



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**CHRISTIAN VASCONCELLOS PEDRUZZI**

**INTERAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E IMAGEM  
DE SATÉLITE PARA A AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PLUMA  
DO RIO DOCE/ES**

**VITÓRIA**

**2011**

CHRISTIAN VASCONCELLOS PEDRUZZI

**INTERAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E IMAGEM  
DE SATÉLITE PARA A AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PLUMA  
DO RIO DOCE/ES**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental, do Centro  
Tecnológico da Universidade  
Federal do Espírito Santo, como  
requisito parcial para a obtenção  
do Grau de Mestre em Engenharia  
Ambiental.

Área de Concentração: Recursos  
Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo

VITÓRIA  
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

P372i Pedruzzi, Christian Vasconcellos, 1981-  
Interação de simulação computacional e imagem de satélite para a  
avaliação da dinâmica da pluma do Rio Doce/ES / Christian  
Vasconcellos Pedruzzi. – 2011.  
99 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Simulação (Computadores). 2. Satélites. 3. Estuários. 4. Doce,  
Rio (MG e ES). I. Rigo, Daniel. II. Universidade Federal do Espírito  
Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

---

CHRISTIAN VASCONCELLOS PEDRUZZI

**INTERAÇÃO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E IMAGEM  
DE SATÉLITE PARA A AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA PLUMA  
DO RIO DOCE/ES**

Dissertação apresentada em 18/08/2011

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Daniel Rigo  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. Moacyr Cunha de Araujo Filho  
Universidade Federal de Pernambuco  
Examinador Externo

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Esther e Celso, a minha irmã, Vivian, e a todos meus familiares e antepassados.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, familiares, amigos e antepassados por me darem força nos momentos de dificuldade e felicidade.

Agradeço aos grandes professores do PPGEA, em especial ao Prof. Julio Chacaltana, por muitas vezes ter acreditado mais em nós do que nós mesmos; ao Prof Edmilson Teixeira, pelo sincero esforço e dedicação ao nos passar seus conhecimentos; ao Prof. Antonio Sérgio, pela infindável paciência e disponibilidade; e principalmente ao Prof. Daniel Rigo, por acreditar em meu potencial como mestrando e me orientar.

Agradeço a toda equipe do GEARH, e especialmente a Msc. Mônica S. M. Castro pelo interesse e pelos incontáveis debates sobre este trabalho, que ajudaram em minha evolução.

Agradeço a todos os funcionários do PPGEA, como a querida e paciente Rose, e a todos os colegas e amigos do mestrado, especialmente aos mestrandos Pedro Cassini e Lorenza Uliana Zandonadi.

Agradeço a CAPES, pelo financiamento da bolsa de mestrado, a PETROBRAS, por disponibilizar os dados de campo, ao projeto *Reanalysis* da *National Centers for Environmental Predictions* –NCEP/ NOAA e ao INPE, por disponibilizarem os dados gratuitamente e assim permitirem a realização desta pesquisa.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

Na região costeira norte do Espírito Santo deságua, no oceano, a pluma fluvial do Rio Doce, que influencia em grande parte das características ambientais no entorno da sua foz e região costeira adjacente.

O objetivo do presente estudo foi simular a pluma fluvial do Rio Doce e estudar sua dinâmica no oceano, utilizando o sistema de modelos computacionais SisBsHiA, com a aplicação do modelo 2DH e do modelo de transporte lagrangeano. O modelo 2DH foi utilizado para geração dos campos de velocidade, enquanto o modelo lagrangeano foi utilizado na simulação da dinâmica da pluma do rio em diferentes cenários, envolvendo seus principais padrões comportamentais e processos hidrodinâmicos, associados às forçantes naturais.

O modelo 2DH foi calibrado com o uso de dados de maré e de correntometria. Seus resultados foram utilizados nos estudos das forçantes ambientais e foram acoplados ao modelo lagrangeano. Os resultados das simulações lagrangeanas foram contrastados com imagens de satélite, para avaliação do modelo e estudo da pluma.

A análise dos resultados indicou que existem diferentes padrões de distribuição da pluma do Rio Doce: ventos com alta intensidade provenientes do NE induzem a formação de vórtices ao sul da desembocadura, enquanto ventos com alta intensidade provenientes do SE atuam na contenção da pluma, formando uma protuberância junto à foz. Vazões elevadas do rio induzem a formação de protuberância junto à foz.

A simulação computacional da pluma do Rio Doce, através de modelo 2DH, demonstra boa aplicabilidade como primeira aproximação para a representação da dinâmica da pluma do Rio Doce. O uso do modelo lagrangeano, em conjunto com imagens de satélites, permitiu a identificação de características da dinâmica de plumas, em geral e da pluma do Rio Doce, observadas na revisão de literatura. Entretanto, os resultados obtidos foram considerados com ressalvas, pois o modelo apresentou melhor aplicabilidade para condições de vento de alta intensidade.

## ABSTRACT

In the northern coast of Espírito Santo discharges the Doce river fluvial plume, which highly influences the surrounding coastal environment.

The aim of this study was to simulate the Doce River fluvial plume and study its behavior. The study was carried out through 2DH model and a Lagrangean model. 2DH model was calibrated and its results were employed to study the plume dynamics. Lagrangean model results were compared with satellite images to analyze the model and plume dynamics.

Results indicated different plume dynamic patterns: the incidence of high intensity NE wind induce the vortex formation at river mouth south zone, the incidence of high intensity SE wind induce the plume contention at the river mouth front. High river flow discharge also induce the plume contention.

As a first approach, 2DH simulation represented a efficient method to study the Doce river plume dynamics. Lagrangean model application associated with satellites images allowed the characterization of plume dynamics, has observed in the literature review. Though, better results were achieved for high wind conditions, thus caution is needed to result interpretation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura.3.1 - Classificação de deltas fluviais, com deltas dominados pelo rio, por ondas e por maré. Fonte: Adaptado de Galloway, (1975 apud DAVIS JR & FITZGERALD, 2004). .....	19
Figura 3.2- Plot vermelho: série temporal das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de correntes medidas por ASA (2003) a 2m de profundidade nas coordenadas 413045 E e 7822573 N, datum WGS84. Plot azul: mesma série temporal subtraída da forçante maré (componentes M2 e S2). Período dos dados: 12/10 a 14/11/2002, dt= 20 min.Fonte: ASA, 2003 apud Campos, 2011.....	25
Figura 3.3- Imagem aérea da foz do Rio Doce, Linhares, Espírito Santo. Fonte:INPE,2010 .....	28
Figura 4.1- Imagem de satélite com contorno terrestre do domínio do modelo.Fonte: INPE-2010. Organização e Geoprocessamento: Christian V. Pedruzzi- 2011. ....	38
Figura 4.2- Representação do domínio modelado. ....	39
Figura 4.3- Representação da malha de elementos quadrangulares do domínio modelado. ....	40
Figura 4.4 - Contorno fechado com localização da imposição da vazão do rio, e contorno aberto representados no domínio do modelo .....	41
Figura 4.5- Mapa batimétrico gerado pela interpolação de dados de cartas náuticas e campanha de levantamento batimétrico. ....	43
Figura 4.6- Rosa dos ventos referentes aos dados do período entre 2000 e 2010 para região da foz do Rio Doce.....	48
Figura 4.7- Localização do ponto de medição maregráfica e do ADCP. ....	50
Figura 4.8- Processo de definição de cenários e obtenção de resultados para comparação com imagem de satélite. ....	53
Figura 5.1- Dados maré simulados e medidos <i>in situ</i> , para campanha de medição maregráfica de 19/03/2010 a 24/03/2010.....	55

Figura 5.2- Dados do módulo da velocidade simulados e medidos <i>in situ</i> , para duas campanhas: A) de 29/05/2008 a 05/06/2008; B) de 09/03/2009 a 16/03/2010. ....	56
Figura 5.3- Dados de direção das correntes simulados e medidos <i>in situ</i> , para duas campanhas;; A) de 29/05/2008 a 05/06/2008; B) de 09/03/2009 a 16/03/2010.....	57
Figura 5.4- Série temporal da variação da elevação da superfície da água simulados nos cenários 1 e 2.....	58
Figura 5.5-Série temporal, com dados a cada seis horas, do módulo da velocidade do vento, gráfico A, e ângulo do vento, gráfico B, utilizados na simulação do cenário 2. .	59
Figura 5.6 –Campo de correntes* no domínio do modelo em situação de maré de sizígia, na preamar (instante $t=226800$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A)Cenário 1 e B) Cenário 2. *vetores em escala fixa. ....	61
Figura 5.7 – Campo de correntes* no domínio do modelo em situação de maré de sizígia, na vazante (instante $t=237600$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A)Cenário 1 e B) Cenário 2. *vetores em escala fixa. ....	62
Figura 5.8 – Campo de correntes* no domínio do modelo em situação de maré de quadratura, na preamar (instante $t=777600$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A)Cenário 1 e B) Cenário 2. *vetores em escala fixa.....	63
Figura 5.9– Campo de correntes* no domínio do modelo em situação de maré de quadratura, na vazante (instante $t=788400$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A)Cenário 1 e B) Cenário 2. *vetores em escala fixa.....	64
Figura 5.10- Campo vetorial* evidenciando a formação de vórtices nos cenários 1 e 2, em diferentes condições de maré.*vetores em escala fixa .....	66
Figura 5.11- Série temporal do módulo da velocidade do vento e velocidade das correntes para os cenários 1 e 2, resultantes das simulações, monitorados na Estação ADCP.....	67
Figura 5.12- Série temporal do ângulo dos vetores de vento e ângulo dos vetores de velocidade da corrente, a cada seis horas, resultantes das simulações, monitorados na Estação ADCP.....	67
Figura 5.13 - Quadro acima - imagem de satélite referente ao cenário 3, com indicação quanto a principal observação. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante	

15:00:00 do dia 7/5/2001. Vento SW. Vazão de 243 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	70
Figura 5.14 - Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 5/5/2001. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 6/5/2001. Vento SW. Vazão de 243 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	71
Figura 5.15-Quadro acima - imagem de satélite referente o <i>cenário 4</i> , com indicações das principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 1/10/2005. Vento SE. Vazão de 786 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	73
Figura 5.16- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 29/9/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 30/9/2005. Vento SE. Vazão de 786 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	74
Figura 5.17- Quadro acima - imagem de satélite referente o cenário 5, com indicação linear quanto a principal observação. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 14/4/2009. Vento SE. Vazão de 1642 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	77
Figura 5.18- Quadro acima - imagem de satélite do dia 19/04/2009 obtidas pelo satélite Landsat5 Vento SE. Vazão de 1218 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM.. Quadro abaixo - imagem de satélite do dia 19/01/2004 obtidas pelo satélite Cbers. Vento SE. Vazão de 4420 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	78
Figura 5.19- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 12/4/2009. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 13/4/2009. Vento SE. Vazão de 1642 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	79
Figura 5.20- Quadro acima - imagem de satélite referente o <i>cenário 6</i> , com indicações quanto as principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 5/4/2005. Vento NE. Vazão de 1577 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	81
Figura 5.21- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 3/4/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 4/4/2005. Vento NE. Vazão de 1577 m <sup>3</sup> /s. Datum WGS84 –UTM. ....	82
Figura 5.22-Quadro acima - imagem de satélite referente o <i>cenário 7</i> . Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 18/7/2005. Ambos com indicações quanto as principais observações. Vento NE. Vazão de 603 m <sup>3</sup> /s. Datum	

WGS84 –UTM.....	85
Figura 5.23- Quadro acima - imagem de satélite do dia 16/08/2000 obtidas pelo satélite Landsat 5. Vento NE. Vazão de 322 m <sup>3</sup> /s.Datum WGS84 –UTM Quadro abaixo - imagem de satélite do dia 23/05/2001 obtidas pelo satélite Landsat 7. Vento NE. Vazão de 303 m <sup>3</sup> /s.Datum WGS84 –UTM .....	86
Figura 5.24- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 16/7/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 17/7/2005. Vento NE. Vazão de 603 m <sup>3</sup> /s.Datum WGS84 –UTM .....	87
Figura 5.25- Quadro acima - imagem de satélite referente o <i>cenário 8</i> , com indicações quanto as principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 11/4/2006. Vento NE. Vazão de 882 m <sup>3</sup> /s.Datum WGS84 –UTM.....	89
Figura 5.26- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 9/4/2006. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 10/4/2006. Vento NE. Vazão de 882 m <sup>3</sup> /s.Datum WGS84 –UTM .....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Vazão media mensal do Rio Doce referentes. Fonte: Coelho (2007).....	29
Tabela 4.1 - Significado da simbologia utilizadas nas equações básicas. ....	35
Tabela 4.2 - Resumo das condições de contorno consideradas nas simulações. ....	42
Tabela 4.3 - Constantes harmônicas da Barra do Rio Doce impostas no contorno aberto. .....	45
Tabela 4.4 - Vazões do Rio Doce na estação de Colatina e em sua foz. ....	46
Tabela 5.1- Resultados do critério de comparação entre os erros médios obtidos, para maré e correntes (magnitude), segundo Cawley & Hartnett (1992) e critério de avaliação da direção de corrente, segundo Odd & Murphy (1992). ....	54
Tabela 5.2- Cenários e respectivas imagens de satélite e condições ambientais. ....	68
Tabela 5.3 - Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 3</i> . ....	69
Tabela 5.4- Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 4</i> . ....	72
Tabela 5.5 - Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 5</i> . ....	76
Tabela 5.6 - Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 6</i> . ....	80
Tabela 5.7 - Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 7</i> .....	84
Tabela 5.8- Dados de vento utilizados durante a simulação do <i>cenário 8</i> . ....	88

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	17
2.1	OBJETIVOS GERAIS .....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
3.1	ESTUÁRIOS .....	18
3.2	PLUMAS.....	19
3.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL .....	20
3.4	ESTUDO DOS ESTUÁRIOS E PLUMAS ATRAVÉS DE MODELOS COMPUTACIONAIS .....	21
3.5	ESTUDO DOS ESTUÁRIOS E PLUMAS ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	25
3.6	ÁREA DE ESTUDO.....	28
3.6.1	VAZÃO DO RIO DOCE.....	29
3.6.2	CLIMA.....	29
3.6.3	ONDAS.....	30
3.6.4	MARÉ .....	30
3.6.5	GEOMORFOLOGIA.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	32
4.2	O MODELO COMPUTACIONAL SisBaHiA.....	32
4.2.1	O MODELO HIDRODINÂMICO .....	33
4.2.2	EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	34
4.2.3	O MODELO LAGRANGEANO.....	35
4.2.4	EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO LAGRANGEANO .....	36

4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO .....	37
4.3.1	DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO MODELADO .....	37
4.3.2	CONSTRUÇÃO DA MALHA.....	39
4.4	DEFINIÇÃO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	40
4.4.1	BATIMETRIA.....	42
4.4.2	RUGOSIDADE .....	43
4.4.3	DADOS MAREGRÁFICOS.....	44
4.4.4	DADOS DE VAZÃO DO RIO DOCE .....	45
4.4.5	DADOS DE VENTO.....	46
4.5	GEOMORFOLOGIA.....	47
4.6	CONDIÇÕES INICIAIS.....	49
4.7	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	49
4.8	CENÁRIOS PARA O ESTUDO DAS FORÇANTES .....	51
4.9	CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DA PLUMA E USO DAS IMAGENS DE SATÉLITE.....	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	CALIBRAÇÃO .....	54
5.2	ESTUDO DAS FORÇANTES OCEANOGRÁFICAS .....	58
5.3	SIMULAÇÃO DA PLUMA E USO DE IMAGENS DE SATÉLITE.....	68
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	93
7	REFERÊNCIAS.....	95

## 1 INTRODUÇÃO

O oceano costeiro pode ser considerado um receptor de água doce e de materiais drenados trazidos pela contínua descarga dos rios. Do ponto de vista físico, o local onde este fenômeno ocorre, os estuários, pode ser considerado uma fonte de liberação de um fluido mais leve em um fluido mais denso, resultando em uma camada/lente de águas do rio sobre o oceano, também chamadas de plumas (LIU *et al.*, 2008). As plumas atuam no transporte de sedimentos, nutrientes, materiais orgânicos e poluentes do continente para os oceanos. Em contrapartida, os oceanos, devido às forçantes naturais como maré e vento, introduzem suas águas em parte das bacias hidrográficas dos rios, afetando assim os processos naturais e as atividades antrópicas nos estuários (STACEY, 1999).

Os estuários podem ser descritos como a região de interação entre os recursos hídricos continentais - os rios - e costeiros - os oceanos - caracterizando uma foz litorânea. A complexidade e vulnerabilidade à influência do homem são características comuns a todos os estuários. Em condições naturais, os estuários são biologicamente mais produtivos do que os rios e oceanos adjacentes por apresentarem altas concentrações de nutrientes e circulação de água, constituindo-se no habitat ideal para reprodução de aves, mamíferos, peixes, etc. Da mesma forma, o crescimento da atividade econômica sempre esteve intimamente relacionado aos estuários, por serem adequados para instalação de portos, por serem uma via de acesso importante para o interior do continente, por produzirem grandes quantidades de pescado e por terem suas águas renovadas periodicamente sob a influência da maré (MIRANDA *et al.*, 2002).

