistura de fluido e sedimento contendo águas salgadas, areias, siltes, argilas e matéria orgânica. A classificação das propriedades dessa mistura depende de uma série de parâmetros locais como velocidades de correntes, amplitude de ondas, densidade do material de fundo predominante, temperatura, salinidade e pH (Van Rijn, 1993). Essas particularidades levam a serem feitos estudos direccionados para as condições físicas particulares de determinadas regiões. Dependendo das características do estuário pode haver uma zona de máxima turbidez (ZMT), configurada geralmente pelo aporte fluvial de sedimentos influenciado pelas variações de maré (Mattos, 2016).

### **1.5.5.1. Assoreamentos de Canais de acesso a Portos**

O assoreamento de canais existe desde o início da operação portuária. Segundo o autor é importante a autoridade portuária definir a média anual de volume de sedimento a ser dragado assim como a composição desse, a fim de verificar possível contaminação (Mattos, 2016). As características de assoreamento estão fortemente associadas às condições físicas e ambientais, como salinidade, ventos, correntes, ondas e marés; e às condições geométricas, principalmente nas entradas de canais portuários.

### **1.5.6. Pluma causada pela actividade de dragagem**

Geralmente, os materiais dragados consistem em partículas /flocos de argila, silte e areia. A fracção com partículas <64 µm é conhecida como lama, a fracção entre 64 µm e 2000 µm (2 mm) é conhecida como areia (Van Rijn, 2019).

A fracção de lama <64 µm pode ser subdividida em:

- Fracção <4 µm; fracção coloidal (permanecendo em suspensão em todas as condições);
- Fracção <4-8 µm; velocidade de queda 0.03 mm/s (limite de floculação 0.25 mm / s);
- Fracção 8-16 µm; velocidade de queda 0.12 mm/s; (limite de floculação 0.25 mm / s);
- Fracção 16-32 µm; velocidade de queda 0.45 mm/s;
- Fracção 32-64 µm; velocidade de queda 1.8 mm/s.

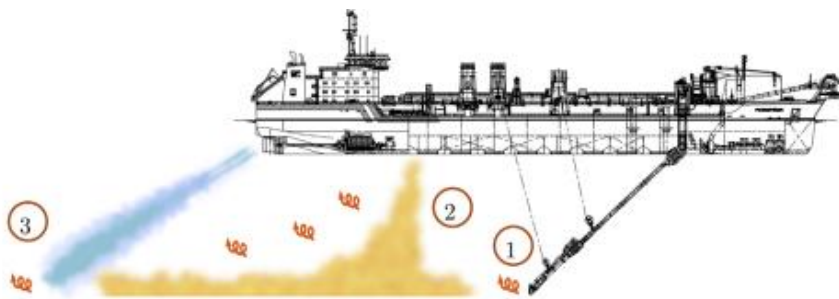
O aumento das concentrações de sedimentos em suspensão devido ao processo de dragagem é geralmente expresso como uma concentração total de sólidos em suspensão (em kg/m<sup>3</sup>; g/l ou em mg/l) (Van Rijn, 2019).

#### **1.5.6.1. Pluma gerada pela TSHD**

As dragas Auto-transportadoras de sucção e arrasto (*Trailing suction hopper dredge – TSHD*) são frequentemente usadas em muitos lugares e no canal de acesso ao porto da Beira.

As dragas desse tipo operam por meio de um sistema de ductos e braços de dragagem. Os implementos perfuradores e desagregadores nas extremidades são chamados de cabeça de dragagem e fazem a sucção dos sedimentos (vide figura 6) (Mattos, 2016).





**Figura 6:** Fonte de sedimento na coluna de água pela draga TSHD. (1) Arrasto pela cabeça do tubo de sucção; (2) Overflow; e (3) Distúrbio pelas hélices (Becker *et al.*, 2014).

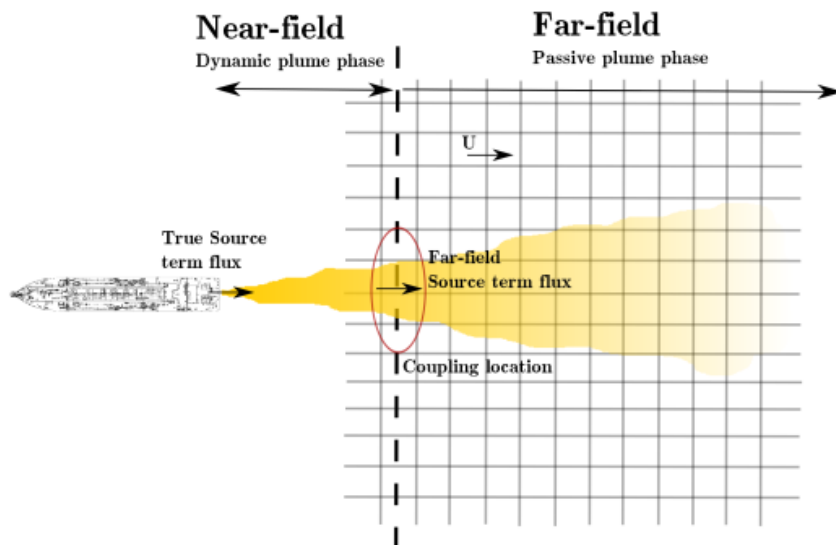
A draga TSHD suga uma mistura de sedimento e água do fundo para uma cisterna do navio. Do volume dragado, boa parte do sedimento se deposita no fundo da cisterna e o excesso de água é devolvido ao ambiente por meio de uma saída vertical ou horizontal (caso da draga operada na Beira) e com quantidades de sedimentos (Mattos, 2016).

A pluma de overflow é a principal fonte de sedimentos suspensos a partir de uma draga TSHD, entretanto, seu comportamento e a capacidade de visualização é variável. Uma pluma de sedimentos em suspensão oriunda de dragagem pode conter diâmetros de partículas, que varia desde areia com diâmetros maiores que 63  $\mu\text{m}$  à argila, com diâmetros menores. Por causa da menor velocidade de queda do sedimento na cisterna da draga, a pluma geralmente contém mais argila e areia fina do que o próprio material dragado (WIT, 2015).

#### **1.5.6.2. Pluma de campo próximo e campo longinco**

Campo longinco é definido como a zona próxima à draga onde ocorre a fase dinâmica da pluma (pluma dinâmica- pluma formada no momento da dragagem pela erosão do fundo e overflow na superfície) e a mistura da pluma é uma função de processos complexos (vide figura 7) (Becker *et al.*, 2014).

O termo campo próximo é usado para significar a zona fora da zona do campo próximo, onde a pluma se dispersa como pluma passiva (o resultado da pluma dinâmica arrastada pelas correntes) (vide figura 7) (Becker *et al.*, 2014).



**Figura 7:** Vista de cima de um cenário de modelação da pluma onde encontram-se os campo proximo, zona de transicao e campo longinco (Tuinhof, 2014).

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Materiais

No presente trabalho não foram feitas saídas de campo para a medição de parâmetros físicos necessários para implementação do modelo computacional Delft3D. No entanto, foi feita a compra de dados medidos por Instituições Nacionais.

Dados usados para implementação do modelo Delft3D alistam-se desde os meteorológicos, hidrodinâmicos, hidrológicos e hidrográficos como:

- Elevação da maré medida no porto da Beira para o ano de 2016 (66 dias de medição contado Setembro, Outubro e Novembro com intervalo de medição de 10 minutos);
- Descarga dos rios (Púnguè e Búzi) máximos;
- Velocidade e direcção do vento para o mês Dezembro de 2017;
- Volume de sedimentos dragados em períodos de dragagens de emergência para o ano de 2017 (Dezembro o mês escolhido, pelos maiores volumes dragados);
- Batimetria do local através da carta náutica 2014 (com actualização do canal com dados de 2017);
- Dados de Temperatura e Salinidade para o mês de Dezembro de 2017.

**Tabela 2:** Descrição dos dados usados para implementação do modelo, fornecedores dos dados e observações relativas aos dados.

Descrição dos dados	Fornecedor de dados	Observações
Elevação da maré	INAHINA	-
Descarga dos rios (nível hidrométrico)	ARA-Centro	Dados de nível hidrométrico
Velocidade e direcção do vento	CDO e APDRC	Dados CDO-medidos no aeroporto da Beira ( <i>in situ</i> ); dados APDRC-medidos pelo ASCAT (resolução espacial de 0.25°×0.25°)
Volume de sedimentos dragados	CFM	Dados de volume dragados por secção
Carta Náutica	INAHINA	-
Temperatura superficial	APDRC	AVHRR (resolução espacial de 0.25°×0.25°)
Salinidade	APDRC	SMAP (resolução espacial de 0.25°×0.25°)

## **2.2.Método**

Com vista a responder os objectivos do trabalho, para estudo da dinâmica da pluma de sedimentos foi usado o modelo computacional Delft3D em que foi feita uma simulação representativa da realidade da dinâmica da pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagem. A simulação foi realizada para o mês de Dezembro do ano 2017 (31 dias de simulação) pelo facto de se ter dragado quantidades muito maiores de sedimentos. A implementação foi feita seguindo os passos dos subtítulos que se seguem.

### **2.2.1. Digitalização da carta Náutica**

O *scanner* da carta náutica de aproximação ao porto da Beira ou do canal de acesso ao porto da Beira foi georreferenciada usando o módulo *image rectifier* do Mike DHI 2014 na sua versão demo e foi digitalizada no módulo *Mike zero*. A georreferenciação do *scanner* da carta consistiu em atribuir coordenadas cartesianas UTM (Universal Transverse Mercator) a uma grelha onde foi digitalizada tomando referência que zero hidrográfico (ponto referencial para medição de profundidades e alturas de marés) na carta encontra-se a 3.56 m abaixo do nível médio do mar; no entanto o trabalho nesta fase foi adicionar 3.56 m as cotas da carta para que a batimetria final estivesse referenciada ao nível médio do mar.

A carta náutica não cobre áreas dos estuários dos rios Búzi e Púnguè, entretanto foram usadas informações do trabalho Abas e Hagedooren (2017) que pelas medições de profundidade feitas no rio Púnguè os afirmam terem encontrado uma profundidade média de 3.3 m.