A interação entre os recursos hídricos continentais e costeiros é reconhecida como importante tema de pesquisa e de fundamental relevância para o gerenciamento costeiro e de bacias hidrográficas. Este fato é comprovado pelo desenvolvimento de estudos científicos e pela promulgação, no Brasil, de legislação que preconiza a integração da gestão das bacias hidrográficas com a dos sistemas estuarinos e zonas costeiras (BRASIL, 1997).

O estudo de plumas é de grande complexidade devido à ocorrência mútua de vários processos físicos, químicos e biológicos em um só ambiente. Segundo Rosman (2001), a complexidade dos corpos d'água naturais torna inquestionável a necessidade da

aplicação de modelos computacionais para estudos, projetos de pesquisa e auxílio à gestão de recursos hídricos. Dentro deste escopo, diversos modelos são encontrados e vastamente aplicados como, por exemplo, o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA). Diante da aplicabilidade deste e de outros modelos computacionais a ambientes estuarinos, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos como ferramentas de análise acadêmica e de gestão ambiental (AMARAL, 2003; NOGUEIRA, 2006; PEREIRA, 2006; DIAS, 2007; SALDANHA, 2007; BARBOSA, 2008; ARENTZ, 2009).

Os modelos computacionais são, portanto, ferramentas integradoras que permitem o melhor conhecimento dos fenômenos naturais e que propiciam uma visão dinâmica dos processos físicos em sistemas ambientais complexos (ROSMAN, 2001).

Assim como os modelos computacionais, a utilização do sensoriamento remoto tem demonstrado múltiplas aplicabilidades, também atuando nas interfaces entre estudos geográficos, biológicos, químicos e físicos.

A região de estudo do presente trabalho contempla a foz da bacia hidrográfica do Rio Doce e o oceano adjacente, que está situada na região costeira norte do Espírito Santo. Esta bacia abrange uma área de drenagem de cerca de 83.400 km<sup>2</sup>, dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e 14% pertencem ao Estado do Espírito Santo (ANA, 2005), sendo esta uma região de grande importância econômica e ambiental para ambos os Estados.

Na foz do Rio Doce, e em sua região costeira adjacente, foram realizadas algumas pesquisas de modelagem computacional e de processamento de imagens de satélite. No tocante a este último, destacam-se os estudos de Coelho (2007), Zoffoli (2011) e Campos (2011), onde o primeiro analisou a dinâmica sedimentar da foz do Rio Doce, e os demais pesquisaram a pluma fluvial do Rio Doce e sua distribuição no oceano. No que tange a modelagem computacional, destaca-se o estudo de ASA (2003 apud. Campos, 2011) que analisou a hidrodinâmica da pluma do Rio Doce, utilizando também a avaliação de dados coletados *in situ*.

Nesse contexto, foram definidos os objetivos do presente trabalho, os quais são descritos no capítulo a seguir.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GERAIS**

Avaliar os principais mecanismos físicos atuando na dinâmica da pluma do Rio Doce ao desaguar na zona costeira, através do emprego de um modelo computacional.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Avaliar o emprego do modelo 2DH, do SisBaHiA, na representação da dinâmica da pluma do Rio Doce na região costeira adjacente.
- Analisar a influência do vento sobre a dinâmica da pluma.
- Analisar a influência da vazão fluvial sobre a dinâmica da pluma.
- Analisar a influência da maré sobre a dinâmica da pluma.
- Verificar a existência de padrões de dinâmica da pluma.
- Comparar os resultados do modelo computacional com imagens de satélite a fim de avaliar a aplicabilidade do modelo na representação da dinâmica da pluma.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ESTUÁRIOS

Estuário é definido como um corpo de água parcialmente fechado, ligado livremente ao mar adjacente. Sua área estende-se rio acima até o limite da influência da maré. Em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce, oriunda da drenagem continental (DYER, 1997 apud MIRANDA *et al.*, 2002).

De maneira geral, a definição do que é um estuário pode variar de acordo com o foco de estudo. Os profissionais da área ambiental adotam o termo para definir a região interior de um ambiente costeiro que se estende rio acima até o limite de influência da maré, sendo marcante a característica de interação das águas do rio com a do mar. Esta interação pode estender-se até a plataforma continental adjacente, caracterizando a chamada pluma estuarina, levando muitos pesquisadores a também considerar essa região como parte integrante do estuário (MIRANDA *et al.*, 2002).

Como a definição de estuários pode abranger ambientes com características distintas, Pritchard (1982 apud MILLERO, 2006) propõe formas de classificação baseada na distribuição das propriedades da água: estuário verticalmente misturado; estuário moderadamente estratificado; estuário altamente estratificado e o estuário de cunha salina.

Galloway (1975 apud DAVIS JR & FITZGERALD, 2004) propõe um esquema de classificação baseado na geomorfologia associada as forçantes ambientais: vazão do rio, onda e/ou maré, como apresentado na Figura 3.1.

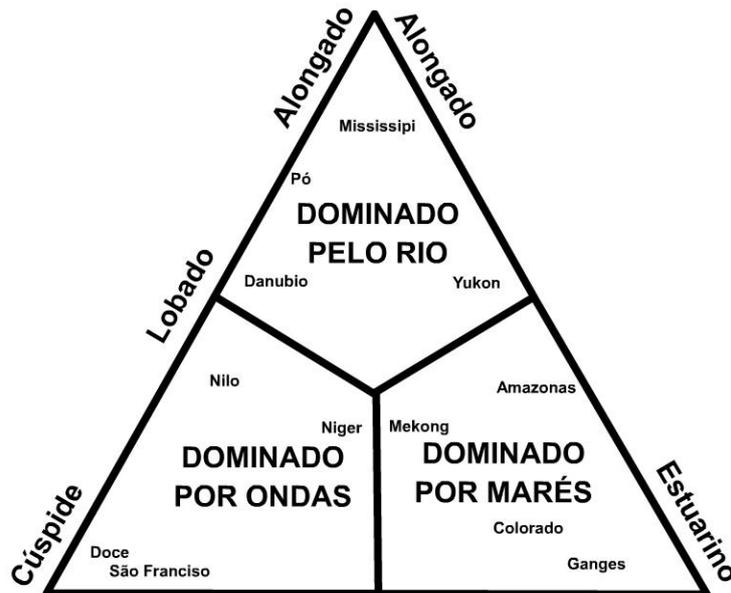


Figura.3.1 - Classificação de deltas fluviais, com deltas dominados pelo rio, por ondas e por maré. Fonte: Adaptado de Galloway, (1975 apud DAVIS JR & FITZGERALD, 2004).

### 3.2 PLUMAS

De acordo com Kourafalou (1996) uma pluma fluvial ou estuarina pode ser definida como uma estrutura dinâmica resultante da descarga de um fluido de menor densidade em um fluido de maior densidade, que contribui como uma fonte de quantidade de movimento. Do ponto de vista de estudos costeiros as plumas são o resultado da descarga de rios, material continental drenado, nos oceanos.

De acordo com Mann & Lazier (2006) as plumas costeiras podem ser classificadas como plumas fluviais e estuarinas. Na primeira há um domínio da descarga do rio sobre os efeitos de marés resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. Na segunda, os efeitos das marés dentro do estuário promovem a mistura da maior parte da água provinda da drenagem continental. Apesar desta classificação, uma série de variações do termo é observada na literatura científica: pluma do rio (MESTRES, 2007); pluma boiante ou pluma flutuante (YANKOVSKY, *et al.*, 2001); pluma estuarina (KOURAFALOU, 1996) e pluma de água doce (XING & DAVIES, 1999). A ampla variação de termos para se definir um mesmo fenômeno se

explica pela diversidade de mecanismos atuando nestas regiões de transição físicos e biogeoquímicos.

### **3.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL**

A descrição dos processos hidrodinâmicos nos ambientes costeiros pode ser expressa por equações diferenciais. Estas equações baseiam-se nas leis de conservação de massa (equação da continuidade), conservação de substâncias (equação da difusão de substâncias, e.g. sal), transporte de calor (equação da condução de calor) e conservação de quantidade de movimento (equação do movimento) (HOLZ & SUNDERMAN, 1980). O conjunto destas equações é chamado de modelo matemático.

A resolução de modelos matemáticos de fenômenos de circulação de água é complexa e o conjunto de equações diferenciais simples raramente possui soluções analíticas. Para a solução das equações representativas dos modelos matemáticos recorre-se, em geral, a métodos de interação numéricos, sendo este processo chamado de modelagem numérica (ROSMAN, 1989). De acordo com Wrobel (1989), a modelagem numérica consiste na solução das equações diferenciais parciais através de uma aproximação numérica, possibilitando reduzir o problema físico contínuo a um problema discreto.

Dentre os métodos numéricos aplicados na modelagem numérica podemos destacar o das diferenças finitas, dos elementos finitos e dos volumes finitos. Neles o domínio da geometria a ser estudado é representado por uma malha ou grade computacional, composta por células, que são constituídas por nós onde as variáveis interagem. Entretanto, no método da diferenças finitas os valores nos nós são obtidos através da expansão truncada em série de Taylor, enquanto, no método para os elementos finitos os valores são obtidos por meio de polinômios de interpolação, validos para cada sub-região ou elemento da malha (WROBEL, 1989).

O primeiro objetivo de um modelo numérico é descrever algum fenômeno comportamental do mundo real em termos numéricos. O segundo objetivo é que esta descrição seja feita de maneira que o valor da informação dada pelo modelo seja importante o suficiente para ser modelada. Ou seja, o modelo deve ser funcional, eficiente e de baixo custo. Considerando que, se bem empregados, os modelos

numéricos podem descrever praticamente qualquer modelo matemático, com pouca perda de informações e de forma eficiente, estas aproximações se tornaram bastantes utilizadas no estudo de corpos d'água como lagos, reservatórios, águas costeiras, estuários e rios (HOLZ & SUNDERMAN, 1980; ROSMAN, 2009). Entretanto, a complexidade dos modelos numéricos demanda a associação destes a ferramentas computacionais e a técnicas de programação.

### **3.4 ESTUDO DOS ESTUÁRIOS E PLUMAS ATRAVÉS DE MODELOS COMPUTACIONAIS**

Apesar da complexidade dos ambientes e das plumas estuarinas, a compreensão desses sistemas tem se desenvolvido nos últimos anos através de análise de dados de campo e modelagem computacional (KOURAFALOU, 1996; GARVINE, 1999; XING & DAVIES, 1999; COOPER, 2001; GARCIA BERDEAL *et al.*, 2002; MESTRES, 2007).

A aplicação de modelos computacionais para estudos hidrodinâmicos de estuários e de plumas deve levar em consideração diversos fatores, havendo, portanto, diferentes enfoques possíveis. Muitos estudos de modelagem focaram seus trabalhos na dinâmica das plumas considerando domínios de modelagem costeira simplificados, analisando assim o papel que cada uma das forçantes ambientais desempenha sobre a dinâmica da pluma (MESTRES, 2007).

Os resultados de modelos idealizados de plumas demonstram que as plumas tendem a se espalhar radialmente a partir de sua fonte, sendo defletadas pela ação da força de Coriolis (O'DONELL, 1990). Em baixas latitudes a força de Coriolis é reduzida, permitindo, em alguns casos, que as plumas alcancem regiões mais distais à costa. Em altas latitudes a deflexão provocada por ela espalha a pluma longitudinalmente à costa (GARVINE, 1999). Apesar de sua importância, a advecção e a deflexão provocadas pela força de Coriolis podem ser facilmente suprimida por outras forçantes, como vórtices, correntes de maré e vento (CHAPMAN, 1994).

Yankovisky & Chapman (1997) propuseram que a estrutura das plumas pode ter uma variedade de formas dependendo da circulação do ambiente. Entretanto, a maioria das plumas pode ser categorizada pela distribuição ao longo da coluna d'água. Diante dessa

premissa, as plumas podem ser classificadas em: pluma advectada pelo fundo (PAF), pluma superficialmente advectada (PSA) e pluma intermediária (PIN). As PAF acompanham as corrente costeiras mantendo o contato com o fundo, com densidade semelhantel em toda a coluna de água. A PSA mantêm-se na camada superficial da água, formando uma camada fina. Este tipo de pluma pode se espalhar por longas distâncias sobre a plataforma continental e tem pouco ou nenhum contato com o fundo. As PIN ocorrem com frequência, principalmente quando as plumas se espalham no sentido da plataforma continental, mantendo contato com o fundo por certa distância e posteriormente perdendo contato com o substrato do fundo. Portanto, a parte da pluma próxima ao continente será uma PAF e parte distal será uma PSA. No mesmo estudo, Yankovisky & Chapman (1997) sugerem que a geometria da plataforma continental adjacente a foz e a geometria da desembocadura influenciam diretamente no tipo de pluma a ser formada. Valores elevados de declividade da plataforma continental geralmente formam PSA. Valores baixos de declividade formam PAF. Profundidades de desembocaduras superiores a profundidade de seu oceano adjacente formam PSA. Apesar das valiosas informações desse estudo, a complexidade morfológica dos ambientes estuarinos e costeiros exige que outras variáveis sejam também adotados para a compreensão da dinâmica das plumas.

A variação da vazão do rio é um dos fatores que podem modificar a dinâmica de uma pluma. Vazões elevadas permitem a criação de vórtices que se desprendem da pluma, pois nessas situações as plumas atingem longas distâncias e possuem quantidades elevadas de água menos densa. Tanto vazões altas, quanto vazões baixas propiciam a formação de vórtices ao redor da pluma e próximos a costa. Os vórtices, por sua vez, dominam a dinâmica na região de descarga do rio, provocando a advecção da água do entorno da pluma. Estes processos tendem a se intensificar quando há ocorrência correntes costeiras(YANKOVISKY *et al.*, 2001).

Xing & Davies (1999), ao estudarem o Rio Ebro, via modelagem e dados de campo, observaram que a corrente superficial gerada por ventos possui forte influência sobre a circulação da pluma e altera significativamente a sua dinâmica. Contudo, sua atuação limita-se a uma camada superficial, cuja espessura está relacionada à intensidade do vento. Os estudos de Liu *et al.* (2008), no Rio Danshui, e de Yankovisky *et al.*(2001), corroboram com Xing & Davie (1999), indicando que a dinâmica da pluma pode estar

diretamente relacionado à direção e intensidade do vento. Entretanto, a variedade de padrões de evolução da pluma, para um mesmo vento, pode estar associada a diferentes anomalias de densidade (provocadas principalmente pela vazão do rio) e variação de maré.

De acordo com Rennie (1999 apud FONG & GEYER, 2002), devido a sua susceptibilidade à ação das forçantes ambientais, as plumas naturais muitas vezes não se assemelham a plumas idealizadas, como as plumas flutuantes estudadas em laboratório e em experimentos numéricos. Plumais reais têm seu destino fortemente influenciado por forçantes como vento e correntes costeiras, pois estes fatores dominam sua dinâmica macroscópica. Portanto, qualquer estudo que pretenda prever o transporte de água de uma pluma deve levar em consideração a influência destes forçantes.

James (2002), ressalta que alguns fatores não incluídos nos modelos computacionais, como os sólidos em suspensão e a floculação provocada por interação de partículas, podem ser significativos efeitos na influência de estudos de ambientes costeiros. Se a concentração de sólidos em suspensão é muito alta a densidade relativa da água pode fluir como uma corrente de densidade, influenciando na hidrodinâmica. Ainda segundo James (2002), a inclusão desses fatores torna-se difícil devido a complexidade de sua parametrização.

O método de rastreamento de partículas é uma alternativa aos modelos que consideram a presença de sólidos em suspensão. Entretanto, se as partículas são consideradas dinamicamente passivas, as equações que governam a hidrodinâmica não são afetadas pela variação da concentração de sólidos em suspensão. Neste caso, o cálculo do fluxo residual e correntes de maré pode ser feito apenas uma vez para diferentes cenários de número de partículas. Idealmente, modelos que consideram sólidos em suspensão também requerem alta definição na vertical, para contemplar as estratificações e camadas de contorno, e na horizontal, para representar frentes de turbiditos e plumas (JAMES, 2002).

Na revisão bibliográfica nacional destacam-se os estudos de Leite (2007), Silva *et al.* (2009), Trochimczuk & Schettini (2003) e ASA (2003 apud CAMPOS, 2011).

Leite (2007) utilizou o sistema de modelos SisBaHiA para analisar a ação do cisalhamento eólico sobre a circulação da região do estuário de Guamaré (Rio Grande

do Norte, Brasil) evidenciando a ação predominante do vento sobre a circulação das águas costeiras. A autora sugere que, de maneira geral, a direção e intensidade das correntes predominantes variam com as mudanças sazonais do vento, com atuação ainda mais evidente durante os períodos de maré de quadratura.