### **2.2.2. Definição de fronteiras fechadas do sistema**

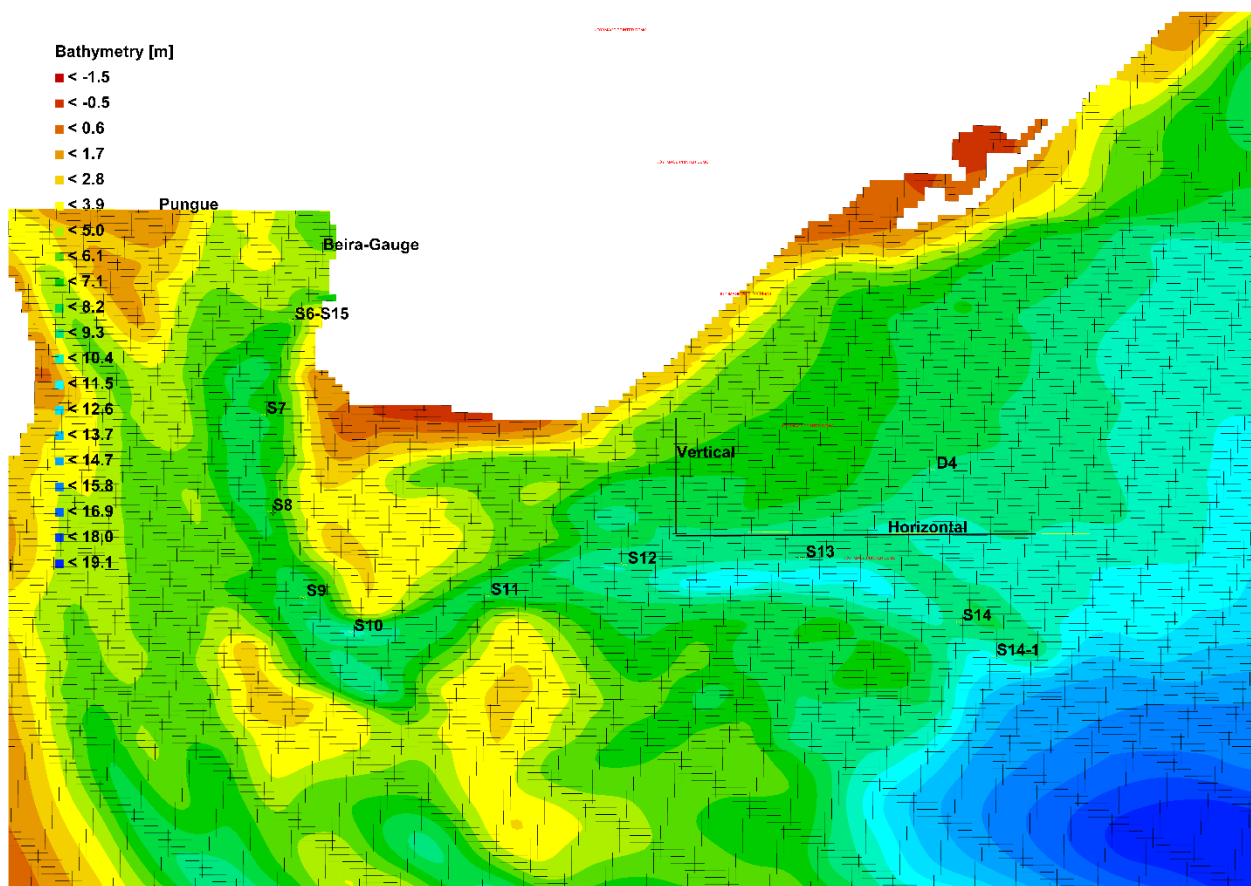
A definição de fronteiras fechadas foi realizada através de desenhos dos contornos da linha de costa no *Google Earth Pro*. No *Google Earth Pro* foi seleccionado a área do domínio do modelo incluindo 100 km nos rios Búzi e Púnguè a montante. Foi contada nessa fase ilhas e os contornos de costa na forma de polígonos (vide figura 1) para o desenvolvimento da malha computacional que será descrita no tópico abaixo.

### **2.2.3. Desenvolvimento da malha computacional e interpolação de batimetria**

O desenvolvimento da malha computacional foi realizado no módulo *RGFGRID* do modelo computacional Delft3D; onde foram utilizados os contornos de terra desenhados na forma de polígonos no *Google Earth Pro*. A malha computacional foi desenhada tendo o princípio de ajustar para os contornos de terra de modo a não ocupar a área coberta pelos polígonos de terra. A grelha feita foi ortogonal de 208 células na direcção M e 343 na direcção N e com um espaçamento nas regiões mais

abertas no oceano  $\Delta x = \Delta y = 150 \text{ m}$  e nas regiões próxima do canal de acesso ao porto da Beira (a região de interesse) com um espaçamento de  $\Delta x = 150 \text{ m}$   $\Delta y = 50 \text{ m}$  (vide a figura 8 com representação dos pontos de observação). A escolha do espaçamento foi devida ao processo que se simulou (sedimentos; nesse caso tinha que ser um espaçamento menor que o usado, mas por questões de tempo de computação optou-se por esse espaçamento) e pelo tempo de computação que levou a terminar a simulação; por fim foi gerado o ficheiro da malha computacional.

A batimetria foi interpolada no módulo *QUICKIN* do modelo computacional Delft3D; onde dados digitalizados no *Mike zero* foram usados para interpolação na malha computacional e gerado o ficheiro de batimetria. Nesta etapa foi calculada automaticamente o passo de tempo da simulação numérica para evitar erros de estabilidade usando o número de *Courant* onde foi determinado um passo de tempo de 30 segundos (0.5 minutos).



**Figura 8:** Malha computacional com interpolação da batimetria e os pontos de observação. S14-1, S14, S13, S12, S11, S10 (Curva de Macuti), S9, S8, S7, S6-S15 correspondem a pontos de observação ao longo do canal de acesso ao porto da Beira; D4 corresponde ao ponto de observação no local de deposição sedimentos dragados; Beira-Gauge corresponde ao ponto de observação exactamente no

*Marégrafo no porto da Beira; Vertical e Horizontal corresponde a uma linha vertical e horizontal respectivamente (secção transversal) usada para calcular fluxos que passam pela secção e Pungue que é a boca do estuário do rio Púnguè.*

#### **2.2.4. Estabelecimento de condições iniciais**

O estabelecimento de condições iniciais foi realizado através de atribuições de valores iniciais dentro do domínio do modelo. Valores de Salinidade, Temperatura, nível do mar e sedimentos no instante inicial da simulação (no dia 01 de Dezembro de 2017 as 0 horas). Nesta etapa foi calculada a profundidade limite em que a célula seria considerada seca com base na inequação abaixo (Deltares, 2017):

$$\delta \geq \frac{2\pi|a|}{T} \Delta t \quad (\text{equação 3.2.4.1})$$

Onde  $\delta$  é a profundidade limite;  $a$  é a amplitude da maré;  $\Delta t$  é passo de tempo (30 segundos) e  $T$  é o período de maré (12.42 horas = 44712 segundos). O que significa que acima do valor que foi calculado com base na inequação (3.2.4.1) pode ser usado mas o penalti é usar um valor abaixo do calculado.

#### **2.2.5. Estabelecimento das condições de contorno**

O estabelecimento das condições de contorno foi realizado atribuindo características de forçamento atmosférico (vento) e nas fronteiras abertas do modelo. A velocidade e direcção do vento foram inseridas nesta etapa como forçante atmosférica tendo sido usado as equações (3.2.5.1) e (3.2.5.2) (Stewart, 2008) para o cálculo do coeficiente de arrasto.

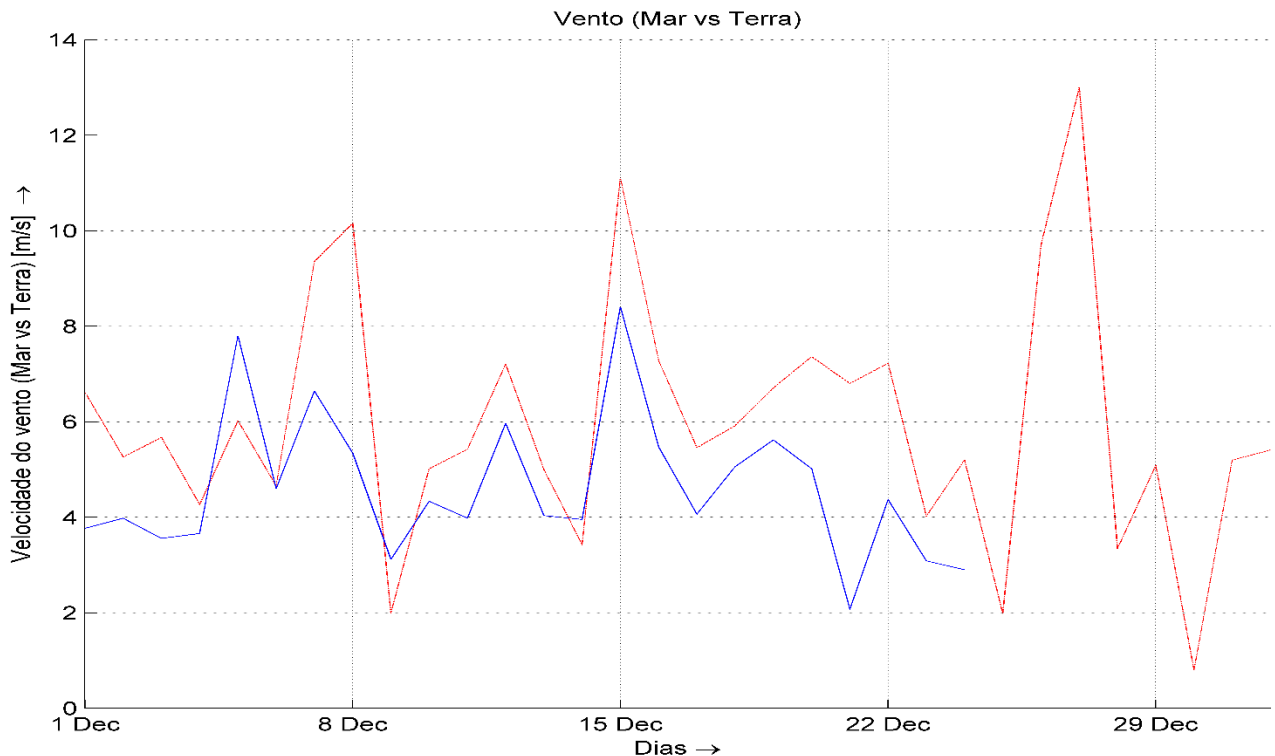
$$1000C_D = 0.29 + \frac{3.1}{U_{10}} + \frac{7.7}{U_{10}^2} \quad (3 \leq U_{10} \leq 6 \text{ m/s}) \quad (\text{equação 3.2.5.1})$$

$$1000C_D = 0.60 + 0.071U_{10} \quad (6 \leq U_{10} \leq 26 \text{ m/s}) \quad (\text{equação 3.2.5.2})$$

Onde  $C_D$  é o coeficiente de arrasto;  $U_{10}$  é a velocidade do vento a 10 metros acima da superfície do mar. O valor do coeficiente de arrasto foi calculado com base nas velocidades do vento e foram inseridas no modelo para o cálculo da tensão do vento.

Os dados de velocidade e direcção do vento de 1 dia de resolução temporal extraídos da plataforma APDRC (medição de satélite, no mar) foram comparados com os dados da plataforma CDO (medição *in situ* no aeroporto da Beira) de 1 hora de resolução temporal (feitas as medias diárias para comparação), com vista a decidir qual o melhor dado a ser usado (vide figura 9). Constatou-se que a melhor medição a ser usada é a medição de satélite, por ter menos espaços sem medição, por ser uma medição directa no mar (concretamente no domínio do modelo) e por ter maiores velocidades (o que faz sentido sendo a

zona costeira, e confere maiores  $C_D$  segundo as equações (3.2.5.1) e (3.2.5.2)); Assim conferindo esta escolha sendo lógica.



**Figura 9:** Comparação das velocidades de vento entre zona interior (terra, linha azul) e zona exterior (mar, linha vermelha).

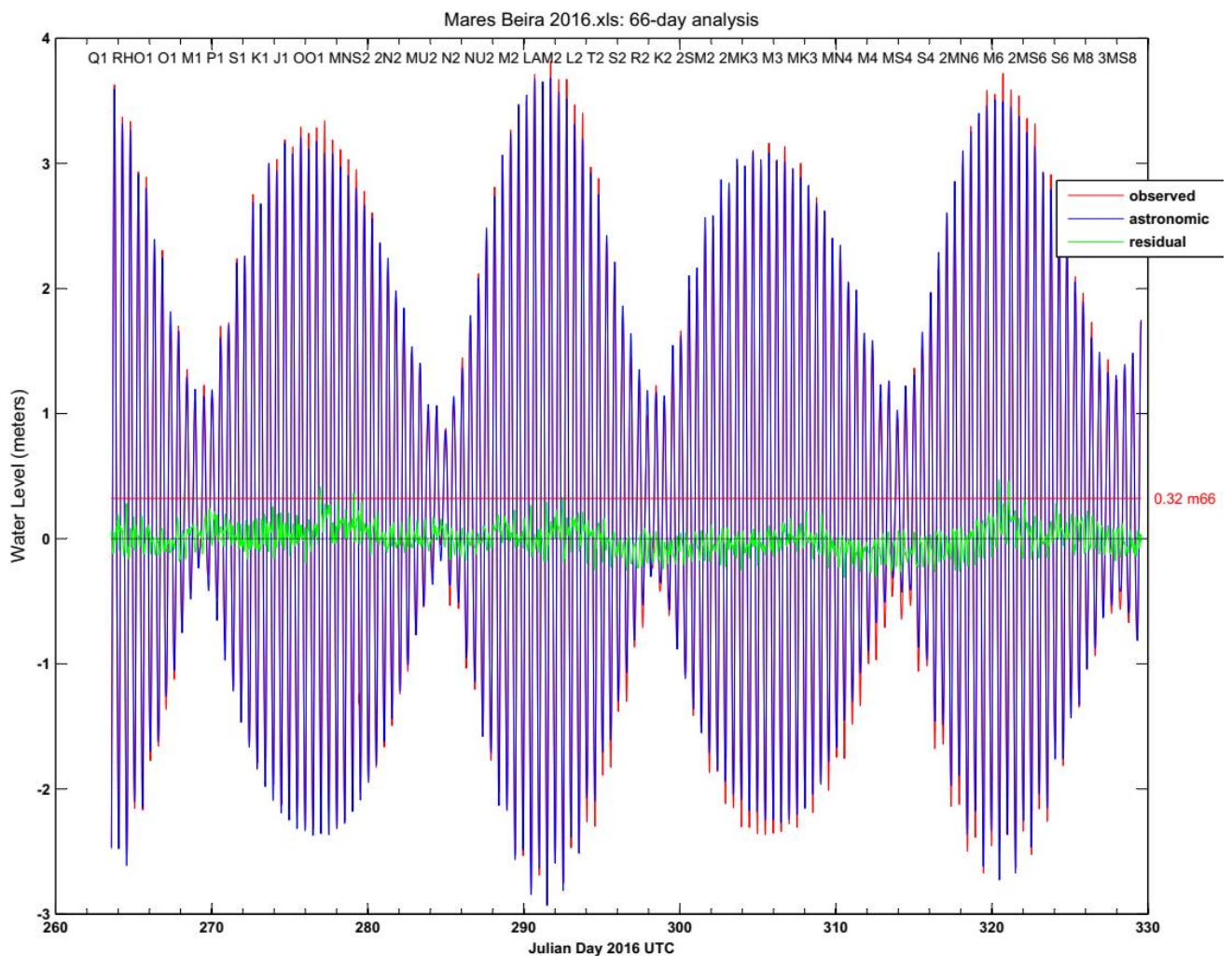
A velocidade e direcção do vento extraída da plataforma APDRC foi usada como velocidade e direcção do vento constante no espaço, ou seja, mesma velocidade e direcção para todo o domínio do modelo.

A inserção das forçantes nas fronteiras abertas foi realizada tendo em conta 4 fronteiras abertas; uma do estuário do rio Púnguè, uma do estuário do rio Búzi, uma a Este (fronteira do mar aberto) e uma a Sul (fronteira mar aberto) (vide figura 1 (b)).

As duas fronteiras do mar aberto foram atribuídas valores de constituintes astronómicas de maré (amplitude e fase de cada constituinte astronómica). A amplitude e fase da maré foram extraídas usando o modelo global *TPXO 9.1* no TMD (rotinas feitas em Matlab) nas fronteiras abertas, isto por estas fronteiras não estarem próximas a costa pois evita assim erros no cálculo da amplitude e fase da maré pelo modelo global. A amplitude e fase da maré inserida nas fronteiras do mar aberto foram calibradas usando o módulo *Delft3D-Triana* do modelo computacional Delft3D com constituintes calculadas

através dos dados observados em 2016 (dados de 66 dias) e ajustadas para melhor simulação da realidade hidrodinâmica da Beira.

As constituintes foram calculadas usando *World Tides and Current 2010* de Boon (2004) rotinas feitas em Matlab para realização de análise de maré a partir de dados observados. A análise foi feita considerando 35 constituintes e calculadas a amplitude e fase para as 35 constituintes. A escolha de 35 constituintes foi devida a série de dados que é acima de 58 dias (Boon, 2007), e pela análise feita as 35 constituintes são as melhores para fazer previsão. A figura 10 ilustra a maré observada e a astronómica para o mesmo período de 2016.



**Figura 10:** Comparação entre a maré observada e astronómica para o porto da Beira.

As duas fronteiras dos estuários dos rios Búzi e Púnguè foram atribuídas descargas de 300 m<sup>3</sup>/s e 600 m<sup>3</sup>/s respectivamente, que correspondem ao máximo de descargas no mês de Dezembro. A atribuição de



descargas máximas para o mês de Dezembro deveu-se ao facto dos dados fornecidos pela ARA-Centro serem dados de nível hidrométrico e estes difíceis de calcular a vazão dos rios.

### 2.2.6. Simulação da pluma (atribuição de uma fonte de sedimentos)

A atribuição de uma fonte de sedimentos no domínio do modelo foi feita considerando 3 fracções de sedimentos que são: lodo (18  $\mu\text{m}$ ), areia fina (64  $\mu\text{m}$ ) e areia (430  $\mu\text{m}$ ). Estas fracções fazem parte da composição do fundo segundo JICA (1998).

Para a estimativa da fonte da pluma pelas actividades de dragagem foi aplicada a método descrito por (Becker, 2011; Spearman *et al.*, 2011; Tuinhof, 2014) que consideram o seguinte:

Uma draga Auto-transportadora de sucção suga no fundo através do tubo de sucção a mistura de água e sedimento. Essa mistura de água e sedimento pode ser determinada pela concentração *in situ*, descarga da mistura, densidade da mistura seca e granulometria do sedimento. A medida que ocorre a sucção da mistura a sedimentação se dá início no local em que se draga isto resulta em uma pluma por overflow (o transbordamento de água é acompanhado por grandes quantidades de sedimentos caso concreto da Beira) e pela erosão no fundo pelo tubo. Relações empíricas para determinar a fonte de sedimentos que retorna para a coluna de água podem ser determinadas sabendo a Produção da TSHD e é estimado pelas seguintes equações:

$$Q_m = \frac{1}{4} \pi D^2 \cdot V_m \cdot n, \quad (\text{equação 3.2.6.1})$$

$$C_{situ} = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}, \quad (\text{equação 3.2.6.2})$$

$$P_s = Q_m \cdot C_{situ}, \quad (\text{equação 3.2.6.3})$$

$$\rho_{m,dry} = \rho_k \cdot \left(1 - \frac{\rho_k - \rho_m}{\rho_k - \rho_w}\right), \quad (\text{equação 3.2.6.4})$$

$$P = \rho_{m,dry} \cdot P_s \quad (\text{equação 3.2.6.5})$$

Onde  $Q_m$  é a fluxo da sucção da mistura água sedimento,  $D$  é o diâmetro do tubo de sucção,  $V_m$  é a velocidade de sucção da mistura,  $n$  é o número de tubos de sucção,  $C_{situ}$  é a concentração *in situ*,  $P_s$  é a taxa de produção *in situ*,  $\rho_{m,dry}$  é a densidade da mistura seca,  $\rho_m$  é a densidade da mistura água sedimento,  $\rho_w$  é a densidade da água,  $\rho_s$  é a densidade *in situ* do material,  $\rho_k$  é a densidade do grão de sedimento. Para poder determinar a pluma dinâmica  $B$ , a produção  $P$  deve ser multiplicada pela fracção de sedimentos de overflow  $f_{fines}$ , e a fracção de descarga de overflow  $f_{overflow}$ . A fonte da pluma dinâmica tem a seguinte forma:

$$B = P \cdot f_{fines} \cdot f_{overflow} \quad (\text{equação 3.2.6.6})$$

Sequencialmente é necessário traduzir esta fonte da pluma dinâmica em uma componente da fonte de pluma passiva. Podemos considerar uma componente  $x_1$  na superfície isto é, multiplicando a pluma dinâmica pelo factor  $f_{dyn}$  que compõe a pluma de superfície ou overflow considerado 5-15% para TSHD. Em adição à pluma passiva mais componentes devem ser adicionadas como arrasto pelo tubo de sucção, erosão do fundo pelas hélices e reentrada da pluma dinâmica,  $x_2, x_3$  e  $x_4$  respectivamente. A pluma passiva tem a seguinte forma:

$$x_1 = B \cdot f_{dyn}, \quad (\text{equação 3.2.6.7})$$

$$X = \sum_{i=1}^4 x_i \quad (\text{equação 3.2.6.8})$$

No final a produção de sedimentos pela draga é em kg/s que é a fonte de sedimento que a draga levanta e posteriormente introduzida no modelo como fonte de sedimento com o percurso da draga.

Os parâmetros ( $\rho_s, \rho_k, \rho_m$ ) para a determinação da  $\rho_{m, dry}$  extraída dos dados medidos por JICA (1998); o diâmetro do tubo de sucção e a velocidade de mistura foi fornecido pela equipa da Emodraga.

**Tabela 3:** Parâmetros e constantes usadas no modelo.

Parâmetro/Constante	Valor usado	Observação
Gravidade	9.81 m/s <sup>2</sup>	-
Densidade da água	1025 kg/m <sup>3</sup>	-
Densidade do ar	1.3 kg/m <sup>3</sup>	-
Rugosidade do fundo (coeficiente de <i>Manning</i> )	0.025 s/m <sup>1/3</sup>	Para areia fina que é mais dominante no estuário Beira adaptado de Deltares (2017)
Coeficiente de viscosidade turbulenta (água)	10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	Calculado com base na expressão apresentada por Van Rijn (1993)
Coeficiente de difusão turbulenta (sedimento)	10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s	Adaptado por Van Rijn (1993)
Densidade específica (sedimento)	2650 kg/m <sup>3</sup>	-
Densidade do fundo seca (sedimento; lodo, areia fina e areia)	486, 675 e 1644 kg/m <sup>3</sup>	Medidas por JICA (1998)
Passo de tempo ( <i>time step</i> )	30 Segundos (0.5 minutos)	-

A viscosidade da água foi calculada com base em:

$\nu = [1.4 - 0.031 \cdot (Te - 15) + 0.00068 \cdot (Te - 15)^2] \cdot 10^{-6}$  Onde  $Te$  é a temperatura da água °C. A rugosidade do fundo é apresentada pelo coeficiente de fricção de *Chézy*  $C = \frac{H^{1/6}}{n}$  usando o coeficiente de *Manning*  $n$  que é dado para diferentes tipos de superfície. Sendo que  $H$  é a profundidade na malha.

Para responder o primeiro objectivo específico, foram feitas simulações controladas num total de 5 simulações que estão representadas na tabela 4.