Silva *et al.* (2009), ao estudarem a descarga do rio Amazonas através de dados hidrográficos e dos resultados do modelo computacional ATL-6, relatam que a distribuição da pluma de água de baixo valor de salinidade está diretamente relacionada à variabilidade sazonal e espacial das correntes costeiras. Neste caso, verificou-se o deslocamento sazonal da pluma no norte do Brasil segundo a direção dos alísios e as correntes de fronteiras, com uma maior predominância da pluma de água Amazônica próximo da foz do rio Amazonas no primeiro semestre do ano, coincidente com a maior vazão do rio e dos ventos alísios de nordeste. De março a maio se tem maior deslocamento da pluma para sudeste da foz do rio Amazonas, ao longo e próximo da costa. Resultados do modelo ATL-6 mostram também a formação de anéis, em consequência da retroflexão da Corrente Norte do Brasil, com influência de água Amazônica em sua volta de agosto a setembro, tendendo a diminuir nos meses subsequentes e desaparecendo em dezembro, associado com a variabilidade sazonal e espacial das correntes de fronteiras e de vazão do rio Amazonas.

Trochimczuk & Schettini (2003), que estudaram a pluma do estuário do Rio Itajaí (SC), afirmam que as variações de descarga fluvial do rio proporcionam a formação tanto de plumas fluviais como de estuarinas. Os autores sugerem também que a concentração de material particulado em suspensão e a quantidade relativa de água doce na pluma costeira são proporcionais à descarga fluvial, e que independentemente da descarga fluvial, o desvio da pluma ocorre sempre em direção norte-nordeste, evidenciando a predominância de correntes oceânicas sobre a dinâmica da pluma.

No tocante a trabalhos de modelagem na região do Rio Doce destaca-se o estudo de ASA (2003 apud CAMPOS, 2011). Seus resultados indicam que na região da desembocadura do Rio Doce, as duas componentes de maré predominantes ( $M_2$  e  $S_2$ ) possuem baixa influência na magnitude das correntes costeiras, com a forçante maré respondendo por cerca de 20%, em média, da magnitude das velocidades das correntes da região. A Figura 3.2 apresenta as correntes medidas e corrente modeladas sem a atuação da maré. A velocidade média obtida para a série de dados das correntes medidas

por ASA (2003 apud CAMPOS, 2011) foi de 0,24 m/s, enquanto as velocidades de corrente ocasionadas apenas pela maré apresentaram média de 0,05 m/s para toda a série de dados, com valores máximos atingindo 0,12 m/s nas marés de sizígia.

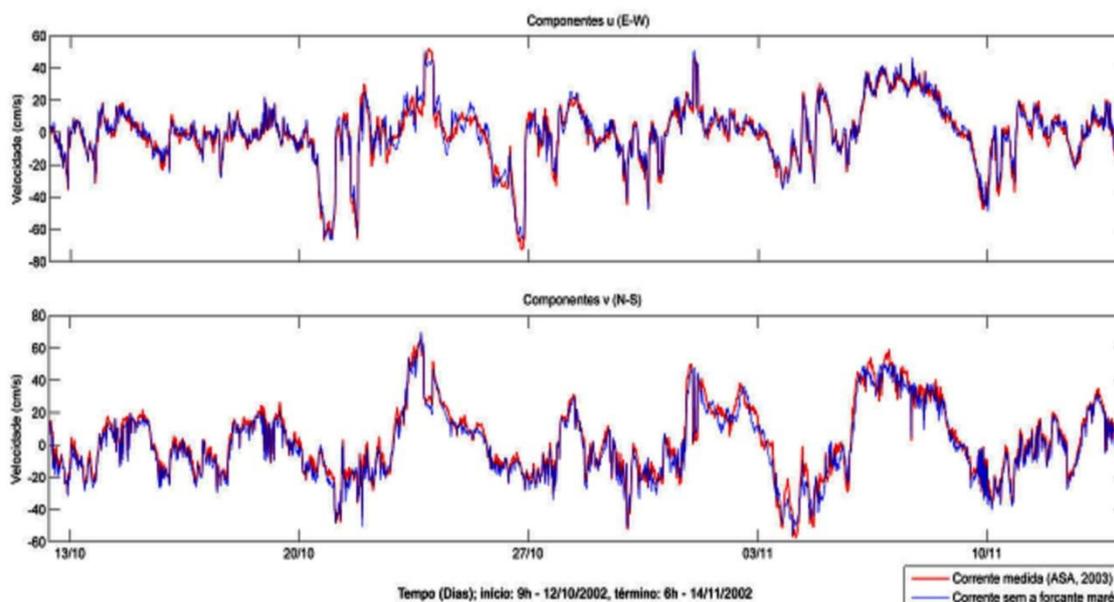


Figura 3.2- Plot vermelho: série temporal das componentes Leste (superior) e Norte (inferior) dos vetores de correntes medidas por ASA (2003) a 2m de profundidade nas coordenadas 413045 E e 7822573 N, datum WGS84. Plot azul: mesma série temporal subtraída da forçante maré (componentes M2 e S2). Período dos dados: 12/10 a 14/11/2002,  $dt= 20$  min. Fonte: ASA, 2003 apud Campos, 2011.

### 3.5 ESTUDO DOS ESTUÁRIOS E PLUMAS ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como a obtenção de informações de uma área por um sensor que não está em contato com esta. As informações registradas pelo sensor durante esse processo são os dados quantitativos e qualitativos da energia eletromagnética refletida e emitida pelo objeto alvo. Portanto, os dados capturados variam de acordo com as interações entre a energia eletromagnética e os objetos em estudo (MCCOY, 2005).

A escolha de diferentes faixas espectrais da energia eletromagnética (bandas) propicia a

possibilidade de criação de imagens de uma área, para o estudo de diferentes fenômenos naturais e de suas principais características ambientais. Os sensores remotos como satélites, portanto, permitem a formulação de imagens de indispensável valor para a realização de estudos ambientais (MCCOY, 2005).

Processos naturais terrestres e costeiros apresentam grande variabilidade espacial e temporal. Assim, a utilização de imagens de satélites representa uma ferramenta singular nos estudos de padrões de dinâmica das plumas estuarinas.

A partir da confrontação de imagens de satélite e dados hidrológicos é possível analisar mudanças, de origem natural e antrópica, na morfologia e dinâmica sedimentar das desembocaduras de rios e praias costeiras adjacentes a estes. Atividades como a construção de hidrelétricas, o desmatamento, a captação desregrada de água e mudanças climáticas provocam alterações no regime de vazão, que por sua vez, altera a dinâmica de energia do rio. Um dos principais resultados dessas modificações são o aumento da deposição de sedimentos com estreitamento da foz e aumento da área emersa das barras (COELHO, 2007).

A análise de imagens de satélite indica que, de maneira geral, as maiores concentrações de sedimentos em suspensão são encontradas numa faixa contínua próxima a linha de costa, sugerindo que as concentrações observadas próximas a região da foz de um rio não são apenas determinadas pela descarga do mesmo. Este fato está relacionado à atuação de processos de ressuspensão de sedimentos por efeito da turbulência causada pelos ventos, correntes de marés e ondas (LORENZZETTI *et al.*, 2007).

De acordo com Zoffoli (2011), a análise das reflectâncias nas diferentes bandas espectrais permite a identificação e a determinação da distribuição espacial de alguns constituintes das plumas costeiras. Em seu estudo sobre a pluma do Rio Doce, por exemplo, a análise dos espectros de reflectância demonstrou que os constituintes dominantes da pluma de sedimentos foram o fitoplâncton e substâncias dissolvidas, havendo uma relação entre a intensidade da vazão do rio e a área da pluma.

Campos (2011), que também analisou a variabilidade espacial e temporal da pluma do Rio Doce, através de sensoriamento remoto, observou que a vazão do rio Doce é a principal forçante que controla a área do núcleo da pluma, porém esta área não é diretamente proporcional a vazão, pois outros fatores, como o vento, também

influenciam na dimensão da área.

ASA (2003 apud CAMPOS, 2011), ao realizar o levantamento dos perfis de salinidade e temperatura em estações oceanográficas na região estuarina do Rio Doce (no dia 18 de março de 2002, com vazão do rio igual a 948 m<sup>3</sup>/s), concluiu que a estrutura termohalina vertical da coluna de água indicava que a pluma se espalha no ambiente costeiro em uma fina camada superficial sobre a água oceânica. Com isso, o vento atua principalmente no espalhamento das regiões periféricas da pluma, sendo efetivo mesmo em situações de baixa velocidade. Estas informações corroboraram para os estudos de Campos (2011), que constatou os seguintes padrões da pluma do Rio Doce: presença de circulação ciclônica ao sul da desembocadura, típicos dos meses de baixa vazão (geralmente entre os meses de abril à outubro), estando associados a presença de ventos constantes de N-NO com intensidades superiores a 5 m/s; presença de protuberância circular orientada entre SE e S que ocorrem em períodos de vazões médias e altas e em diversas situações de vento; e, para vazões extremas o padrão de distribuição mostra uma dispersão radial a partir da desembocadura.

### 3.6 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo contempla a foz do Rio Doce, região norte do litoral do Espírito Santo, incluindo parte da zona estuarina da bacia hidrográfica do Rio Doce e sua zona costeira adjacente (Figura 3.3).

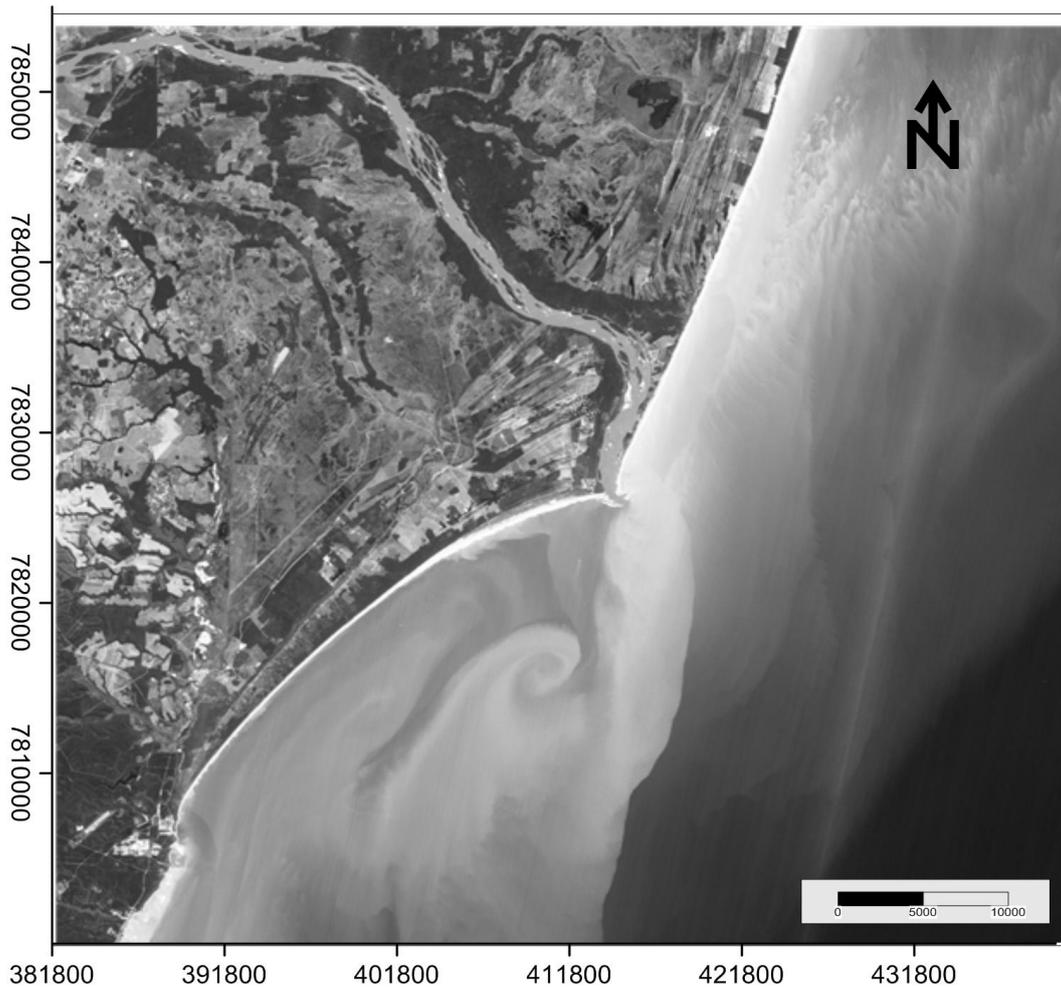


Figura 3.3- Imagem aérea da foz do Rio Doce, Linhares, Espírito Santo. Fonte:INPE,2010

### 3.6.1 VAZÃO DO RIO DOCE

Por ser de grande importância social, ambiental e econômica para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, o Rio Doce possui uma ampla rede de estações hidrográficas, com aproximadamente cinquenta e dois postos pluviométricos e cinquenta e oito postos fluviométricos, todos pertencentes à ANA -Agência Nacional de Águas- (ANA, 2005).

Coelho (2007) calculou a vazão média ( $Q_{\text{média}}$ ) de longa duração, período entre 1939 e 2005, utilizando dados da estação fluviométrica de Colatina-ES e obteve valor igual a  $918\text{m}^3/\text{s}$ . No mesmo estudo são apresentadas as vazões médias para cada mês, como demonstrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Vazão media mensal do Rio Doce referentes. Fonte: Coelho (2007)

Mês	Vazão média( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Meses considerados
Janeiro	1800,04	60
Fevereiro	1365,7	60
Março	1238,17	61
Abril	916,47	61
Mai	680,51	60
Junho	570,3	60
Julho	514,94	61
Agosto	457,72	61
Setembro	435,64	60
Outubro	540,69	60
Novembro	952,26	60
Dezembro	1632,82	59

### 3.6.2 CLIMA

A região da foz do Rio Doce encontra-se em zona caracterizada por chuvas tropicais de novembro à março (verão austral), com estação seca durante os meses entre abril e outubro (outono – inverno austral). A temperatura média anual é de  $22^\circ\text{C}$ , ficando a média das máximas entre  $28^\circ$  e  $30^\circ\text{C}$ , enquanto que as mínimas apresentam-se em torno de  $15^\circ\text{C}$ . De acordo com dados do Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo (CTH/USP), entre fevereiro e 1972 e janeiro de 1973, os

ventos de maior frequência são os provenientes do quadrante nordeste (NE) e os ventos de maior intensidade são do quadrante sudeste (SE). Os primeiros estão associados aos ventos alísios, que sopram durante a maior parte do ano, enquanto os últimos estão relacionados às frentes frias que chegam periodicamente à costa capixaba durante todo o ano (BANDEIRA *et al.*, 1975 apud ALBINO, 1999).

### **3.6.3 ONDAS**

Assim como os ventos as ondas procedem de dois setores principais, NE e SE, com predominância do primeiro. As ondas do setor SE, associadas às frentes frias, embora sejam menos frequentes, são mais energéticas do que as do quadrante NE, associadas aos ventos alísios (Bandeira *et al.*, 1975 apud ALBINO, 1999).

A análise das ocorrências de onda para a costa do Espírito Santo, considerando 45 anos de dados de ondas do ECMWF, realizada por Piumbini (2010), mostra a predominância de ondas com períodos entre 7,0s e 8,0s para as estações do verão e primavera austral, e 8,0s e 9,0s para o outono e inverno austral. No mesmo estudo, a análise da altura significativa das ondas apresenta ocorrência em torno de 1,0m a 2,0m.

### **3.6.4 MARÉ**

De acordo com o dados da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) na região da foz do Rio Doce as marés variam entre 1,25m e 0,09 m, sendo o nível médio do mar igual a 0,67m com relação ao nível de redução. Estas características demonstram que a região de estudo possui regime de micro maré semidiurna.

### 3.6.5 GEOMORFOLOGIA

De acordo com Martin *et al.* (1996), a foz do Rio Doce localiza-se na região em que os depósitos do quaternário tiveram seu maior desenvolvimento, estando este processo associado às desembocaduras fluviais.

Na evolução geológica da planície deltaica do Rio Doce, e ainda atualmente, destaca-se, além do volumoso aporte sedimentar, a atuação do fluxo do rio no bloqueio de sedimentos transportados pela corrente longitudinal costeira (ALBINO, 1999).

O Rio Doce é a principal área fonte de sedimentos terrígenos para a região marinha norte do estado do Espírito Santo. Isto se deve a sua grande capacidade no transporte de sedimentos desde a bacia hidrográfica até o mar. A pluma formada por sua descarga de sólidos em suspensão inicialmente apresenta concentrações de 4mg/l, diminuindo rapidamente a concentração para 2 e 1mg/l a cerca de 30Km da costa. A redução da concentração de partículas suspensas na coluna d'água indica a deposição deste material ao longo da pluma, recobrando de lama os depósitos de areias terrígenas até a profundidade de 20-25m (SUMMERHAYES *et al.*, 1976 apud PRATA,2007).