**Tabela 4:** Descrição das simulações controladas.

Nome da Simulação	Objectivo	Observações
Normal sem dragagem	Simular a condição normal do estuário sem actividade de dragagem	Realizada com o efeito da corrente de maré, vento e descarga dos rios
Normal com dragagem	Simular a condição normal do estuário com actividade de dragagem	Realizada com o efeito da corrente de maré, vento e descarga dos rios
Correntes de marés	Simular somente o efeito da corrente de maré na dispersão da pluma de sedimentos oriundas de actividade de dragagem	Realizada considerando a oscilação da maré (que induz uma corrente de maré), velocidade e direcção do vento nulas e descargas fluviais nulas
Vento	Simular somente o efeito do vento na dispersão da pluma de sedimentos oriundas de actividade de dragagem	Realizada considerando a velocidade e direcção do vento, nível do mar constante (= 0 m) e descargas fluviais nulas
Descarga dos rios	Simular somente o efeito da descarga fluvial na dispersão da pluma de sedimentos oriundas de actividade de dragagem	Realizado considerando descargas fluviais de cheias (10000 m <sup>3</sup> /s e 2000 m <sup>3</sup> /s para Púnguè e Búzi), velocidade e direcção do vento constante (= 0 m/s) e nível do mar constante (= 0 m)

Assumir descargas fluviais de cheias deveu-se ao facto das descargas fluviais ( $600 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ) dos rios Púnguè e Búzi respectivamente não terem efeito na dispersão da pluma. Entretanto achou-se lógico assumir descargas de cheias muito elevadas.

### **3. Resultados e Discussão**

Para responder os objectivos do trabalho foram feitas simulações controladas detalhadas na tabela 4. Estas simulações foram feitas em 2D (sedimentos) e não em 3D (razão de usar o 2D é pela eficiência computacional e por se simular a pluma de campo longinco em que se assume o fluxo como sendo verticalmente bem misturado o que faz esta simplificação uma escolha lógica) e na simulação hidrodinâmica foi considerado 2DH (hidrodinâmica) pela pequena variação dos parâmetros físicos (Temperatura e Salinidade) na vertical que podem gerar correntes de densidade. Visto que a simulação em 3D ao foi feita, o modelo calculará a concentração de sedimentos próximo ao fundo.

Os resultados 2D e 2DH foram gravados no intervalo de tempo de 1 hora (os mapas) enquanto os resultados dos pontos de observação e das secções foram gravados no intervalo de tempo de 10 minutos, tudo isto durante 1 mês, e foram processados em Matlab R2013a (com rotinas preparadas pela Deltares).

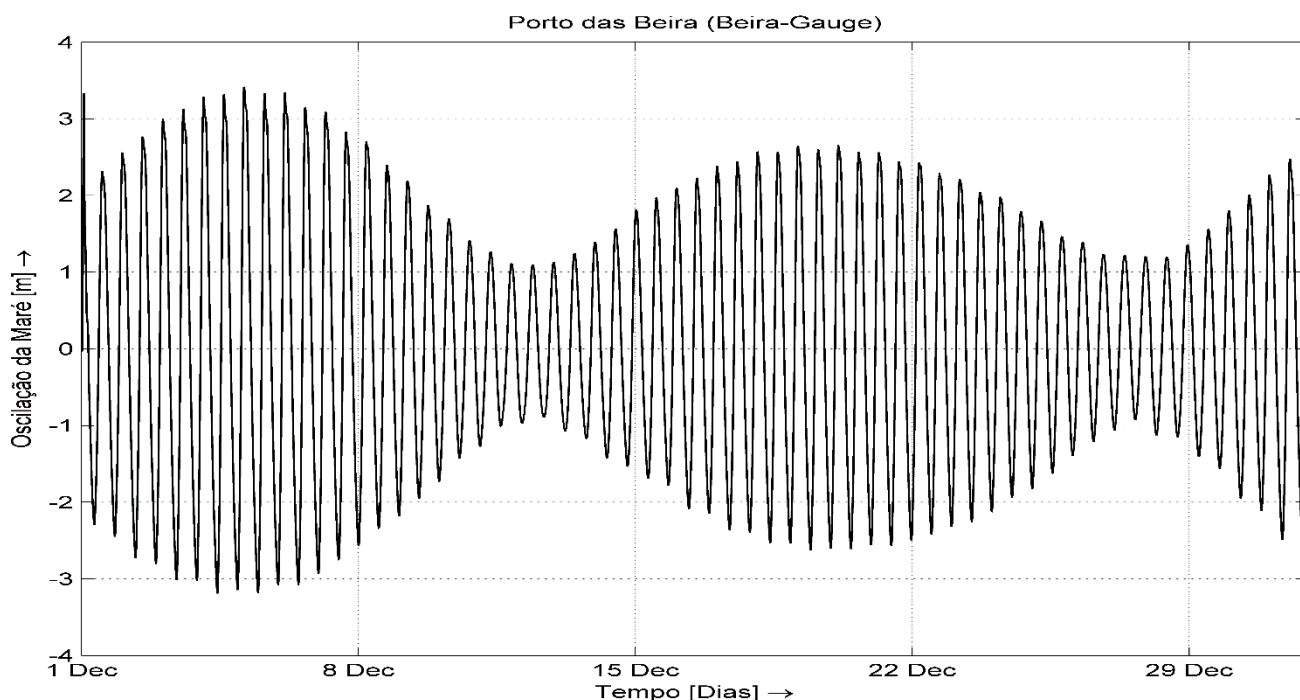
Os resultados que estão apresentados foram escolhidos de acordo com a magnitude do evento, ou seja, uma corrente de maré de sizígia máxima e uma corrente de maré de quadratura mínima.

#### **3.1. Simulação da condição normal do Estuário (sem dragagem)**

##### **3.1.1. Modelo 2DH (hidrodinâmica)**

A condição normal do estuário da Beira foi realizada com base nas descargas dos rios (com concentrações de sedimentos de  $0.2 \text{ kg/m}^3$  a serem descarregados para o mar), velocidade e direcção do vento e as marés.

O resultado da simulação 2DH para o ponto de observação do porto da Beira (Beira\_Gauge) (vide figura 11), mostrou amplitudes de marés (referenciadas ao nível médio do mar) típicas do Porto da Beira. A amplitude máxima registrada foi de 3.41 m no dia 05 de Dezembro as 2 hora e 40 minutos que é equivalente a 6.97 m relativo ao zero hidrográfico. As primeiras 5 horas de simulação (desde a hora de inicio da simulação) ocorreram pequenas oscilações incomuns relativos à realidade e depois das primeiras 5 horas a oscilação da maré foi bem simulada. A corrente de maré para o ponto de observação do porto da Beira teve o seu máximo de 0.35 m/s no dia 4 de Dezembro as 11 horas e era o período de vazante. Os resultados para o porto da Beira para este período mostram que 15 horas depois da máxima velocidade da corrente de maré, foi registrado a máxima amplitude de maré.



**Figura 11:** Oscilação da maré no porto da Beira, durante 31 dias de simulação.

O facto de terem ocorrido pequenas oscilações incomuns (relativos à realidade) deveu-se a estabilização do modelo, ou seja as primeiras 5 horas, o modelo se encontrava em estabilização entre a elevação da condição inicial e a elevação da condição de fronteira.

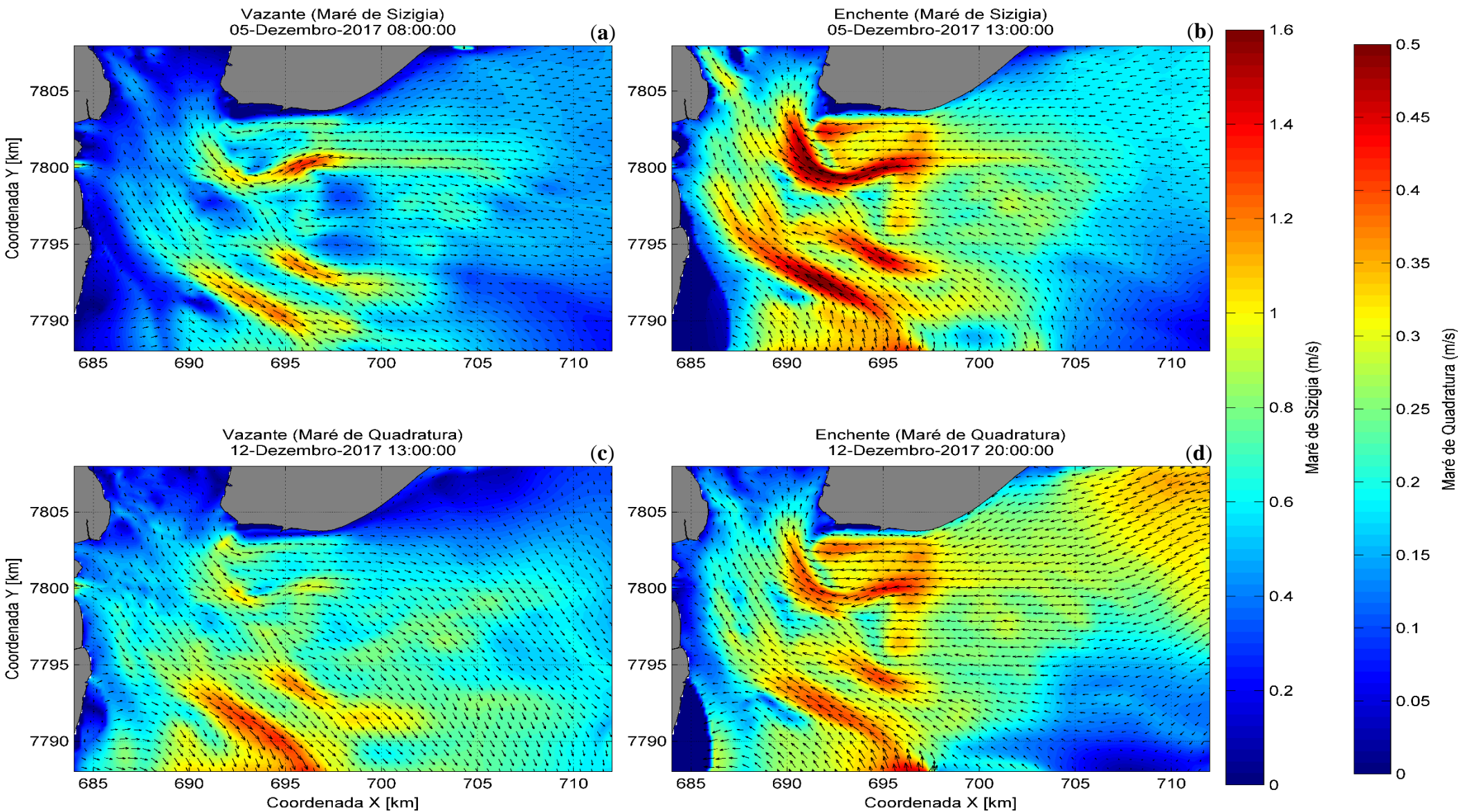
A corrente de maré máxima para todo o domínio do modelo foi registrada na secção S10 no canal de acesso ao Porto (vide figura 12**(b)**). A corrente de maré nesta região segue a configuração do canal de acesso ao porto da Beira, sendo essa a região de maiores velocidades da corrente de maré.