Coelho (2007) constatou modificações da morfologia da desembocadura, do canal fluvial e da linha de costa, decorrentes da ação antrópica, ao longo dos anos, na bacia hidrográfica. O mesmo estudo indica que estas alterações somadas à dinâmica marinha estão aos poucos provocando acúmulo considerável de sedimentos no flanco sul da foz e erosão no flanco norte. Esta nova dinâmica de transporte de sedimentos pode, com o passar dos anos, desencadear processos erosivos mais intensos nas margens do canal fluvial e nas praias adjacentes ao Rio Doce.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A ferramenta computacional utilizada na modelagem foi o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA). Nos itens a seguir serão apresentadas, de maneira sucinta, algumas características do modelo SisBaHiA e a metodologia para construção da simulação e obtenção dos resultados. Cabe ressaltar, que o presente trabalho não pretende diretamente manipular ou testar as equações matemáticas que governam o escoamento de fluidos.

Seguiu-se a metodologia propostas por Rosman (2009) para aplicação do modelo. Dados ambientais disponíveis como batimetria, maré, regime de vazão do rio e vento foram reunidos, tratados e fornecidos ao modelo dentro de um domínio pré-definido. Outras informações sobre a região como geomorfologia, sedimentologia e clima foram levantadas. Estas, apesar de não terem sido utilizadas diretamente no modelo computacional, permitiram melhor compreensão dos principais agentes físicos envolvidos nos processos hidrodinâmicos da região em questão.

Todos os dados georreferenciados empregados e apresentados no presente trabalho possuem datum horizontal WGS-84 e sistema de projeção de Mercator (UTM-Universal Transverse Mercator) zona 24S. No que tange a temporalidade adotou-se a hora local.

### **4.2 O MODELO COMPUTACIONAL SisBaHiA**

O modelo computacional SisBaHiA é um sistema de modelagem em ambiente Windows, desenvolvido pela área de Engenharia Costeira e Oceânica do Programa de Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e se encontra em contínuo desenvolvimento desde 1987.

O SisBaHiA tem discretização espacial via elementos finitos e adota diferenças finitas

na discretização temporal, oferecendo os seguintes módulos: hidrodinâmico, transporte advectivo-difusivo euleriano, transporte advectivo-difusivo lagrangeano, qualidade de água e geração de ondas. Além disso, possui um módulo tridimensional e um módulo bidimensional. Este último, utiliza as equações da continuidade e quantidade de movimento promediadas na vertical (ROSMAN, 2009).

O presente estudo utilizou o módulo hidrodinâmico 2DH e o módulo lagrangeano 2DH, ambos no modo barotrópico. Utilizaram-se os resultados do primeiro para calibração do modelo e análise das forçantes que atuam na região em estudo, enquanto os do segundo foram utilizados para comparar a dinâmica da pluma do Rio Doce com as imagens de satélite da região.

#### **4.2.1 O MODELO HIDRODINÂMICO**

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é de linhagem FIST (*Filtered in Space and Time*), onde a modelagem da turbulência do modelo hidrodinâmico é baseada em técnicas de filtragem. Mais especificamente, o modelo hidrodinâmico adotado a versão 3D do FIST (FIST3D) que é um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional para escoamentos de grande escala e homogêneos, que resolve as equações de *Navier- Stokes* considerando a aproximação da pressão hidrostática (ROSMAN, 2009).

A técnica numérica do FIST3D divide-se em dois módulos: o 2DH e o 3D. O primeiro calcula os valores de elevação da superfície livre através de uma modelagem bidimensional integrada na vertical e, em seguida, calcula o campo de velocidades. O segundo, dependendo dos dados de entrada, pode ser computado de modo tridimensional. Neste caso, a discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, com a discretização completa do domínio resultando em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível *Z* da transformação sigma (ROSMAN & MARTINS, 1999; ROSMAN, 2009). A discretização temporal ocorre, implicitamente, através de diferenças finitas.

A discretização espacial é feita de forma preferencial por elementos finitos quadrangulares biquadráticos, podendo também ser feita por elementos finitos triangulares quadráticos ou ambos (ROSMAN, 2009).

O modelo hidrodinâmico representa a circulação hidrodinâmica, determinando a quantidade de movimento da água e o direcionamento do escoamento, sendo a base primordial para um modelo de análise de circulação em corpos de água.

#### 4.2.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO HIDRODINÂMICO

Existem três equações básicas governantes do módulo 2DH, originadas da integração vertical analítica das equações governantes do modelo hidrodinâmico tridimensional, necessárias para determinar as três incógnitas de circulação hidrodinâmica ( $\zeta$ ,  $U$ ,  $V$ ) em um escoamento 2DH integrado na vertical, onde as dimensões do problema são reduzidas ao plano horizontal.

A primeira é a equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $x$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\Phi \text{sen } \theta V - \frac{U}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (1)$$

A segunda é a equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção  $y$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_o} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left( \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) \\ & + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B) - 2\Phi \text{sen } \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \end{aligned} \quad (2)$$

A terceira é a equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (3)$$

O significado da simbologia utilizada nas equações básicas de circulação hidrodinâmica de um escoamento integrado na vertical (2DH) é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Significado da simbologia utilizadas nas equações básicas.

<b>Simbologia</b>	<b>Significado</b>
$U$	Velocidade promediada na vertical na direção x
$V$	Velocidade promediada na vertical na direção y
$t$	Tempo
$x,y,z$	Direções do sistema de coordenadas
$g$	Gravidade
$\zeta$	Elevação da superfície livre
$H$	Altura instantânea da coluna de água
$\rho^o$	Densidade constante de referência
$\bar{\rho}$	Densidade da água promediada na vertical
$\bar{\tau}_{xx}, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{yy}$	Tensões turbulentas
$\tau_x^S, \tau_y^S$	Tensões de atrito na superfície livre
$\tau_x^B, \tau_y^B$	Tensões de atrito no fundo
$2\Phi \text{ sen } \theta$	Aceleração de coriolis
$\Sigma q$	Balanço dos fluxos (precipitação, infiltração e evaporação)

### 4.2.3 O MODELO LAGRANGEANO

O modelo Lagrangeano é utilizado na simulação de transporte advectivo-difusivo, com reações cinéticas, podendo ser considerado nas dimensões 3D ou 2DH. Este tipo de modelo é freqüentemente utilizado na simulação de transporte de escalares que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna d'água.

O modelo Lagrangeano utiliza os campos de velocidade gerados pelo modelo hidrodinâmico sem estar restrito as limitações de escala impostas pela grade de discretização (ROSMAN, 2009).

O modelo representa as escalares de interesse por um número finito de partículas lançadas na região fonte, e dispostas aleatoriamente, sendo carreadas pelas correntes (advecção) computadas através do modelo hidrodinâmico. O lançamento das partículas, assim como a vazão, pode ser constante ou variável no tempo (ROSMAN, 2009).

#### 4.2.4 EQUAÇÕES BÁSICAS DO MODELO LAGRANGEANO

As equações básicas do modelo Lagrangeano buscam a determinação da posição de partículas dentro do domínio do modelo a cada passo de tempo. A trajetória de cada partícula no instante seguinte ( $P^{n+1}$ ) é calculada através da expansão em série de *Taylor* a partir da posição anterior conhecida ( $P^n$ ), como demonstrado pela equação 4.

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + \text{T.A.D} \quad (4)$$

Sendo T.A.D os termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais da posição  $p$  são obtidas a partir do campo de velocidades resultantes do modelo hidrodinâmico, como demonstrado nas equações 5 e 6. Entretanto, para tal consideração admite-se que, nas escalas resolvíveis, as velocidades para o transporte advectivo das partículas,  $\vec{V}(u, v, w)$ , são as mesmas das velocidades das correntes do modelo hidrodinâmico

(ROSMAN, 2009).

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad (5)$$

$$\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \quad (6)$$

### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

#### 4.3.1 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO MODELADO

A definição do domínio modelado depende de seus contornos limites. No presente estudo estes contornos foram definidos utilizando-se imagens da banda 2 e 4, dentre os anos 2000 e 2010, dos satélites CBERS 2, CBERS 2B e LANDSAT5 disponíveis no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). De acordo com INPE (2008), cada pixel das imagens (banda 2 e 4) LANDSAT5, CBERS 2 e CBERS 2B possuem resolução espacial de 30 e 20 metros respectivamente.

Foram determinados dois contornos limites: o contorno de terra e o contorno de mar. Para o contorno de terra foi utilizada uma imagem georreferenciada da banda 4 do satélite CBERS 2B, com data de 24 de fevereiro de 2010 (Figura 4.1). A escolha dessa imagem justificou-se pela data da campanha batimétrica, que foi realizada no dia 19 de fevereiro de 2010.

No limite sul deste contorno encontra-se a praia de Barra do Riacho e no limite norte encontra-se a praia de Cacimbas. O contorno foi digitalizado para criar a linha de costa e margens e limites do Rio Doce.

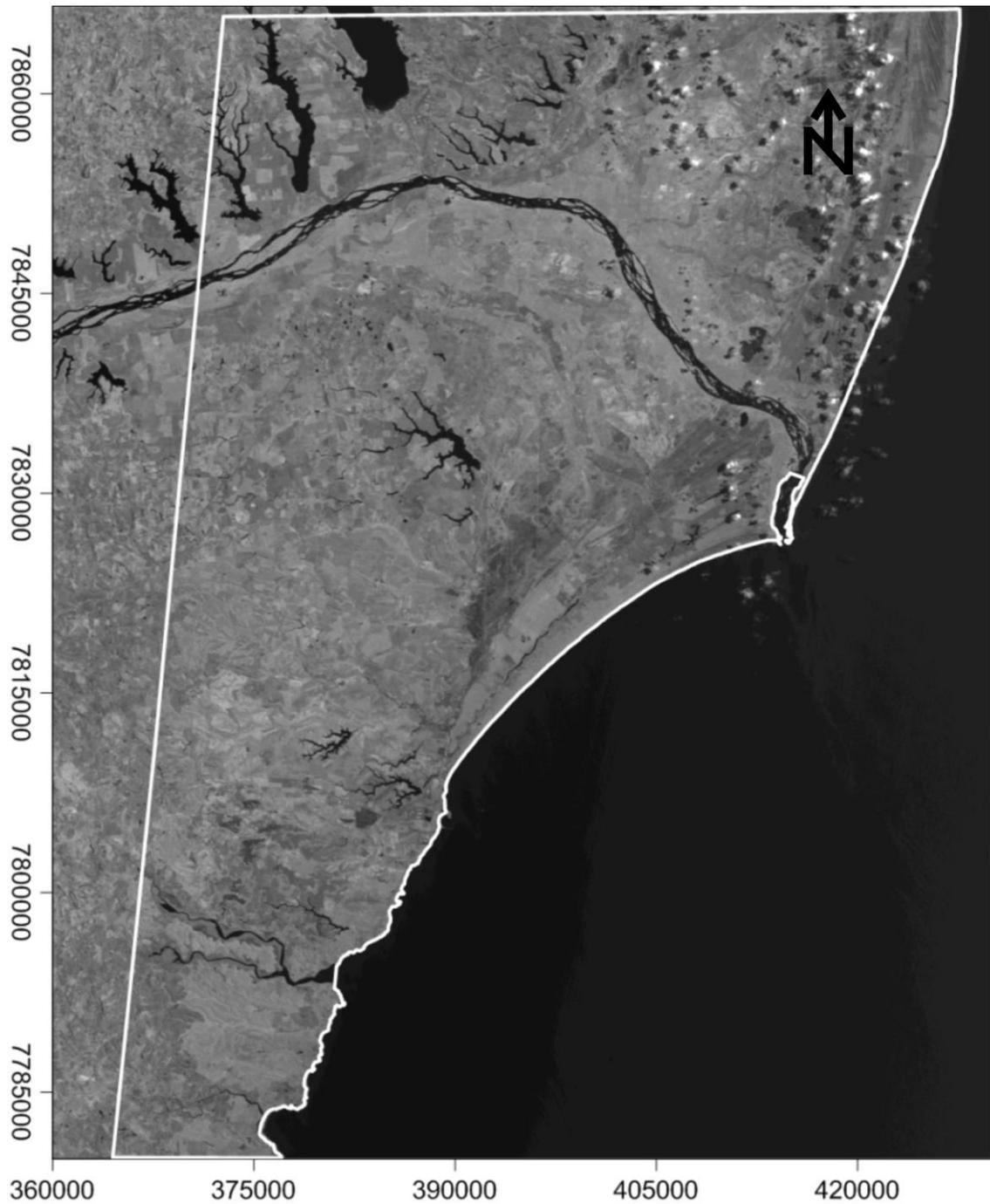


Figura 4.1- Imagem de satélite com contorno terrestre do domínio do modelo. Fonte: INPE-2010. Organização e Geoprocessamento: Christian V. Pedruzzi- 2011.

O contorno de mar foi definido através da análise de imagens da banda 2 dos satélites LANDSAT5, CBERS 2 e CBERS 2B. Salienta-se que esta banda (com intervalo espectral de 0,52-0,60  $\mu\text{m}$ ) apresenta sensibilidade à presença de sólidos em suspensão, servindo como um indicador do espalhamento pluma no oceano.

As análises das imagens corroboraram com os estudos de Coelho (2007) e Prata (2007), demonstrando que os processos hidrodinâmicos mais relevantes, quanto à pluma do rio, ocorrem em um raio de aproximadamente 30Km a partir de sua desembocadura.

Com definição dos contornos limites determinou-se o domínio da modelagem, tendo este uma área total de aproximadamente 2.749 km<sup>2</sup> (Figura 4.2).

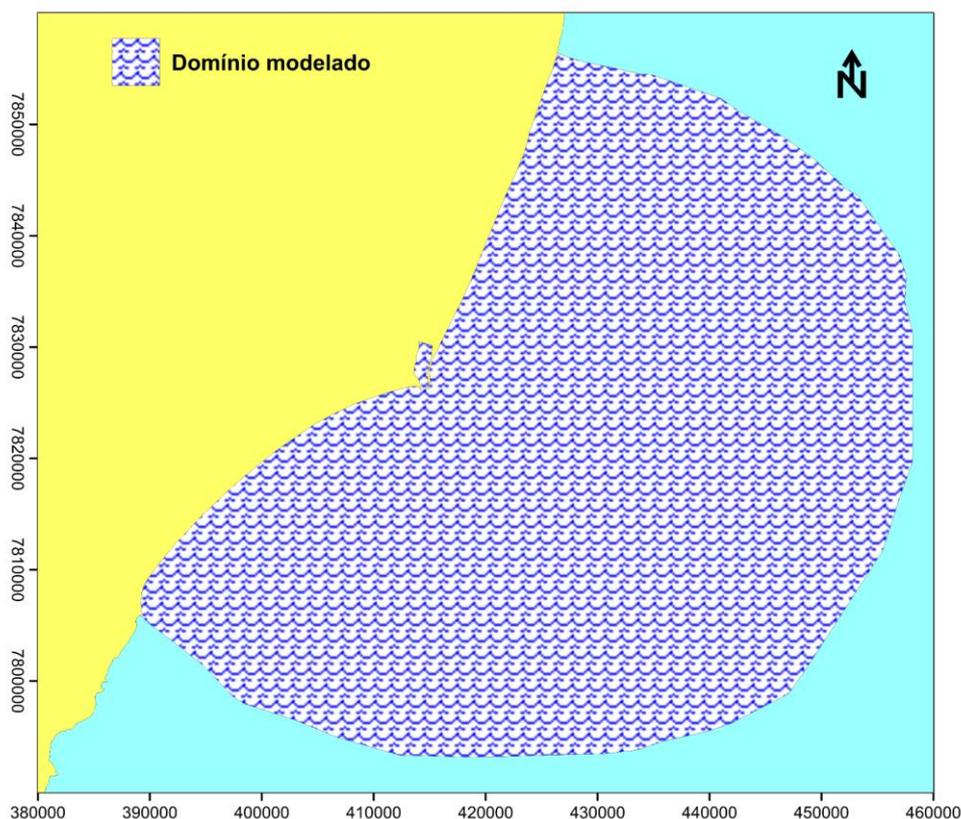


Figura 4.2- Representação do domínio modelado.

### 4.3.2 CONSTRUÇÃO DA MALHA

Uma vez definido o domínio da modelagem e os dados de contorno, desenvolveu-se uma malha de elementos finitos quadrangulares com diferentes densidades de pontos de cálculo. Na plataforma continental, os elementos quadrangulares possuem área de aproximadamente 4 km<sup>2</sup>, enquanto no estuário possuem área aproximada de 0,16 Km<sup>2</sup>. A malha foi então importada para o modelo SisBaHiA, obtendo-se uma malha representativa de todo o domínio de interesse (Figura 4.3), com 1081 elementos e 4479 nós, sendo 4171 nós internos, 207 nós de fronteira de terra e 103 nós de fronteira aberta.