A corrente de maré 0.35 m/s (vide figura 12) na região do porto da Beira é comum segundo (JICA, 1998), e sendo este resultado explicado pela profundidade que é constante em direcção ao porto da Beira. Fenómeno que é verificado no ponto S8 a S14-1 em que o canal de acesso ao porto é estreito e confinado (encontra-se no meio de bancos de areia), sendo esta com profundidades que aumentam do S8 ao S14-1 e mais adiante. Neste caso a gravidade, a configuração do canal contribuem para as elevadas correntes, fazendo assim a corrente de maré dominante na maré de sizígia a corrente de enchente, resultado este, também descrito e apresentado por Nzualo (2018).

No canal de acesso ao porto da Beira foi registrada corrente de maré na vazante mais fracas relativamente as correntes de enchente. A figura 12 mostra a velocidade e direcção da corrente de maré na enchente e vazante para períodos de maré de sizígia e quadratura. Os resultados apresentados na figura 12 são da máxima corrente da primeira maré de sizígia (vazante e enchente) simulada e da máxima corrente da primeira maré de quadratura (vazante e enchente) simulada. Esta escolha torna-se lógica pelo facto de se desejar analisar a pluma em situações de corrente de maré de sizígia e quadratura mais fortes e fracas respectivamente.

As correntes de marés na vazante são as mais fracas relativamente a corrente de maré da enchente para maré de sizígia e de quadratura. A corrente de vazante na maré de sizígia máxima representada na figura 12(a) foi de 1.3 m/s tendo seguido a configuração do canal de acesso ao porto da Beira e sendo a região de maiores velocidades da corrente de maré relativamente as outras regiões do domínio. Na figura 12(b) a máxima corrente de enchente na maré de sizígia registrada foi de 1.63 m/s tendo seguido a configuração do canal de acesso ao porto da Beira. Na figura 12(c) a máxima corrente de vazante na maré de quadratura registrada foi de 0.4 m/s e foi registrada mais para a região sul do canal de acesso ao porto, sendo que no canal de acesso ao porto da Beira a máxima registrada foi de 0.30 m/s. Por último na figura 12(d) a máxima corrente de enchente na maré de quadratura foi registrada no canal de acesso ao porto da Beira e foi de 0.5 m/s.

A corrente de maré de vazante na maré de sizígia (vide figura 12 (a) e (b)) seguem a configuração do canal de acesso ao porto da Beira pelo canal ser estreito e no meio de bancos de areia, valendo o mesmo para a maré de quadratura (vide figura 12 (c) e (d)), sendo que a particularidade da figura 12(c) (de não apresentar correntes fortes no canal de acesso ao porto) é devida ao período em que foi registrado a corrente, sendo que era o próximo ao período de inversão de maré.

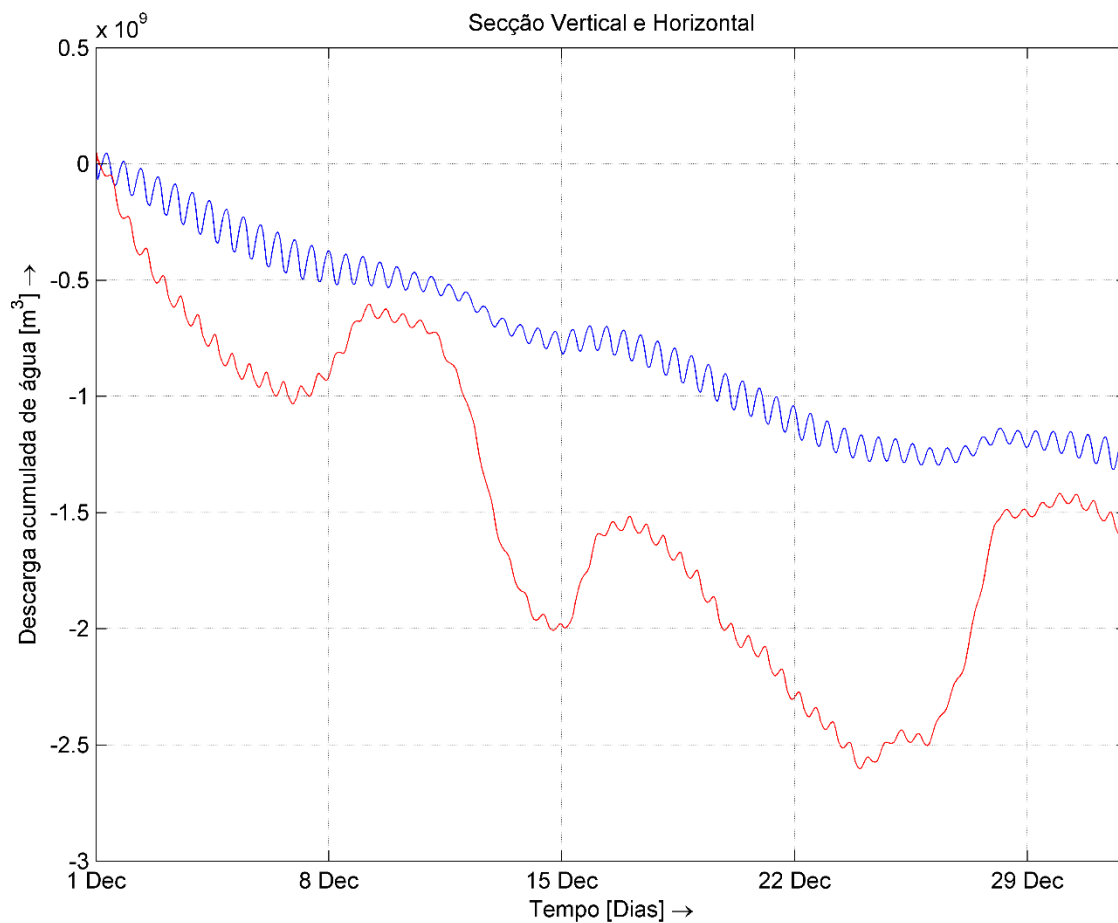


**Figura 12:** Velocidade [m/s] e direcção da corrente de maré para todo o canal de acesso ao porto da Beira. (a) Vazante da maré de sizígia; (b) Enchente da maré de sizígia; (c) Vazante da maré de quadratura; (d) Enchente da maré de quadratura. Note que as barras de cores são específicas para Maré de sizígia e Quadratura.



As secções montadas no domínio (vide figura 8) vertical e horizontal tiveram descargas de água acumulada máximas que passaram pelas secções de  $1.3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  e de  $2.55 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  respectivamente, sendo mais dominante para a secção Vertical o sentido para a esquerda (são indicados pelos valores negativos na figura 14) e para a secção Horizontal o sentido para baixo (são também indicados pelos valores negativos na figura 14).

Estes valores descarga acumulada de água nas secções Vertical e Horizontal tem o sentido negativo pelo facto de a região apresentar correntes dominantes na enchente, significando uma maior quantidade de água que é direccionada para o canal de acesso com o passar do tempo. A maior descarga de água na Horizontal por apresentar maior comprimento da secção relativamente a Vertical.



**Figura 13:** Descarga acumulada de água em  $\text{m}^3$  para as secções Vertical (linha azul) e Horizontal (linha vermelha).

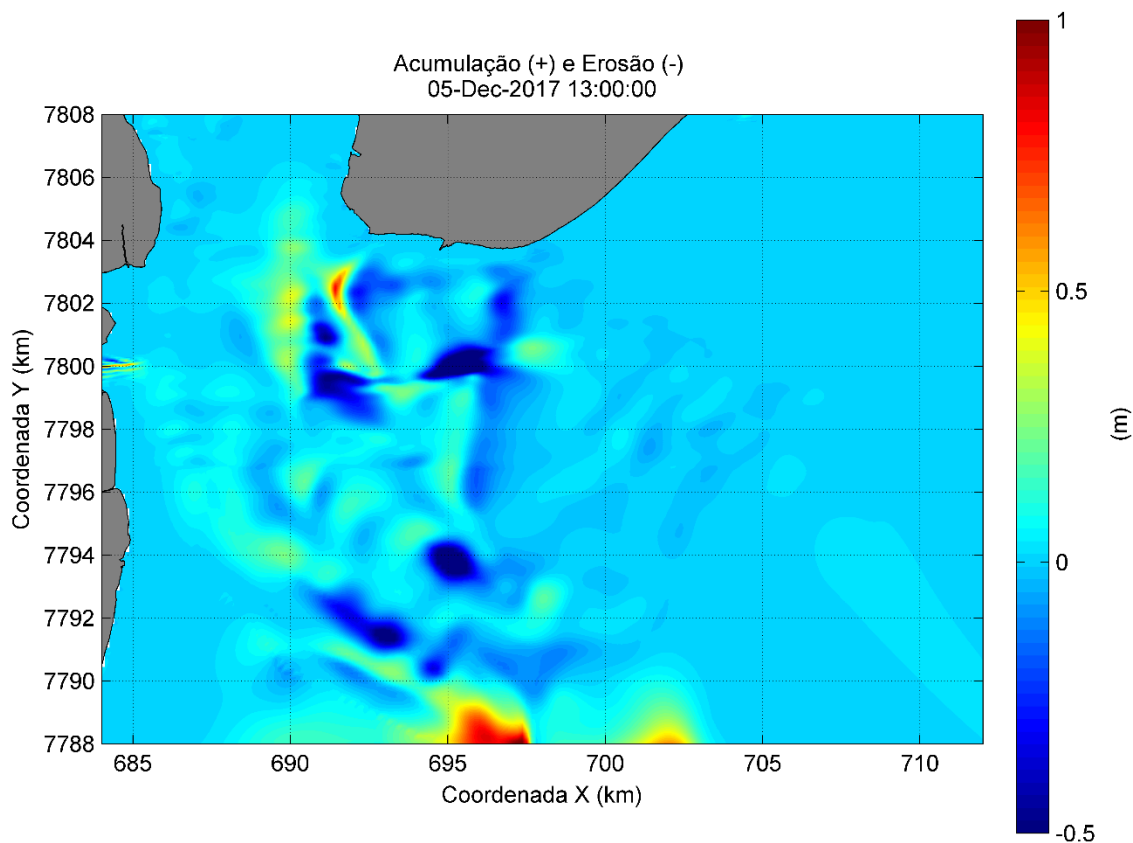
Nzualo (2018) destacou em seu trabalho que as correntes de enchente na maré de sizígia são dominantes do que as de vazante, o que demonstra que os resultados encontrados neste trabalho vão de acordo com os resultados encontrados por Nzualo.

### 3.1.2. Modelo 2D (sedimentos)

O estuário da Beira sofre erosão no fundo pelas correntes concretamente no canal de acesso ao porto da Beira no ponto de observação S12 e no ponto de observação S10 (curva de Macuti), sendo que o sedimento erodido pela corrente (o sedimento erodido no S12) é transportado depositado próximo a curva de Macuti e o sedimento erodido no S10 é transportado e depositado próximo ao ponto S9 (vide figura 14).

A erosão no fundo é consequência da elevada tensão da água com o fundo que é de  $9 \text{ N/m}^2$  resultado das correntes fortes de enchente (vide figura 12**(b)**).

Várias outras regiões do domínio do modelo sofreram erosão.



**Figura 14:** Representação das zonas de acumulação (representada por valores positivos) e erosão (representados por valores negativos) de sedimentos.

A condição normal do estuário em termos sedimentares, apresenta uma dinâmica elevada, ou seja, as a muitos locais de deposição de sedimentos com o passar do tempo. Isto sugere que as correntes são os maiores motores para a dinâmica de deposição de sedimentos.

### **3.2. Simulação da pluma de actividades de dragagem**

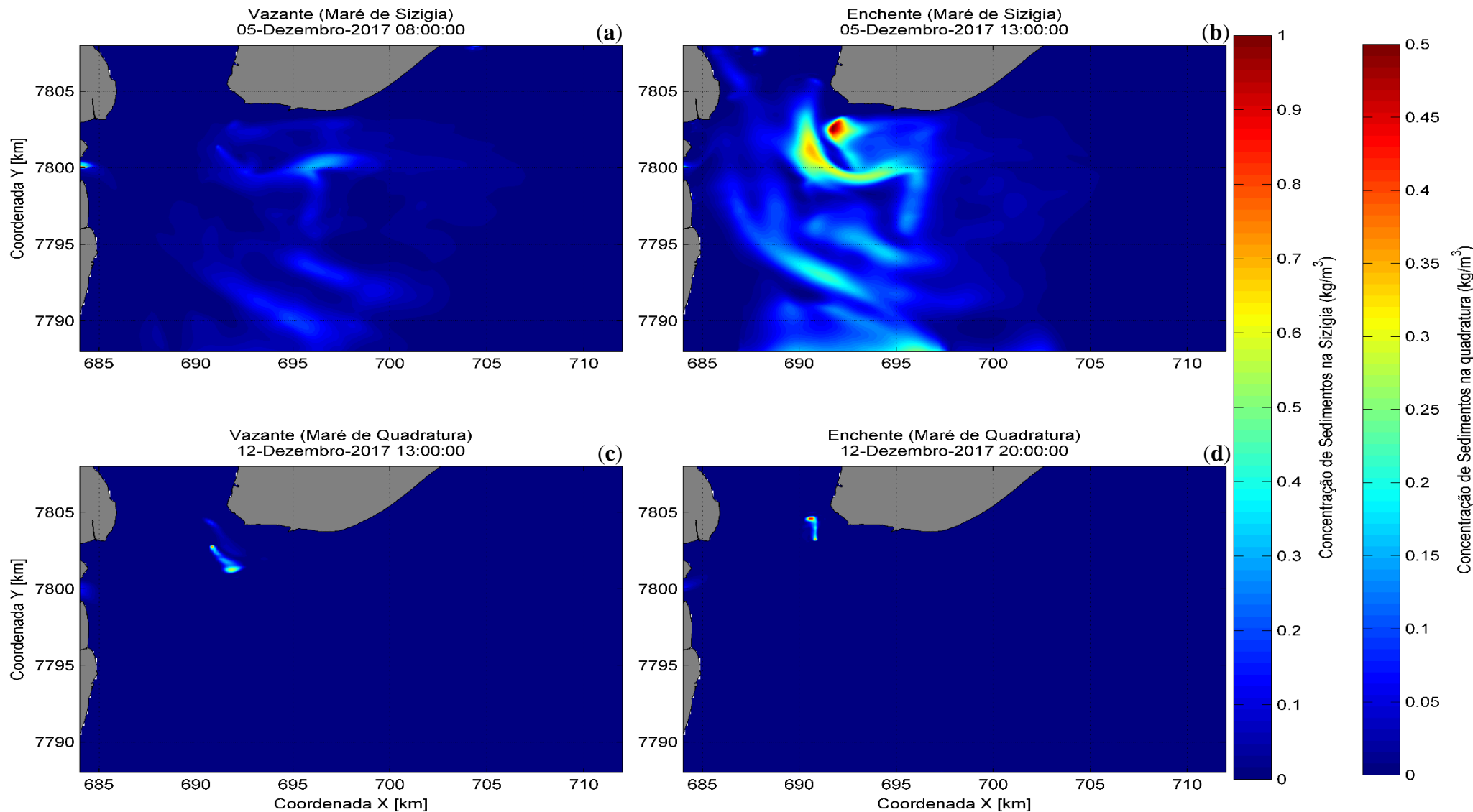
A condição do estuário com actividades de dragagem foi simulada aplicando o método descrito na secção 2.2.6 considerando a equação 3.2.6.8 para a atribuição de uma fonte de sedimentos pelos distúrbios da draga no fundo e por overflow na coluna de água, ou seja, atribuição de uma fonte de sedimentos na coluna de água e que é uma estimativa da produção de sedimentos que ficam re-suspensos na coluna de água por actividades de dragagem. Neste caso somente foi considerada uma pluma passiva, no momento da dragagem, no momento da deposição de sedimentos e mas foi feita a avaliação para o local de deposição.

Foi considerado uma dragagem sendo feita todo o passo de tempo da simulação com base nos dados de volume de sedimentos dragados para cada secção e o total que foi despejado no D4.

Os resultados a serem apresentados são resultados de simulações controladas, em que se analisou o contributo de cada forçante estuarina (corrente de maré, descarga dos rios e ventos) e uma considerando todas forçantes. Para tal, a simulação controlada do vento foi realizada assumindo um nível do mar constante (sem oscilação da maré ou seja mesmo nível para toda simulação, conseqüentemente sem corrente de maré), neste caso elevação zero referente ao nível médio do mar, assumindo descargas fluviais nulas todo isto para se ter só a corrente induzida pelo vento e avaliar se as correntes são suficientes para dispersar a pluma de sedimentos. Para a simulação controlada do rio foi realizada considerando também o nível constante, sem vento soprando para se ter se as descargas podem induzir uma corrente. Para a simulação controlada da corrente de maré foi realizada considerando descargas fluviais nulas e sem vento soprando para se ter a actuação da corrente de maré.

#### **3.2.1. Pluma considerando Corrente de maré, Descarga dos rios e Ventos**

A pluma de sedimentos de dragagem como a de erosão do fundo pelas correntes (vide figura 15) sofreu transporte pelas correntes. Na figura 15(a) onde a corrente de sizígia foi mais fraca, a concentração de sedimentos máxima foi de  $0.45 \text{ kg/m}^3$ , sendo que na figura 15(b) onde a corrente de sizígia foi a mais forte de toda simulação, a concentração de sedimentos máxima foi de  $1 \text{ kg/m}^3$  sendo este o valor mais elevado na superfície de concentração de sedimentos. Na figura 15(c) onde a corrente de quadratura foi a mais fraca a concentração de sedimentos foi de  $0.3 \text{ kg/m}^3$  e na figura 15(d) a concentração de sedimentos foi de  $0.5 \text{ kg/m}^3$  no período de corrente de quadratura; é notável nas figuras 15(c e d) que a pluma visível é a pluma gerada pela draga enquanto as figuras 15(a e b) a pluma visível é a pluma devida a erosão do fundo pelas correntes e a pluma gerada pela draga no percurso da dragagem.



**Figura 15:** Concentração/Pluma de sedimentos na superfície devido a draga e a condição normal do estuário. (a) Concentração/Pluma de sedimentos na Vazante da maré de Szigia; (b) Concentração/Pluma de sedimentos na Enchente da maré de Szigia; (c) Concentração/Pluma de Sedimentos na Vazante da maré de Quadratura; (d) Concentração/Pluma de sedimentos na Enchente da maré de Quadratura. Note que as barras de cores são específicas para Maré de Szigia e de Quadratura.

Os resultados apresentados na figura 15(a e b) mostram elevadas concentrações de sedimentos devido as correntes de elevada magnitude que colocam muito sedimento em suspensão, fora ao facto de haver elevada fricção no fundo no canal de acesso ao porto ( $10 \text{ N/m}^2$ ) na enchente, as correntes dispersão a pluma gerada pela draga no sentido da corrente e a areia e areia fina rapidamente se depositam pela elevada velocidade de queda de  $6.4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  e  $4.18 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  respectivamente, excepto o lodo que tem uma velocidade de queda menor  $4.498 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  permanecendo assim suspenso por longas horas, entretanto a areia fina e lodo dominam em termos de concentração na superfície.

A figura 15(c e d) mostra que as correntes não causaram erosão no fundo tendo de fricção com o fundo  $1 \text{ N/m}^2$  que é baixo relativamente a maré de sizígia, mas causaram dispersão da pluma de sedimentos oriunda das dragagens. Entretanto a concentração de sedimentos é baixa.

Para efeitos de comparação da concentração de sedimentos devido a pluma de sedimentos oriundos de actividades de dragagem e devido a concentração de sedimentos da condição normal do estuário, foram seleccionadas 5 pontos de observação (S8, S9, S10 e S11 que fazem parte das secções com assoreamento crítico e mais dragadas) para o período de correntes máximas de enchente (05 de Dezembro de 2017 as 13:00:00) e correntes mínimas de enchente (12 de Dezembro de 2017 as 20:00:00) (vide tabela 5).

Pelos valores apresentados na tabela 5 é evidente que as correntes transportam os sedimentos e isso afecta na concentração (reduzindo-a em um determinado ponto). Entretanto, é fácil identificar que as dragagens aumentam a concentração de sedimentos em suspensão, sendo que próximo ao fundo as concentrações são muito elevadas, com valores de até  $7 \text{ kg/m}^3$ . Registrou-se valores nulos de concentração no dia 12 por que as dragagens foram realizadas em outros pontos neste período de simulação.

O alcance ou extensão (do ponto dragado ao limite transportado pelas correntes) da pluma de sedimentos foi de 4 km no dia 05 de Dezembro de 2017 13:00:00, extensão esta que é constituída maioritariamente por lodo e largura de 1 km, sendo que para este dia a dragagem foi feita na secção 8 (S8). O alcance para o dia 12 de Dezembro de 2017 20:00:00 foi de 1.5 km com largura de 500 m. Tendo sido baixos os valores de alcance e largura da pluma no dia 12 devido as fracas velocidades da corrente e altos no dia 05 devido as fortes correntes registradas.