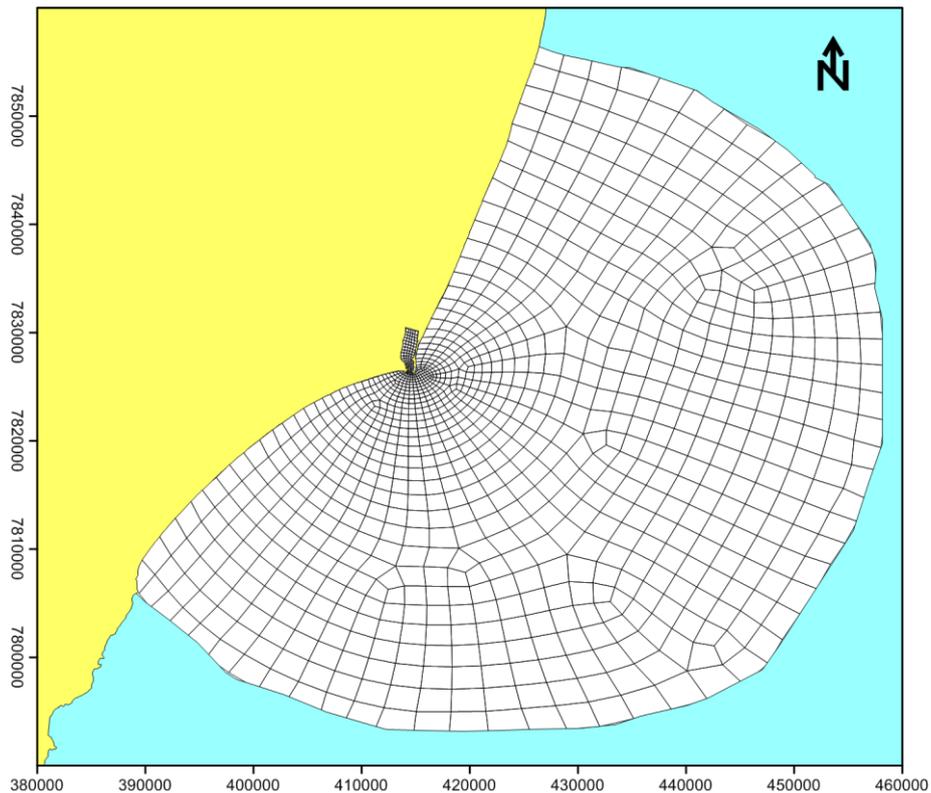


Figura 4.3- Representação da malha de elementos quadrangulares do domínio modelado.

#### 4.4 DEFINIÇÃO DE CONDIÇÕES DE CONTORNO

As equações de águas rasas, que formam o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA, necessitam do estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade e elevação da superfície livre da água.

O modelo SisBaHiA admite condições de contorno abertas e fechadas. A imposição da elevação da superfície livre, ou níveis de água é geralmente o principal forçante prescrito ao longo dos contornos abertos. Os contornos fechados representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem.

Além dos contornos aberto e fechado são também consideradas as condições de contorno de superfície e fundo. A condição de contorno no fundo é a imposição de velocidade nula e escolha da rugosidade pertinente à composição do leito. Já no limite superior da coluna da água, a condição é a atuação da tensão cisalhante do vento.

Não foram consideradas áreas alagáveis referentes a planícies de maré e manguezais,

devido à inexistência manguezais e a reduzida área alegável do estuário do Rio Doce.

A condição de contorno de terra foi considerada impermeável, portanto com fluxo normal nulo. A velocidade e direção foram impostas nos nós que compõem a seção do rio para simular a vazão afluyente no domínio. A Figura 4.4 ilustra os dois tipos de contorno para o domínio do modelo e mostra onde a condição de vazão do rio é imposta no contorno fechado. Na Tabela 4.2 são apresentadas, resumidamente, as condições de contorno adotadas nas simulações do presente trabalho. Ressalta-se ainda, que foi considerada no domínio do modelo a atuação da força de Coriolis.

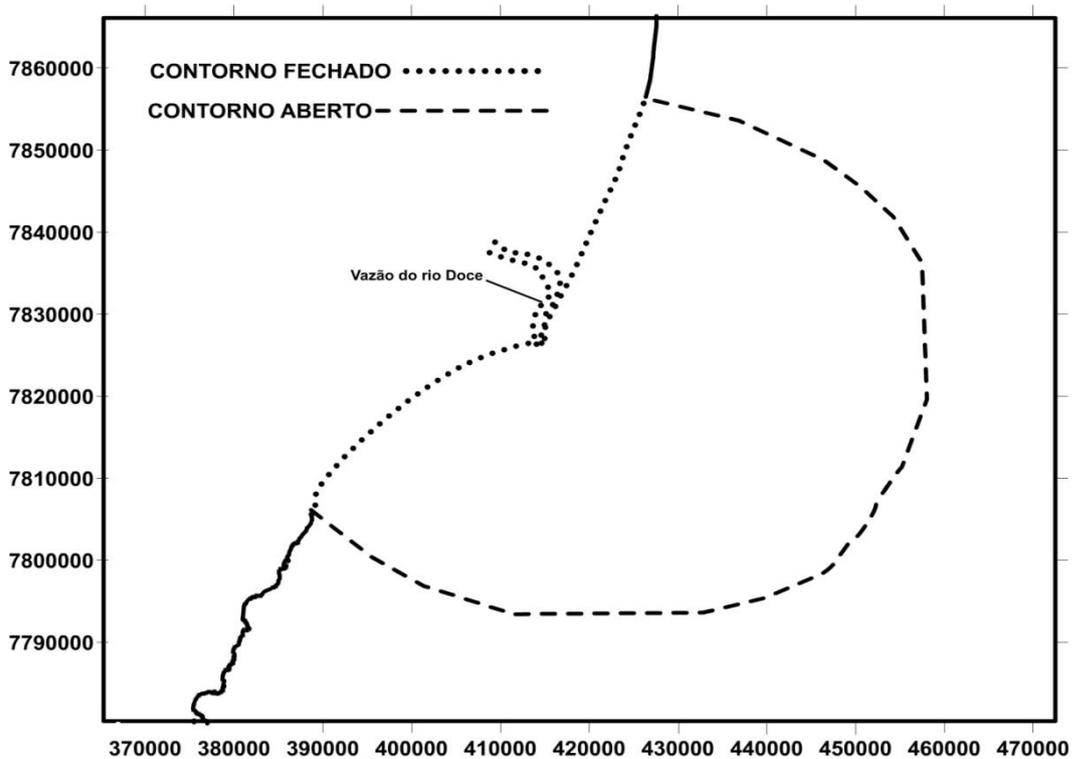


Figura 4.4 - Contorno fechado com localização da imposição da vazão do rio, e contorno aberto representados no domínio do modelo

Tabela 4.2 - Resumo das condições de contorno consideradas nas simulações.

Contorno	Característica	Condições
Superfície	Cisalhamento eólico	Variável temporalmente e uniforme espacialmente
Fundo	Rugosidade	Constante temporalmente e uniforme espacialmente
	Batimetria	Constante temporalmente
Fronteiras	Aberta	Variação da superfície livre através de constantes harmônicas
	Fechada	Contorno de Terra impermeável e vazão afluente do rio constante

#### 4.4.1 BATIMETRIA

Os dados batimétricos da área de estudo foram obtidos a partir de cartas náuticas e levantamento batimétrico na região.

Foram obtidas cartas náuticas digitais da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (<http://www.mar.mil.br/dhn.htm>). As cartas foram georreferenciadas e tiveram os dados batimétricos e suas respectivas coordenadas geográficas digitalizados para uma tabela de dados batimétricos.

As seguintes cartas foram digitalizadas:

- Carta Náutica °140201, denominada “DO PONTAL DE REGÊNCIA À PONTA DO UBU” , com levantamentos efetuados em 1976.
- Carta Náutica nº 2280001, denominada ”DE CONCEIÇÃO DA BARRA A VITÓRIA”, com levantamentos efetuados em 1976.

A campanha para levantamento de dados batimétricos foi realizada no dia 19 de fevereiro de 2010. O levantamento batimétrico realizado foi feito em parte do estuário do Rio Doce e em parte do oceano adjacente a foz do Rio Doce, uma vez que as cartas náuticas da DHN não possuíam dados batimétricos detalhados nessas regiões.

Todos os dados batimétricos foram então referenciados ao nível médio do mar ( $Z_0$ ). Os dados batimétricos foram interpolados, pelo método Kriging, gerando um grid de informações tridimensionais (dados X,Y,Z). Estas informações foram então inseridas no modelo SisBaHiA. A Figura 4.5 representa o mapa batimétrico resultante.

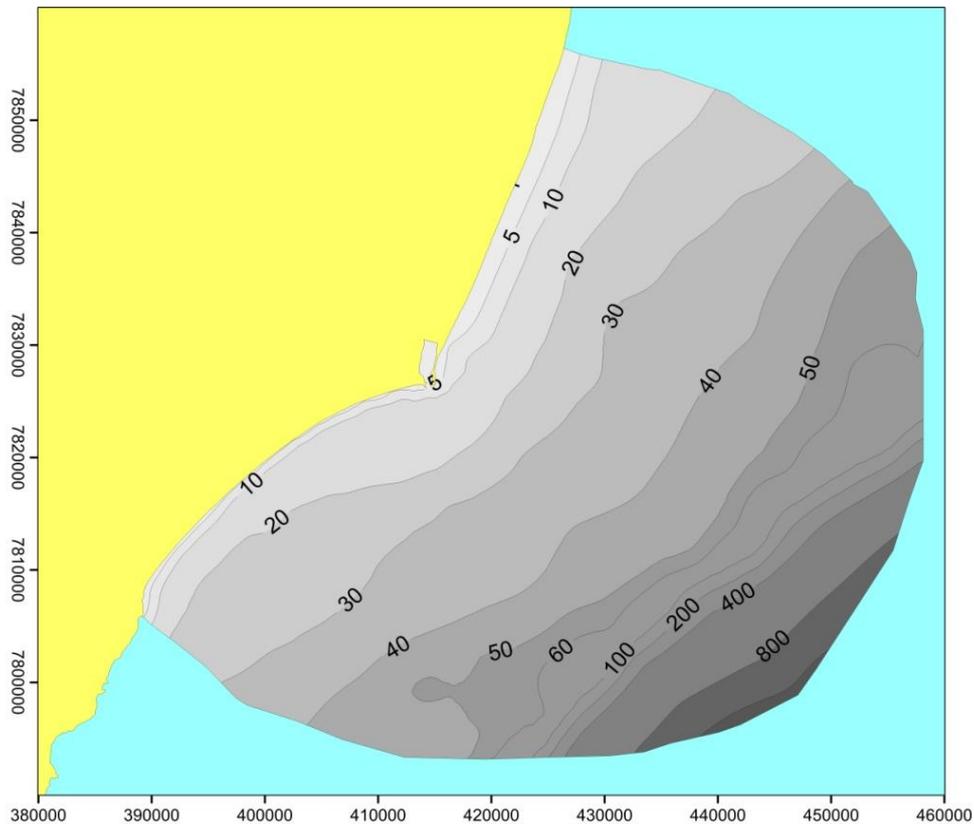


Figura 4.5- Mapa batimétrico gerado pela interpolação de dados de cartas náuticas e campanha de levantamento batimétrico.

#### 4.4.2 RUGOSIDADE

A amplitude da rugosidade equivalente do fundo ( $\epsilon$ ), ou simplesmente rugosidade, tem a função de reproduzir as perdas de energia no escoamento de corpos hídricos devido à influência do atrito entre camada d'água e substrato, podendo ser especificada no modelo de forma uniforme em todo o domínio, ou informada nó a nó.

A amplitude da rugosidade equivalente do fundo ( $\epsilon$ ) varia com o material componente do leito. Rosman (2009) propõe valores iniciais de rugosidade iguais a 0,0300m, entretanto este parâmetro pode variar não só devido ao tipo de material do fundo, mas

também por ser muitas vezes utilizado na calibração do modelo.

De acordo com Albino (1999), Prata (2007) e Coelho (2007), a planície deltaica do Rio Doce possui um volumoso aporte sedimentar com praias extensas compostas por areias litoclásticas grossas e médias provenientes dos rios Doce, São Mateus e Itaúnas. Considerou-se, portanto, que o domínio do modelo possui leito com transporte sedimentar, cuja rugosidade recomendada varia entre 0,0070m e 0,0500m.

#### **4.4.3 DADOS MAREGRÁFICOS**

As variações do nível d'água devido à maré, atuantes como uma forçante física do modelo, foram consideradas na fronteira aberta do mesmo a partir de constantes harmônicas.

As constantes harmônicas para a área de estudo foram obtidas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras -folha 159- disponível no sítio eletrônico da Fundação de Estudos do Mar –FEMAR- ([www.fundacaofemar.org.br](http://www.fundacaofemar.org.br)).

Além das marés obtidas através das constantes harmônicas foram utilizados dados maregráficos medidos *in situ*, para calibração do modelo hidrodinâmico. A maré foi medida em um ponto dentro do estuário em estudo (Figura 4.7), na posição aproximada de 413707 E e 7828415 N, onde foram realizadas três medições entre fevereiro de 2010 e março de 2010.

As condições impostas no contorno aberto foram as elevações da superfície livre da água de acordo as constantes harmônicas para a Barra do Rio Doce. A Tabela 4.3 apresenta as constantes utilizadas.

Tabela 4.3 - Constantes harmônicas da Barra do Rio Doce impostas no contorno aberto.

Componente	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (graus)
Mm	2380713,1375	0,094	76
MSf	1275721,3880	0,04	76
Q1	96726,0840	0,018	72
O1	92949,6300	0,085	95
M1	89399,6936	0,001	358
P1	86637,2046	0,015	143
K1	86164,0908	0,045	143
J1	83154,5164	0,007	306
OO1	80301,8671	0,01	69
2N2	46459,3481	0,005	42
mu2	46338,3275	0,009	88
N2	45570,0537	0,039	68
nu2	45453,6159	0,008	68
M2	44714,1644	0,391	94
L2	43889,8327	0,035	248
T2	43259,2171	0,011	103
S2	43200,0000	0,189	103
K2	43082,0452	0,051	103
MO3	30190,6907	0,003	30
M3	29809,4429	0,005	125
MK3	29437,7039	0,002	280
MN4	22569,0261	0,003	67
M4	22357,0822	0,019	106
SN4	22176,6940	0,006	197
MS4	21972,0214	0,015	117

#### 4.4.4 DADOS DE VAZÃO DO RIO DOCE

Os dados de vazão do Rio Doce foram aplicados na representação da vazão afluente do rio no domínio modelado. Duas fontes de dados de vazões do Rio Doce foram adotadas: dados obtidos no sítio eletrônico da ANA ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)) para estação de Colatina e dados da PETROBRAS (PETROBRAS, 2010).

Os dados de vazão da primeira fonte foram utilizados durante a simulação dos cenários, enquanto os da segunda fonte foram utilizados no processo de calibração do modelo.

Mesmo havendo uma distância de aproximadamente 107 km, entre a foz do rio e a estação fluviométrica de Colatina, a magnitude da escala modelada e a escassez de dados justificaram a utilização dos dados da estação de Colatina. A Tabela 4.4 apresenta os dados das vazões do Rio Doce da estação de Colatina e das campanhas feitas na foz do rio.

Sete campanhas de levantamento correntométricos, com medição conjunta da vazão do Rio Doce, foram realizadas pela PETROBRAS. Entretanto foram escolhidas duas campanhas para terem seus dados utilizados durante o processo de calibração do modelo: campanha referente a 29/5/2008 e campanha referente a 18/3/2009. Esta escolha deveu-se ao fato destas campanhas apresentarem os maiores períodos de registro de dados e, conseqüentemente, maior quantidade de dados, tornando melhor o processo de calibração.

Tabela 4.4 - Vazões do Rio Doce na estação de Colatina e em sua foz.

<b>Data</b>	<b>Foz do Rio Doce (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Estação de Colatina (m<sup>3</sup>/s)</b>
*29/5/2008	386	306
10/7/2008	309	230
9/9/2008	246	185
6/11/2008	189	264
4/1/2009	3264	3074
*18/3/2009	904	746
28/7/2009	332	368
<i>*campanhas utilizadas na calibração do modelo</i>		

#### 4.4.5 DADOS DE VENTO

Os dados de ventos utilizados na modelagem da circulação hidrodinâmica foram selecionados a partir da série de dados do projeto *Reanalysis*, que consiste em um modelo de previsão de direção e intensidade de ventos, obtidos no sítio eletrônico da *National Centers for Environmental Predictions -NCEP-* pertencente ao *National*

*Oceanic & Atmospheric Administration* -NOAA- ([www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis)). A resolução dos dados escolhidos é de 25 km (posição 435225,24E e 7862175,72N) com valores referentes à altitude de 10m e a periodicidade de 6 horas. Esta fonte de dados de vento foi utilizada com sucesso por Marques (2009) para a modelagem numérica da pluma do estuário da Lagoa do Patos, e por Siminato (2006) para a modelagem da pluma do Rio da Prata.