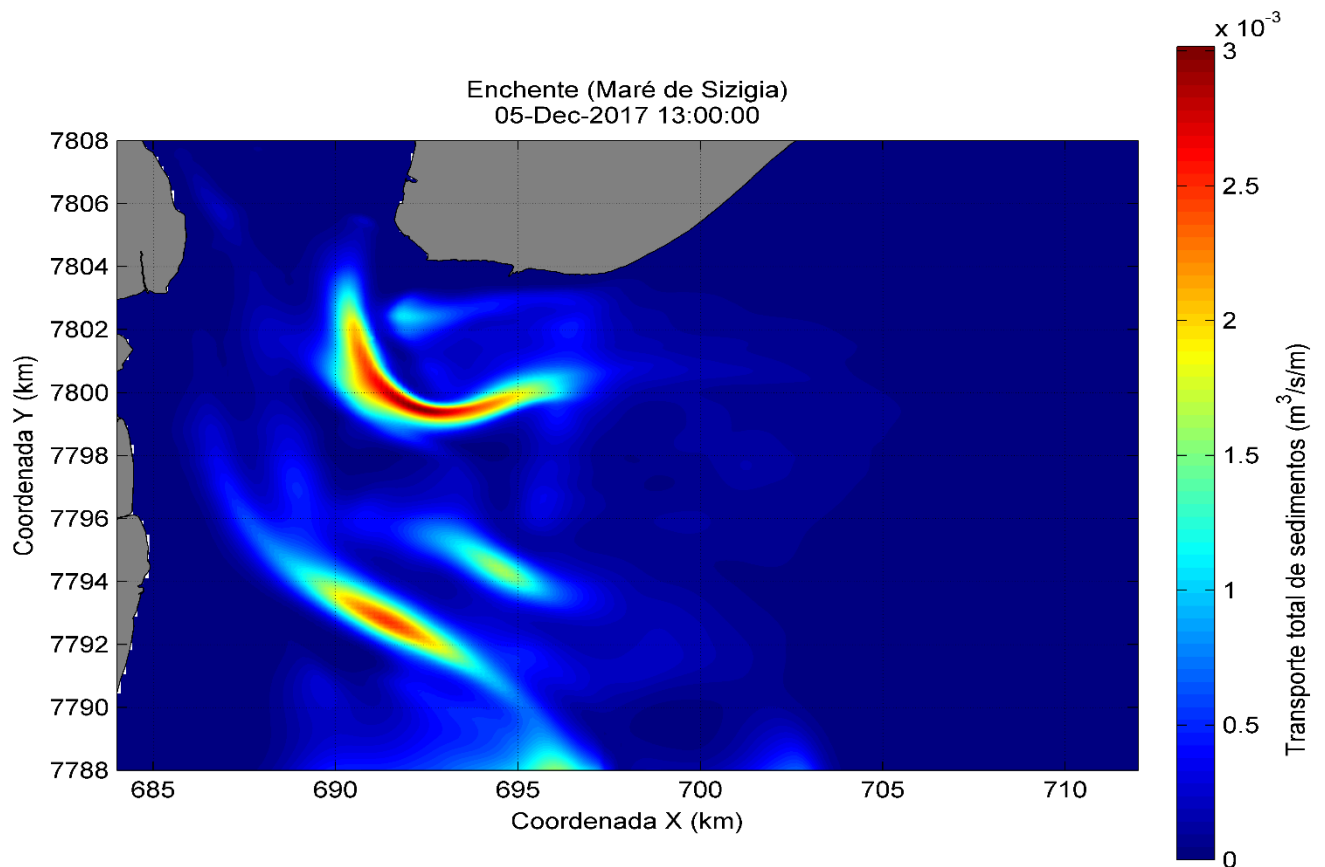
**Tabela 5:** Concentração de todas as fracções de sedimentos (areia, lodo, areia fina) na superfície para os 4 principais pontos de observação.

Ponto de Observação	Concentração normal (kg/m <sup>3</sup> )		Concentração normal + dragagem (kg/m <sup>3</sup> )	
	05/12/2017 13:00:00	12/12/2017 20:00:00	05/12/2017 13:00:00	12/12/2017 20:00:00
S8	0.34	0	0.44	0
S9	0.54	0	0.58	0
S10 (Curva de Macuti)	0.60	0	0.82	0
S11	0.28	0	0.30	0

### 3.2.2. Corrente de maré

A corrente de maré teve grande impacto na dispersão da pluma de sedimentos oriundos de dragagem concretamente no canal de acesso ao porto da Beira. Velocidades de até 1.6 m/s são registradas no canal de acesso. Para efeito de quantificar o sedimento transportado pelas correntes de marés, os resultados apresentados são da corrente maré de sizígia máxima.

Os sedimentos foram transportados na direcção do canal de acesso na corrente de maré de enchente (vide figura 16) e teve de transporte  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  que equivale a 2.5 kg/s/m de sedimentos que foi transportado pelas correntes de marés, resultado este também encontrado por Nzualo (2010). Relativamente a concentração de sedimentos, houve maior concentração de sedimentos (relativamente ao apresentado na figura 14**(b)**) somente considerando a influencia da corrente de maré na ordem de 0.1 kg/m<sup>3</sup> ou seja, a concentração de sedimentos máxima no canal foi de 1.1 kg/m<sup>3</sup>.



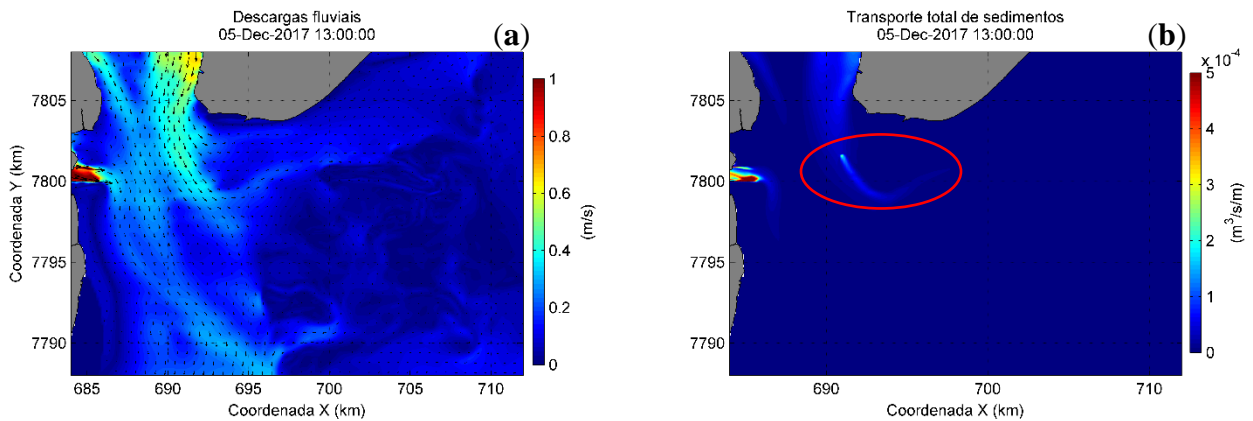
**Figura 16:** Transporte de sedimentos: somatório do transporte em suspensão e o transporte de carga do fundo. Note que é o somatório de todas as fracções de sedimentos (areia, areia fina e lodo). Note que este transporte é da condição normal do estuário mais a pluma oriundas de dragagem.

Este elevado transporte deveu-se ao facto da corrente erodir o fundo na secção S11 (vide figura 8 para identificação da secção 11) e transportar os sedimentos na direcção da corrente (vide figura 12(b) para direcção da corrente). A subida na concentração de sedimentos foi devida a falta de influência do vento, que induz uma corrente na superfície (mais detalhes na secção 3.2.4).

### 3.2.3. Descarga dos rios

As descargas fluviais de cheias (salientar mais uma vez que não são descargas reais) implementadas na análise do contributo do rio na dispersão da pluma induziram correntes de 0.6 m/s no porto da Beira e 1 m/s na boca do rio Búzi. As correntes (figura 17(a)) induzidas pelo rio Búzi não se propagaram para toda a região ficando assim confinadas na boca enquanto as correntes induzidas pelo rio Púngué propagaram-se pelo canal de acesso ao porto da Beira mas com velocidades baixas até a saída do canal mais para o Este.

O transporte total de sedimentos (figura 17**(b)**) foi baixo relativamente as correntes de marés com valores de até  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  equivalente a  $0.2 \text{ kg/s}/\text{m}$  sendo este constituído maioritariamente por lodo em suspensão. Transportes de até  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  foram registrados na boca do rio Búzi.



**Figura 17:** (a) Velocidade e direcção da corrente devida as descargas fluviais. (b) Transporte total (em suspensão e de carga de fundo) de sedimentos considerando todas as fracções de sedimentos (areia, areia fina e lodo) devida a correntes de descargas fluviais. Note que a elipse representa a dispersão da pluma oriundas de actividades de dragagem.

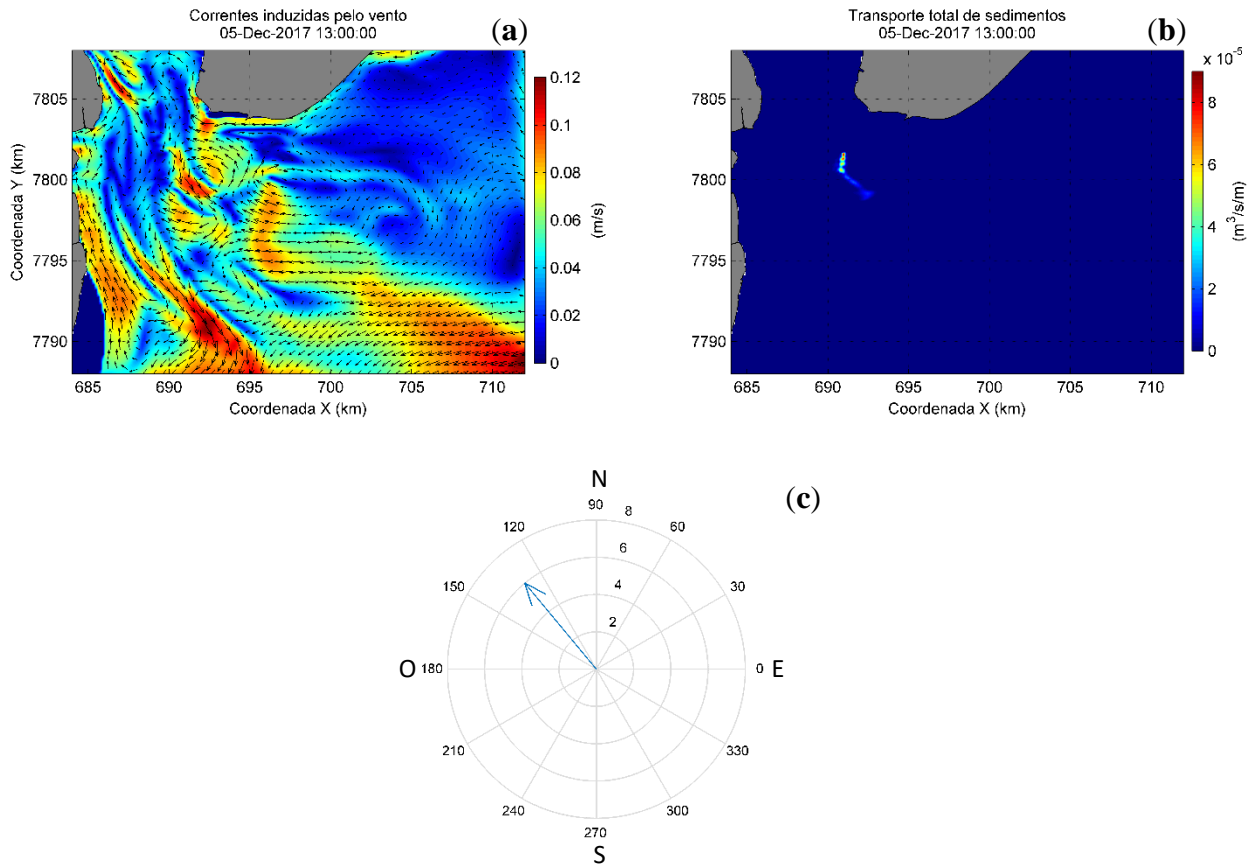
As correntes induzidas pelo Búzi são maiores e mais confinadas na boca devido a vários bancos de areia na boca do rio, entretanto os sedimentos transportado pelo rio fica assim retido na boca do rio Búzi (como também ilustra a figura 17**(b)**). Sendo que as correntes induzidas pelo Púnguè seguem e ganham velocidade no canal de acesso ao porto devido a gravidade e profundidade do local. A pluma de sedimento oriunda de dragagem (representada na figura 17**(b)** – elipse vermelha) foi transportada pelas correntes induzidas pelo Púnguè seguindo a direcção das correntes. No fundo houve registro do transporte de sedimentos com valores baixíssimos relativamente ao transporte de superfície, isto devido a água descarregada pelos rios Púnguè e Búzi serem de menor densidade, actuando assim na superfície.

### 3.2.4. Vento

As correntes induzidas pelo vento registradas (figura 18**(a)**) tomaram várias direcções sendo que no canal de acesso ao porto concretamente na S10 (curva de Macuti) foram registradas velocidades de até  $0.12 \text{ m/s}$ . Salientar que as velocidades das correntes induzidas pelos ventos são baixíssimas relativamente as correntes de marés e induzidas pelas descargas cheias (dependendo das descargas). A pluma de sedimentos oriunda de dragagem foi transportada pelas correntes superficiais induzidas pelo vento (figura 17**(b)**) na curva de Macuti, sendo que o transporte máximo foi de  $9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  equivalente a



0.09 kg/s/m, ou seja muito baixo relativamente as correntes de marés e induzidas pelas descargas de cheias (dependendo da descarga). Esta pluma é constituída maioritariamente por lodo.



**Figura 18:** (a) Correntes induzidas pelo vento; (b) Transporte total (na superfície e no fundo) de todas as fracções de sedimentos; (c) Velocidade e direcção do vento que induziu a corrente superficial.

Pelo facto da corrente ser fraca, as varias direcções tomadas, foram devidas a presença de bancos de areia que ao nível do mar (= 0 m) ficam com baixas profundidades fazendo assim com que o efeito do vento se sinta em pequenas profundidades, fazendo ainda que haja reflexão nos bancos que resulta nas varias direcções da corrente. A pluma gerada pela draga foi transportada seguindo o canal de acesso ao porto na curva de Macuti devido as correntes e direcção que são máximas de todo o domínio, sendo que o lodo ganha mais extensão mais com transporte baixo. Relativamente a concentração de sedimentos foram registradas concentrações de até  $1.1 \text{ kg}/\text{m}^3$  de lodo na curva de Macuti, sendo que areia e areia fina foram registradas baixíssimas concentrações de se negligenciar.

#### 4. Conclusão

Contudo, o presente estudo demonstrou que as correntes de marés são os maiores agentes na dinâmica da pluma de sedimentos oriundas de actividades de dragagens e o principal motor que transporta os sedimentos de determinadas regiões e deposita em outras regiões. A corrente de maré é responsável por 80 % da dinâmica sedimentar do estuário, e os restantes 20 % assumiu-se como responsáveis as correntes longitudinais devido as ondas (que não foi analisado neste trabalho o que nos levará as recomendações), descarga dos rios (com baixas percentagens, isto porque foram consideradas descargas de cheias hipotéticas para a análise individual da sua influência) e velocidade e direcção do vento (com baixas percentagens, isto porque dependendo da velocidade e direcção do vento e ela induz correntes muito fracas).

A influência somente da corrente maré não difere da corrente de maré simulada com o acréscimo das restantes forçantes (vento e descarga fluvial), fazendo com que o transporte de sedimentos seja mesmo.

A pluma de sedimento oriundo de actividades de dragagens aumenta a concentração de sedimentos na em suspensão (próximo à superfície) e próximas ao fundo, sendo que a concentração de sedimentos próximo do fundo supera a concentração próximo à superfície.

As descargas fluviais tornaram-se uma forçante importante para a dispersão da pluma de sedimentos oriundas de actividades de dragagens, visto que induzem correntes relativamente fortes que as do vento. Entretanto, assumir descargas fluviais de cheias foi importante para entender onde deposita-se o sedimento transportado pelo rio, que no caso deposita-se próximo ao porto da Beira e não em secções mais ao Este do domínio do modelo. As descargas fluviais normais são importantes quando a corrente de maré contribui na vazante.

O vento mostrou-se como uma forçante que retarda a propagação da corrente de maré, sendo que a corrente induzida pelo vento toma varias direcções e magnitudes (baixas dependendo das características do vento). Entretanto, houve pequeno transporte de sedimentos principalmente de lodo em suspensão.

Contudo, a pluma de sedimentos criada pela draga fica em suspensão (não durando por muito tempo, excepto o lodo que leva mais tempo suspenso) e deposita-se diminuindo assim a profundidade (que afecta na navegação) (vide anexo figura 19). As descargas acumuladas de água sugerem que o sedimento depositado no D4 é transportado de volta para o canal (não foi analisado a pluma na deposição de sedimentos dragados neste trabalho).

## 5. Limitações e Recomendações

O presente trabalho apresentou as seguintes limitações:

- A malha computacional é de resolução baixa, ou seja 150 por 50 metros (Salientar que foi assumida esta resolução pela fraca de capacidade processamento do computador) é um espaçamento elevado para uma análise mais detalhada da pluma de uma dragagem;
- A falta de batimetria antes e depois da dragagem;
- A falta de informação recente sobre a concentração de sedimentos em suspensão.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

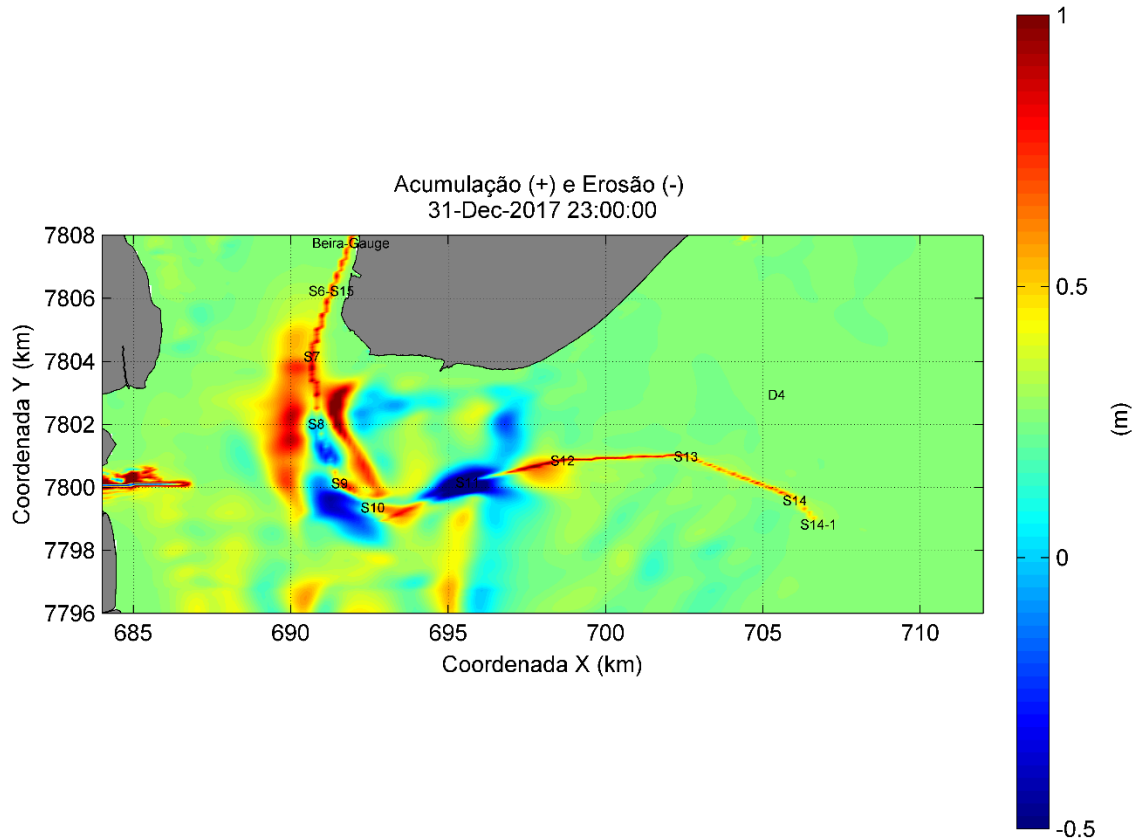
- Que se simule a pluma em três dimensões (3D) com a intenção de analisar o contributo do tubo de sucção individualmente e o contributo do *Overflow*;
- Que se simule a pluma de sedimentos contando mais uma forçante; ondas que geram correntes longitudinais na praia;
- Que se estime a concentração e o alcance da pluma no local de despejo e se avalie se o sedimento volta ao canal de acesso.

## 6. Referências Bibliográficas

- Abas, I., & Hagedooren, H. (2017). *Salt intrusion in the Pungue estuary, Mozambique*. Delft University of Technology.
- Assad, L. P., Mano, M. F., Decco, H. T., Junior, A. R., & Landau, L. (2009). *Noções básicas de modelagem hidrodinâmica computacional e de dispersão de poluentes*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- Becker, J. (2011). *DREDGE PLUMES - Ecological risk assessment*. Rotterdam: Delft University of Technology.
- Becker, J., Eekelen, E. v., Wiechen, J. v., Lange, W. d., Damsma, T., Smolders, T., & Koningsveld, M. v. (2014). *Estimating source terms for far field dredge plume modelling*. Journal of Environmental Management (Elsevier ).
- Boon, J. D. (2004). *SECRETS OF THE TIDE: Tide and Tidal Current Analysis and Applications, Storm Surges and Sea Level Trends*. Horwood Publishing Limited.
- Boon, J. D. (2007). *WORLD TIDES: USER MANUAL-Version 1.03*. John D. Boon Marine Consultant, LLC.
- Castro, S. M., & Almeida, J. R. (2012). *Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão*. Uberlândia: Sociedade & Natureza.
- CONSULTEC. (2007). *Estudo Ambiental Simplificado da Dragagem do Canal de Acesso ao Porto da Beira*. Maputo– Moçambique: Relatório Final.
- Deltares. (2017). *Delft3D-FLOW, User Manual*. The Netherlands: Deltares.
- Dyer. (1995). *Sediment transport processes in estuaries*. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries, G.M.E. Perillo (ed.).
- Graas, S., & Savenije, H. H. (2008). *Salt intrusion in the Pungue estuary, Mozambique: Effect of sand banks as a natural temporary salt intrusion barrier*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.
- JICA. (1998). *The study for maintenance and improvement plan of access channel of Beira port in the Republic of Mozambique*.

- Mattos, E. P. (2016). *Modelagem Hidrodinâmica Da Dispersão Da Pluma De Sedimentos Paranaguá E Antonina, Pr.* Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- NEDECO. (1982a). *Beira Port Study. Access Channel Study. Main Report.* Peoples Republic of Mozambique: Kingdom of the Netherlands – Ministry of Foreign Affairs.
- Nzualo, T. d. (2010). *Estudo Hidrodinâmico E Ambiental Do Estuário Da Beira – Moçambique.* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Nzualo, T. N. (2018). *Short-term tidal asymmetry inversion in a macrotidal estuary (Beira, Mozambique).* Geomorphology.
- Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Estuaries and Coastal Seas.* Aqua Publication.
- Rijn, L. C. (2019). *Turbidity Due To Dredging And Dumping Of Sediments.* Leo van Rijn sediment consultancy.
- Silva, A. F. (2011). *Características Hidrográficas Do Estuário Da Beira, Moçambique.* Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Spearman, J., Heer, A. D., Aarninkhof, S., & Koningsveld, M. V. (2011). *Validation Of The Tass System For Predicting The Environmental Effects Of Trailing Suction Hopper Dredgers.* Terra et Aqua.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography.* Texas A & M University.
- Tuinhof, T. J. (2014). *Modelling far-field dredge plume dispersion.* Rotterdam: Delft University of Technology.
- The Open University. (1999). *WAVES, TIDES AND SHALLOW-WATER PROCESSES.* Butterworth-Heinemann.
- WIT, L. D. (2015). *3D CFD modelling of overflow dredging plumes.* Delft University of Technology.

## Anexos



**Figura 19:** Acumulação (representado com valores positivos) e erosão (representado com valores negativos), devido ao transporte do fundo e pluma gerada pela draga no último dia e hora da simulação.