Após a escolha do período (entre os anos de 2000 e 2010), os dados foram processados e inseridos no modelo, de acordo com o período desejado, como forçante variável no tempo e uniformes no espaço. Sendo, estes dados, também adotados para verificação do vento predominante durante os registros das imagens de satélite.

#### **4.5 GEOMORFOLOGIA**

Considerando a classificação proposta por Galloway (1975 apud DAVIS JR & FITZGERALD, 2004), quanto à forçante dominante sobre a geomorfologia de estuários, observa-se que a desembocadura do Rio Doce e sua região costeira adjacente indicam a dominância das ondas sobre a morfologia local. Entretanto, ao analisarmos as barras sedimentares da foz, nota-se que a seção transversal do rio, ao desaguar no oceano, está voltada para o sul, com o comprimento da barra arenosa norte muito superior a barra sul. Este fato evidencia que o transporte predominante de sedimento ao longo da costa ocorre no sentido norte-sul.

De acordo com Campos (2011), na região em estudo observa-se uma correlação entre os ventos e correntes superficiais, onde as correntes das áreas mais rasas se orientam na direção aproximada do vento, principalmente quando provenientes do quadrante S-SE. Na maioria das situações de vento do quadrante N-NE também há correlação entre direção dos ventos e correntes, entretanto, em algumas situações as correntes não acompanham a direção do vento.

Na Figura 4.6 são apresentados os dados de ventos, utilizados no presente trabalho, onde se observa a ocorrência predominante de vento NE, corroborando com as observações de Bandeira *et al.*(1975 apud ALBINO, 1999). A análise estatística destes dados apresentou média igual 5,76 m/s. A confrontação dos dados geomorfológicos com

as observações feitas por Campos (2011) indicam que a geomorfologia da costa é possivelmente sobrepajada não só pela ação das ondas como também pela ação dos ventos.

No que tange ao estudo da pluma do Rio Doce as considerações expostas na presente seção são de extrema relevância, pois apontam a importância do vento na hidrodinâmica da região em estudo e a tendência natural da pluma do Rio Doce a se propagar para o sul e sudeste, uma vez que a seção do rio pode orientar seu fluxo para estas direções.

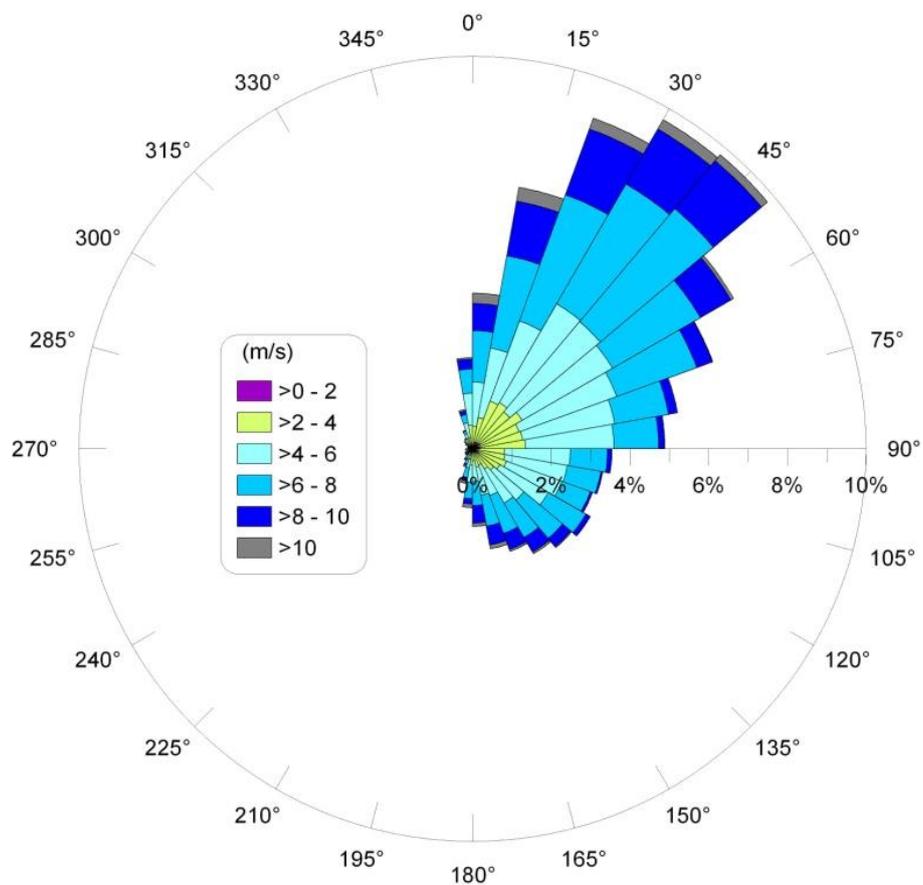


Figura 4.6- Rosa dos ventos referentes aos dados do período entre 2000 e 2010 para região da foz do Rio Doce.

## 4.6 CONDIÇÕES INICIAIS

As condições iniciais utilizadas no modelo numérico foram do tipo partida a “frio”, onde o modelo inicia a simulação considerando o campo de componentes do vetor de velocidade 2DH,  $U$  e  $V$ , nulo em todos os pontos da malha, e considerando o campo de elevação da superfície livre ( $\zeta$ ) em qualquer ponto do ciclo de maré (ROSMAN, 2009).

As simulações realizadas no presente estudo foram iniciadas a partir dos estágios de preamar. Sendo esta elevação inicial uniforme em todo o domínio do modelo.

## 4.7 CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração pode ser definido como a etapa em que parâmetros do modelo são ajustados com o intuito de reproduzir os dados medidos *in situ*, sendo um processo iterativo de comparação entre os valores medidos em campo e os valores gerados na modelagem. Esse processo depende fortemente da disponibilidade de dados de campo confiáveis e da experiência do modelador, pois geralmente os ajustes são feitos nos fatores incertos conhecidos, como o coeficiente de rugosidade de fundo (ROSMAN, 2009).

Foram executadas simulações utilizando-se como variáveis de estado: a vazão do Rio Doce, as marés geradas pelas constantes harmônicas e intensidade e direções dos ventos.

A calibração do modelo baseou-se na comparação dos valores calculados através das simulações com os dados de elevação da superfície livre (maré) e os dados de direção e intensidade das correntes medidos *in situ*. Para tanto foram criadas duas estações de monitoramento dentro do domínio modelado, denominadas “estação maregráfica” e “estação ADCP”, com posições equivalentes aos pontos de medição *in situ*.

Os dados de magnitude e direção das correntes foram obtidos de estudos realizados pela PETROBRAS (PETROBRAS, 2010). Estes foram registrados a cada 3 horas e medidos

em sete campanhas de medição durante os anos 2008 e 2009. As medições foram feitas com uso de um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) instalado na posição aproximada de 427488 E e 7838531 N, em profundidade aproximada de 20m, com relação ao nível médio do mar (PETROBRAS, 2010). A Figura 4.7 apresenta a localização dos pontos de medição do marégrafo e do ADCP.

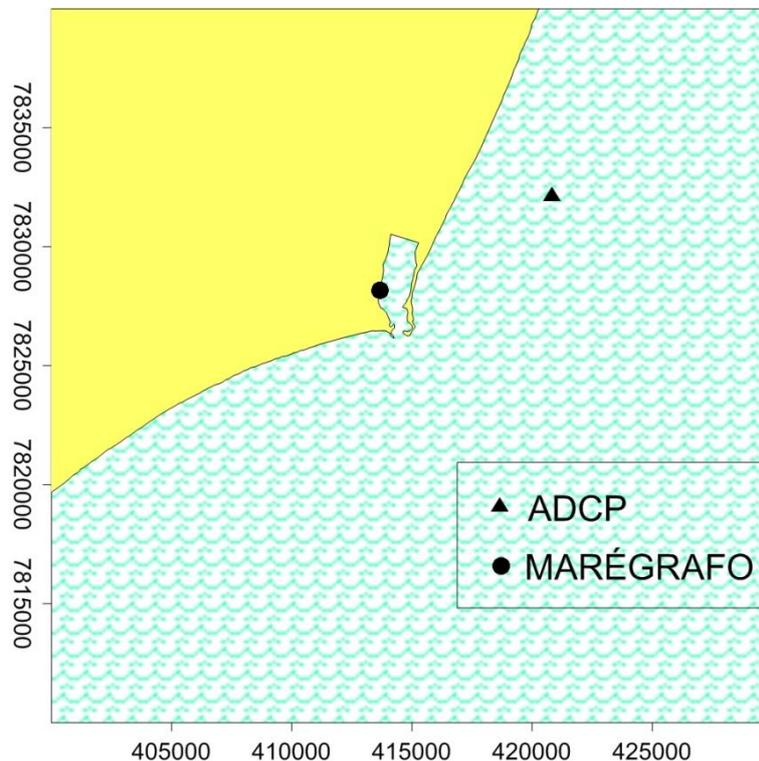


Figura 4.7- Localização do ponto de medição maregráfica e do ADCP.

A avaliação das marés simuladas, para a Estação maregráfica, utilizou dados de uma campanha devido à maior disponibilidade de dados desta, medidos entre 19 e 24 de março de 2010. Já a avaliação dos resultados de magnitude e direção das correntes, para a Estação ADCP, utilizou dados de duas campanhas, medidos entre 29 de maio a 5 de junho de 2008, para primeira campanha, e entre 9 a 16 de março de 2009, para a segunda. Durante a calibração foram adotados os valores de correntometria referentes a 60% da coluna de água, para a seleção dos dados provenientes das medições com ADCP. A utilização de dados com diferentes datas para diferentes parâmetros físicos justificou-se pela escassez de dados medidos, em concomitância, para região estudada.

Para avaliação da resposta do modelo e seu grau de confiabilidade considerou-se os

métodos propostos por Cawley & Harnett (1992) e Odd & Murphy (1992). Os primeiros sugerem que a precisão de um modelo hidrodinâmico é medida comparando-se os dados coletados e os simulados tanto para elevação, quanto para velocidade, através do erro médio de estimação  $E$ , dado pela equação 7, sendo considerados aceitáveis os seguintes valores: para o módulo da velocidade o erro médio de estimação deve ser menor que 20% e para marés, em torno de 5%.

$$E = \left[ \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N \varepsilon_i \right] \times 100 \quad (7)$$

onde:  $\varepsilon_i \rightarrow$  diferença entre o dado medido e o simulado

$N \rightarrow$  número de observações.

De acordo Odd & Murphy (1992) muitos modelos não obtêm sucesso, pois não foram escolhidos adequadamente, ou então, foram calibrados com dados inadequados e metodologias impróprias. Estes autores sugerem que no mínimo 80% das diferenças entre a direção medida e a simulada estejam dentro da faixa de  $\pm 20^\circ$ , para a correta calibração de modelos hidrodinâmicos computacionais.

Durante o processo de calibração foram ajustados os seguintes fatores: passo de tempo e coeficiente de rugosidade de fundo. Após atingida uma aproximação aceitável entre os dados simulados e medidos, o modelo hidrodinâmico foi considerado aplicável às simulações dos cenários, para assim alcançar os objetivos do presente trabalho.

#### 4.8 CENÁRIOS PARA O ESTUDO DAS FORÇANTES

Com o propósito de analisar as forças atuantes na circulação hidrodinâmica da região em estudo foram configurados dois cenários para simulação, apresentados a seguir:

**Cenário 1** - simulação hidrodinâmica desconsiderando o vento e considerando a maré.

**Cenário 2** - simulação hidrodinâmica considerando o vento e maré.

Nas simulações, *cenários 1 e 2*, foi considerada a maré entre os dias 10/03/2009 e

25/03/2009, simulada pelo modelo computacional. Os dados de vento, referentes à mesma data, foram implementados apenas no *cenário 2*. A vazão do Rio Doce foi mantida constante, com valor igual a sua média (918m<sup>3</sup>/s), proposta por Coelho (2007).

#### **4.9 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO DA PLUMA E USO DAS IMAGENS DE SATÉLITE**

A construção dos cenários baseou-se na análise de imagens de satélite e das condições ambientais típicas (vazão, maré e vento predominante) do período de obtenção destas informações.

Através da análise das imagens dos satélites LANDSAT5, CBERS 2 e CBERS 2B foram escolhidas imagens da foz do Rio Doce em que a pluma deste era visível, ou imagens em que fenômenos hidrodinâmicos, como vórtices próximos a foz, eram visíveis, devido a existência de material em suspensão. Após esta etapa foi executado o modelo hidrodinâmico com as condições ambientais relativas a data da imagem.

Uma vez executado o modelo hidrodinâmico este foi acoplado ao modelo Lagrangeano onde a pluma do Rio Doce foi simulada através da inserção de uma fonte de lançamentos de partículas com região fonte retangular, na seção do rio.

Ressalta-se que o presente trabalho não pretendeu simular nenhum tipo específico de substância, sendo o lançamento de partículas apenas uma forma de “marcar” a água proveniente da vazão do rio. Foi adotado o módulo advectivo e difusivo e não foram adotadas taxas de decaimento para as partículas.

A pluma gerada pelo modelo Lagrangeano foi então comparada à imagem de satélite. Destaca-se que, apesar das limitações devido à disponibilidade de dados do banco de imagens utilizado, as imagens escolhidas procuraram representar as condições típicas de vazão e vento para região modelada. Na Figura 4.8 são apresentadas as etapas da metodologia empregada.



Figura 4.8- Processo de definição de cenários e obtenção de resultados para comparação com imagem de satélite.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CALIBRAÇÃO

Através da comparação entre os resultados simulados e medidos *in situ* avaliou-se a precisão do modelo na reprodução de dados de elevação e corrente através de análise quantitativa e qualitativa. Para o último utilizou-se a análise gráfica, e para o primeiro utilizou-se os critérios de avaliação de marés e magnitude de correntes propostos por Cawley & Hartnett (1992), e no caso da direção de corrente os critérios estabelecido por Odd & Murphy (1992), como previamente descrito no item 4.12.

Na Tabela 5.1 são apresentados valores referentes aos erros médios obtidos para elevação e magnitude de corrente, e os percentuais obtidos para direção de corrente.

Tabela 5.1- Resultados do critério de comparação entre os erros médios obtidos, para maré e correntes (magnitude), segundo Cawley & Hartnett (1992) e critério de avaliação da direção de corrente, segundo Odd & Murphy (1992).

Estação Maregráfica	Campanha 19/03/2010		
	Erros médios de elevação(maré)	7,60%	Erro satisfatório $\leq 5\%$
Estação ADCP	Campanha 29/5/2008	Campanha 9/3/2009	Erro satisfatório $\leq 20\%$
	Erros médios de corrente (magnitude)	51,40%	
Direção da corrente*	60,34%	64,44%	Percentual satisfatório $\geq 80\%$

\*Percentuais obtidos das diferenças entre direções medidas e simuladas que variaram entre  $\pm 20^\circ$

Cawley & Hartnett (1992) consideraram que para os dados de maré o erro satisfatório podem ter limites superiores a 5%. Portanto, os dados apresentados demonstram que o modelo teve boa reprodução de dados de elevação, mesmo tendo alcançado um valor 2,6% acima do prescrito como satisfatório. Já para o caso dos resultados de magnitude e direção de corrente, estes apresentaram valores bem superiores aos estabelecidos pela

literatura.

O gráfico comparativo dos resultados da maré simulada e medida para a “Estação maregráfica” é apresentado na Figura 5.1.

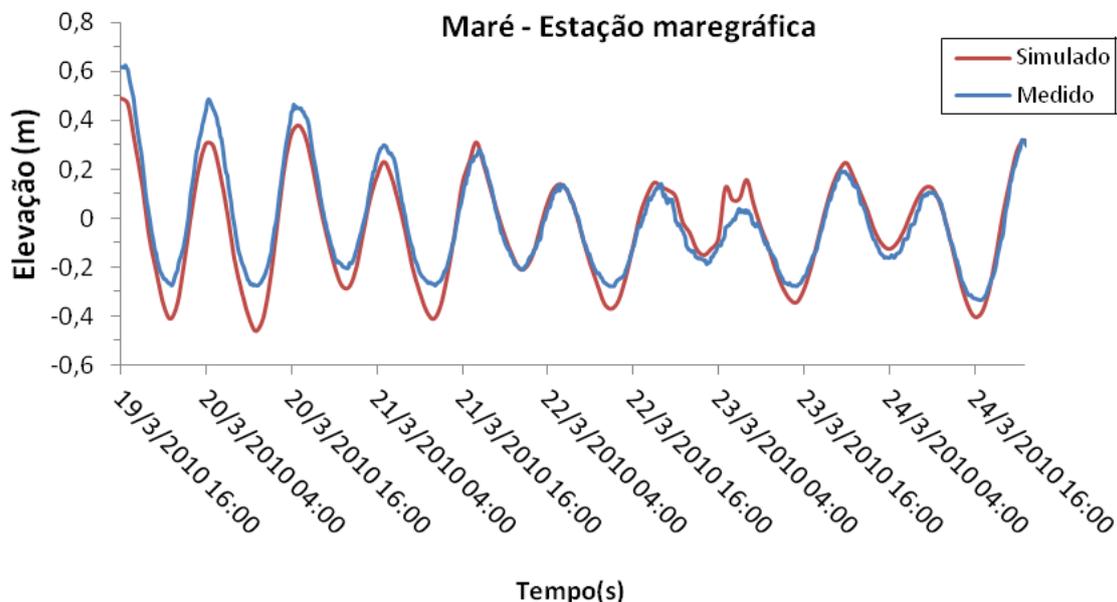


Figura 5.1- Dados maré simulados e medidos *in situ*, para campanha de medição maregráfica de 19/03/2010 a 24/03/2010

Apesar deste parâmetro não ter sido quantificado, a análise gráfica indica que a oscilação da maré apresenta uma boa concordância de fase entre os dados medidos e simulados. Entretanto, observam-se diferenças de valores durante os períodos de maior amplitude de maré. Esta disparidade pode estar relacionada a variações da vazão do Rio, adotada como constante no período das simulações, e/ou imprecisão dos dados batimétricos utilizados.

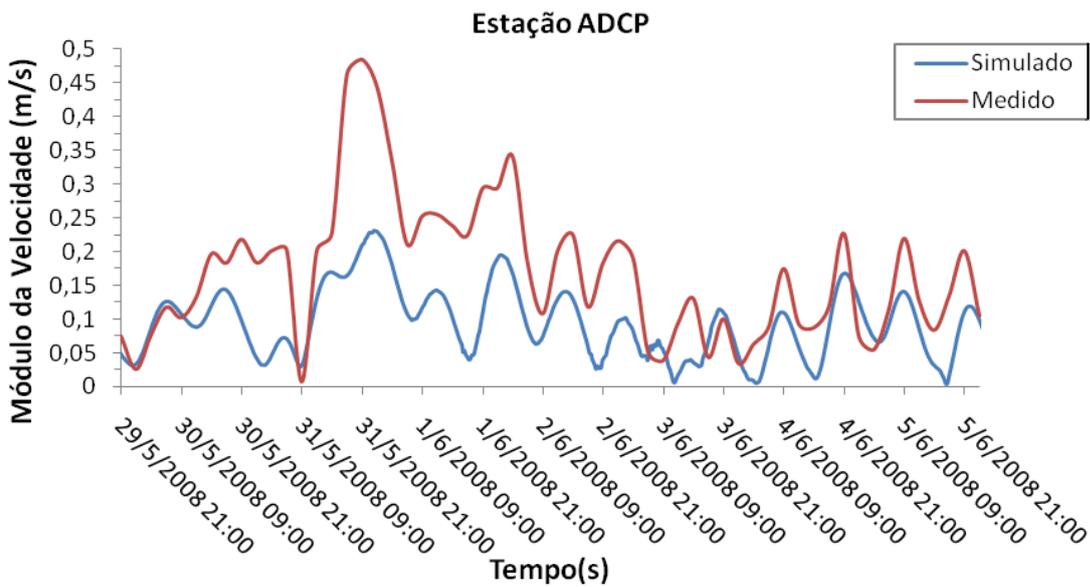
Os resultados de magnitude das correntes simuladas (módulo da velocidade) e os dados medidos para a “Estação ADCP” são apresentados na Figura 5.2, para dois períodos considerados.

Os resultados de direção das correntes simuladas e os dados medidos para a “Estação ADCP” são apresentados na Figura 5.3, para dois períodos considerados. Ressalta-se que os ângulos apresentados nos dados de direção são referenciados ao eixo “x”, ou seja, partindo-se do eixo “x” variam de 0 a 180° no sentido anti-horário e de 0 a -180° no sentido horário.

Os resultados de magnitude das correntes simuladas apresentaram-se, de maneira geral,

inferiores aos dados medidos, corroborando com os resultados da análise quantitativa. Entretanto, a similaridade no formato das linhas do gráfico (Figura 5.2), em ambos os períodos considerados, demonstra que o modelo responde aos processos físicos que regem a circulação hidrodinâmica da região. Esta suposição é corroborada pelos os dados de direção de correntes (Figura 5.3) que também apresentam alguma similaridade entre os dados medidos e simulados, apesar de não terem obtido valores satisfatórios na análise quantitativa.

A)



B)

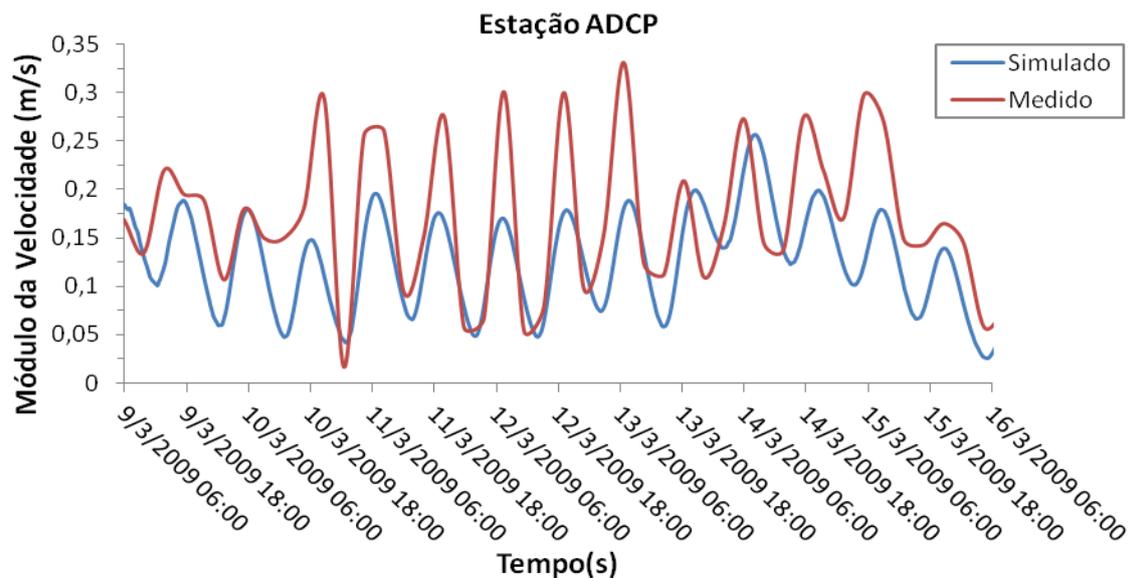
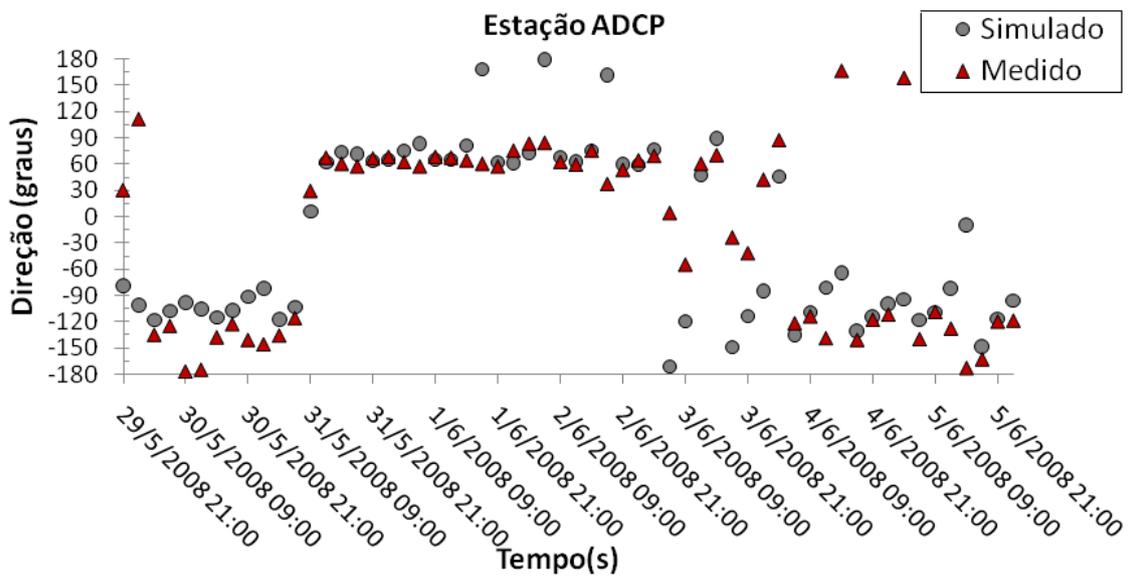


Figura 5.2- Dados do módulo da velocidade simulados e medidos *in situ*, para duas campanhas: A) de 29/05/2008 a 05/06/2008; B) de 09/03/2009 a 16/03/2010.

A)



B)

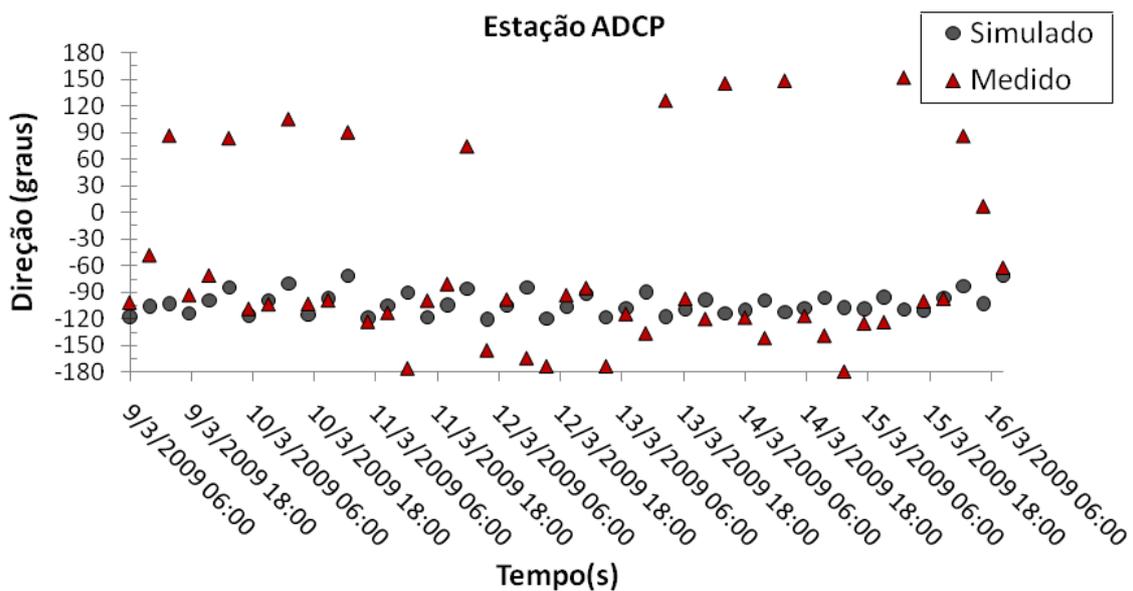


Figura 5.3- Dados de direção das correntes simulados e medidos *in situ*, para duas campanhas:: A) de 29/05/2008 a 05/06/2008; B) de 09/03/2009 a 16/03/2010

As divergências observadas nos gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 possivelmente estão relacionadas à resolução temporal dos dados de vento, a não consideração de atuação de ondas e/ou a imprecisões na batimetria. Outras explicações cabíveis para ocorrência das dissimelhanças observadas podem ser atribuídas à natureza do processo de modelagem,

que adota simplificações nas equações que governam o processo hidrodinâmico, bem como aproximações feitas para as condições de contorno.

Durante o processo de calibração definiram-se os fatores que propiciaram uma melhor resposta do modelo hidrodinâmico, expostos a seguir: valores de coeficiente de rugosidade de fundo iguais 0,004m e passo de tempo igual a 60s .

Considerando os resultados até aqui apresentados, as características dos dados empregados e as simplificações adotadas nas simulações, avaliou-se como qualitativamente satisfatória a resposta do modelo. Portanto, considerou-se plausível a utilização deste para estudos ambientais da região em pauta.

## 5.2 ESTUDO DAS FORÇANTES OCEANOGRÁFICAS

Nas simulações dos *cenários 1 e 2* foram observados os resultados gráficos para o ponto de monitoramento “Estação ADCP” e os resultados espaciais para toda a região modelada. O gráfico mostrado na Figura 5.4 apresenta a série temporal de elevação da superfície livre da água, demonstrando as marés de sizígia e quadratura consideradas em ambos os cenários. Na Figura 5.5 são apresentados os dados de vento, módulo e direção, utilizados na simulação do *cenário 2*.

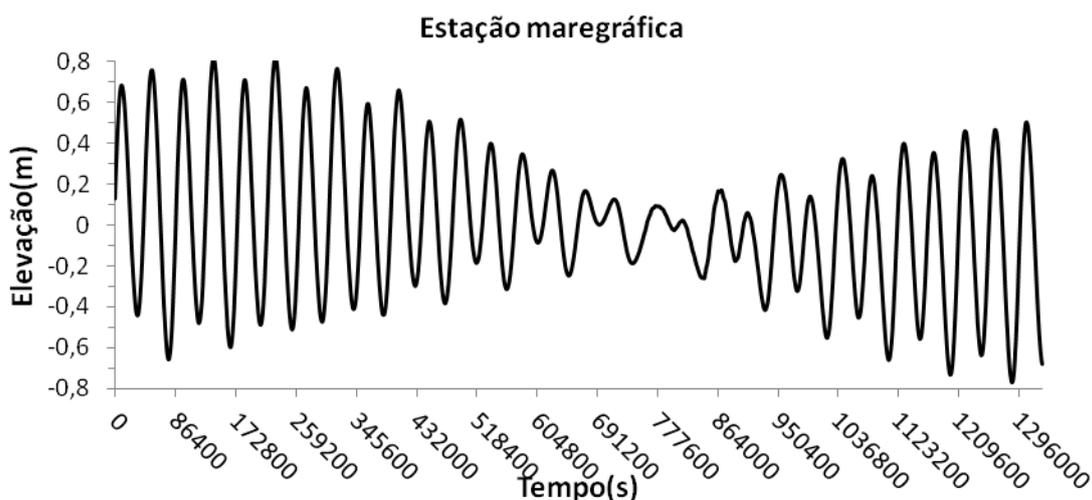
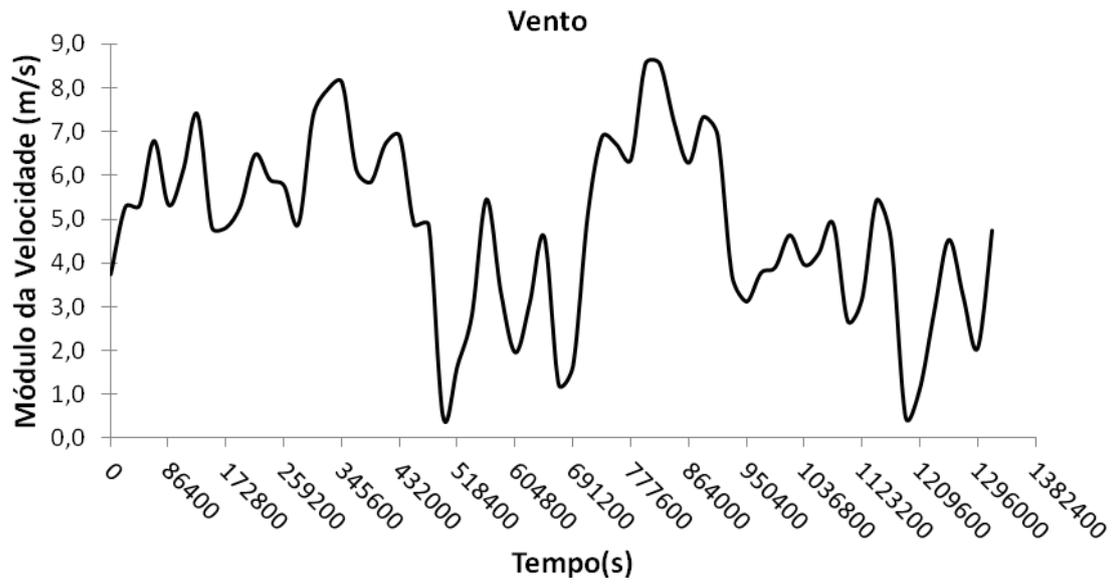


Figura 5.4- Série temporal da variação da elevação da superfície da água simulados nos *cenários 1 e 2*.

A)



B)

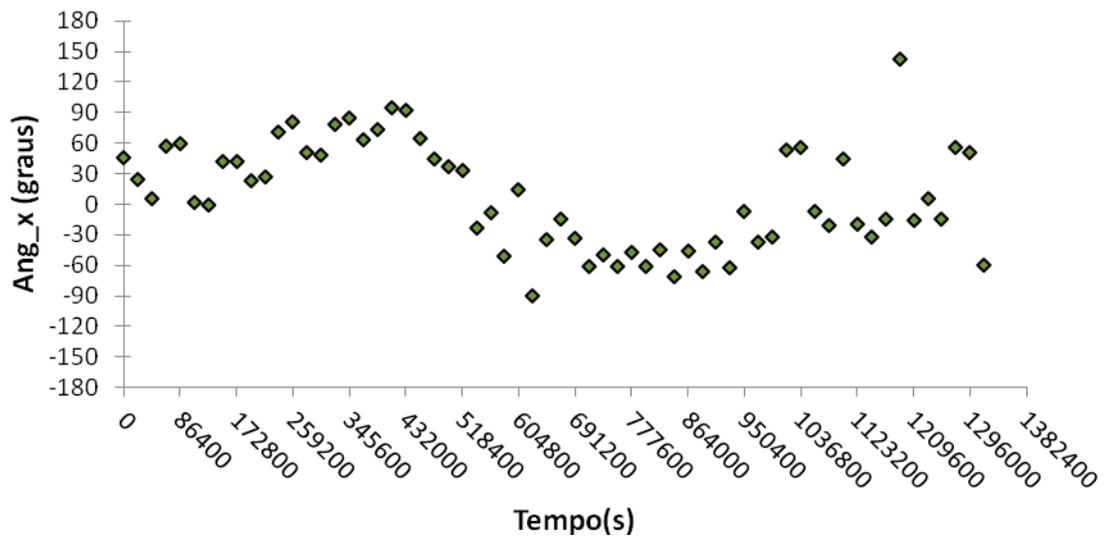


Figura 5.5-Série temporal, com dados a cada seis horas, do módulo da velocidade do vento, gráfico A, e ângulo do vento, gráfico B, utilizados na simulação do cenário 2.

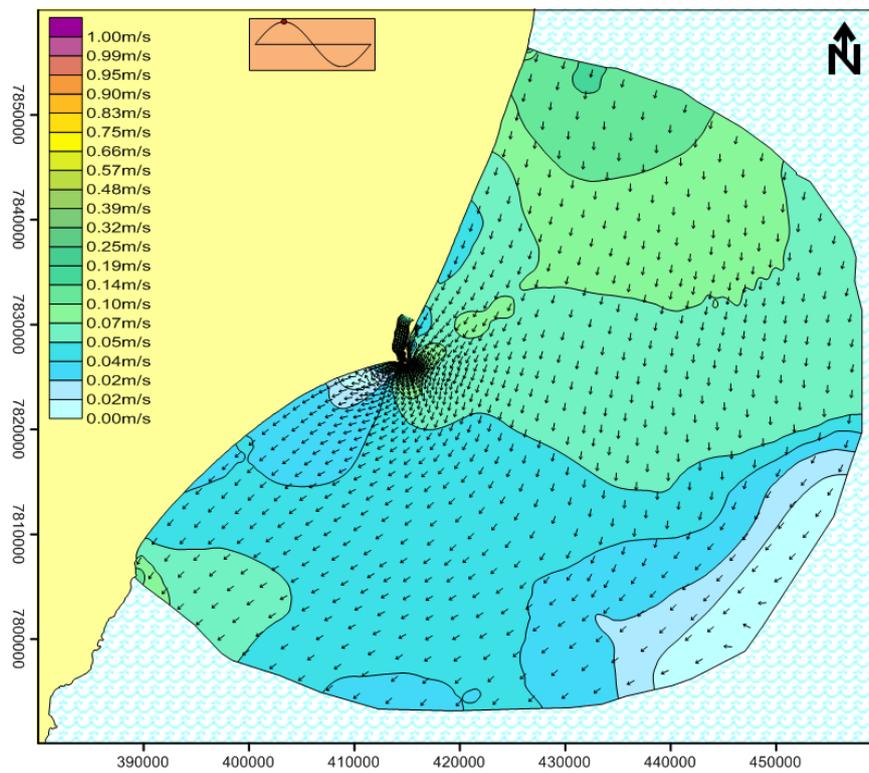
Para ilustrar o padrão espacial de correntes em diferentes situações de maré e comparar os diferentes cenários foram criados mapas com os padrões de correntes (isolinhas do módulo da velocidade e direção) para a região modelada. Na maré de sizígia os valores para a preamar (Figura 5.6) foram obtidos no instante  $t=226800s$  e para a vazante (Figura 5.7) foram obtidos três horas adiante, no instante  $t=237600s$ . Na maré de quadratura os valores para a preamar (Figura 5.8) foram obtidos no instante  $t=777600s$  e para a vazante (Figura 5.9) foram obtidos três horas adiante, no instante  $t=788400s$ .

Nas Figuras dos dois cenários observa-se uma forte influência da vazão do Rio Doce nas adjacências de sua foz, condizendo com as observações de Campos (2011).

Na maré de sizígia os campos de velocidades mostram-se mais intensos que nas marés de quadratura no dois cenários, corroborando com o observado por ASA (2003 apud CAMPOS, 2011). Os valores de velocidade de corrente observados para o *cenário 2* são, de forma geral, superiores aos valores observados no *cenário 1*. Além disso, na comparação entre cenários, para o mesmo instante de tempo, notam-se drásticas mudanças no padrão de escoamento da região.

Observa-se em ambos os cenários que a região norte da área modelada apresenta maiores valores de velocidade de corrente, tanto na preamar e vazante da maré de sizígia quanto na preamar e vazante da maré de quadratura. Esta intensificação possivelmente está associada a batimetria local que apresenta menores valores de profundidade ao norte da região modelada.

A) Cenário 1



B) Cenário 2

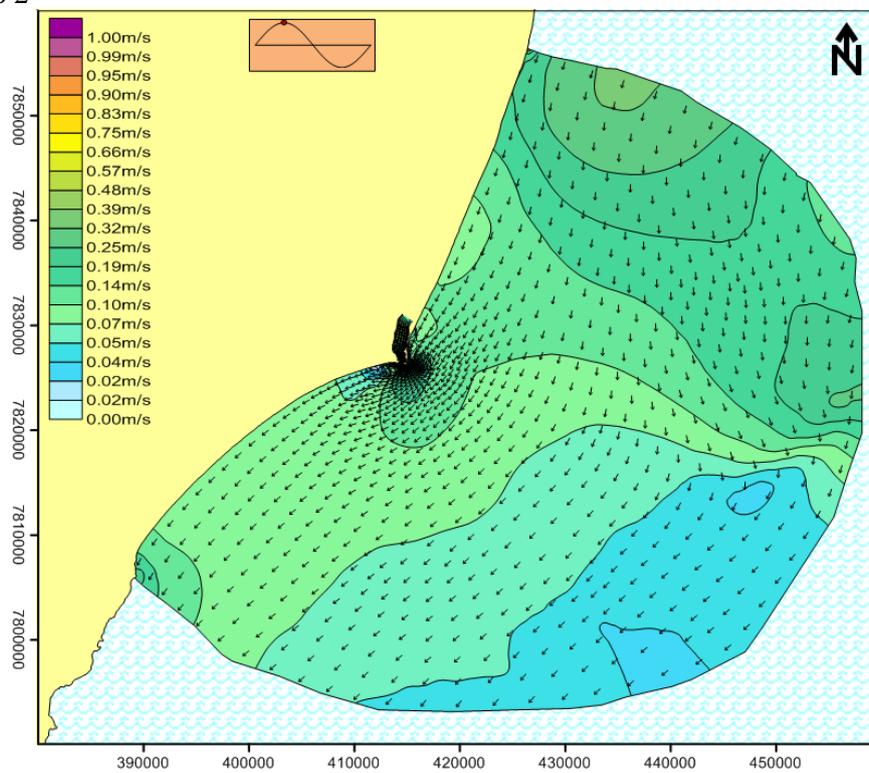
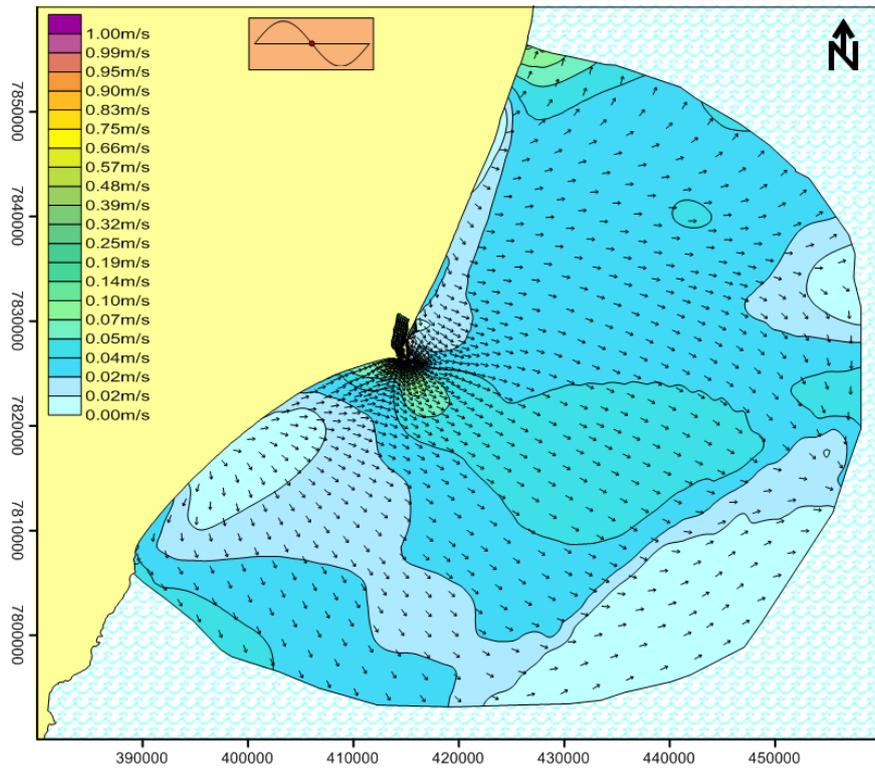


Figura 5.6 –Campo de correntes\* no domínio do modelo em situação de maré de sizígia, na preamar (instante  $t=226800$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A) *Cenário 1* e B) *Cenário 2*. \*vetores em escala fixa.

A) Cenário 1



B) Cenário 2

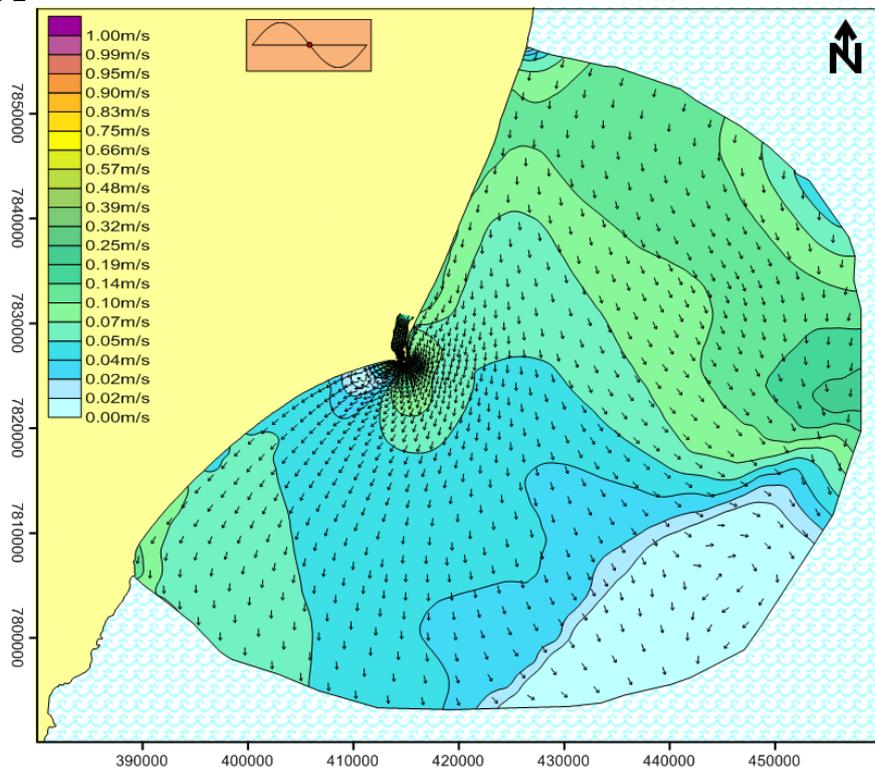
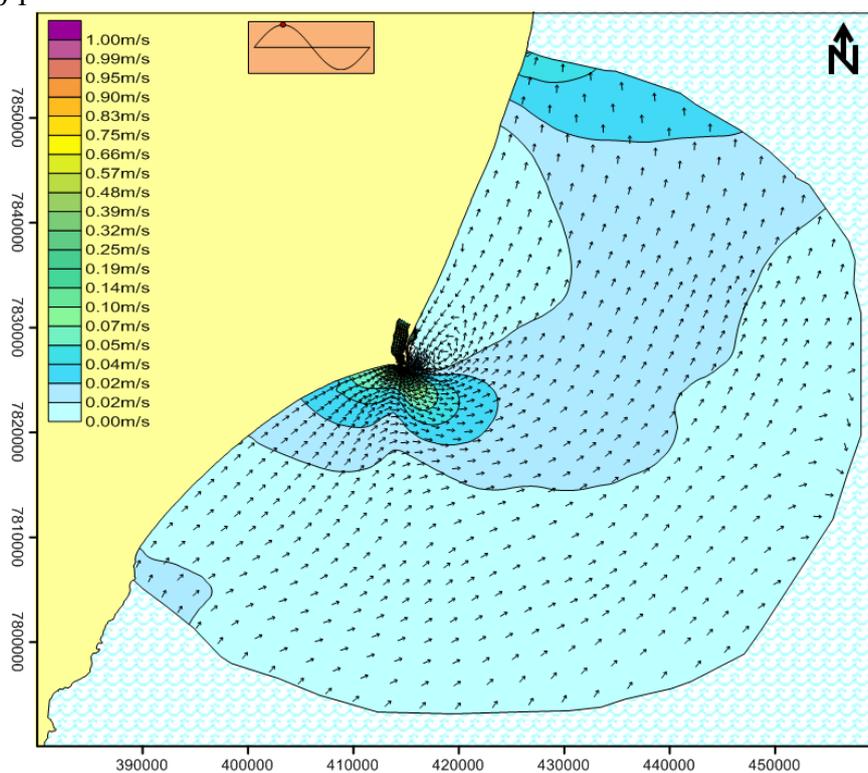


Figura 5.7 – Campo de correntes\* no domínio do modelo em situação de maré de sizígia, na vazante (instante  $t=237600$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A) *Cenário 1* e B) *Cenário 2*. \*vetores em escala fixa.

A) Cenário 1



B) Cenário 2

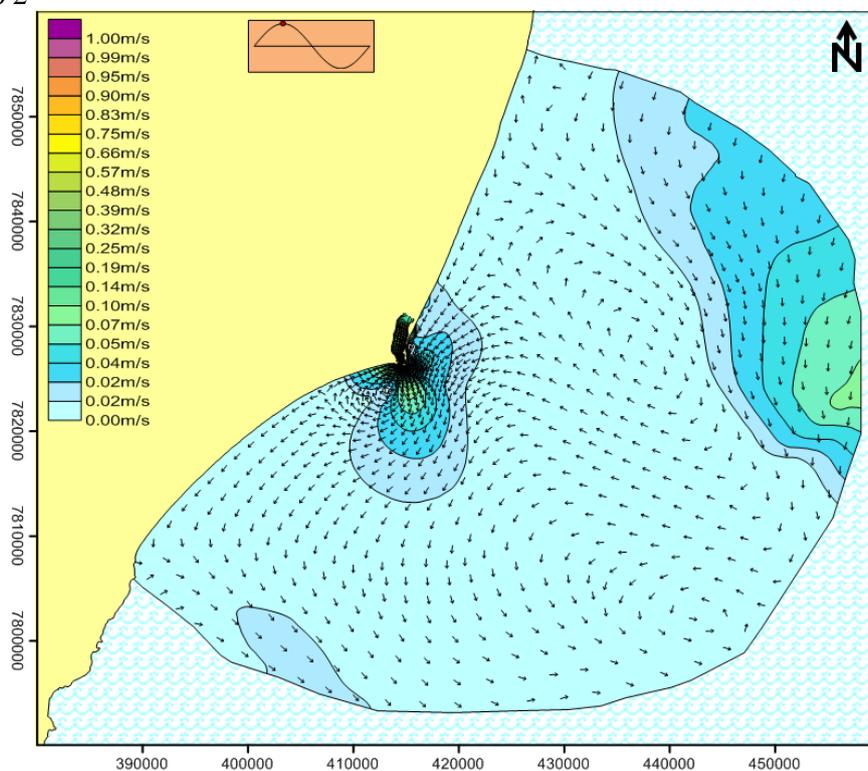
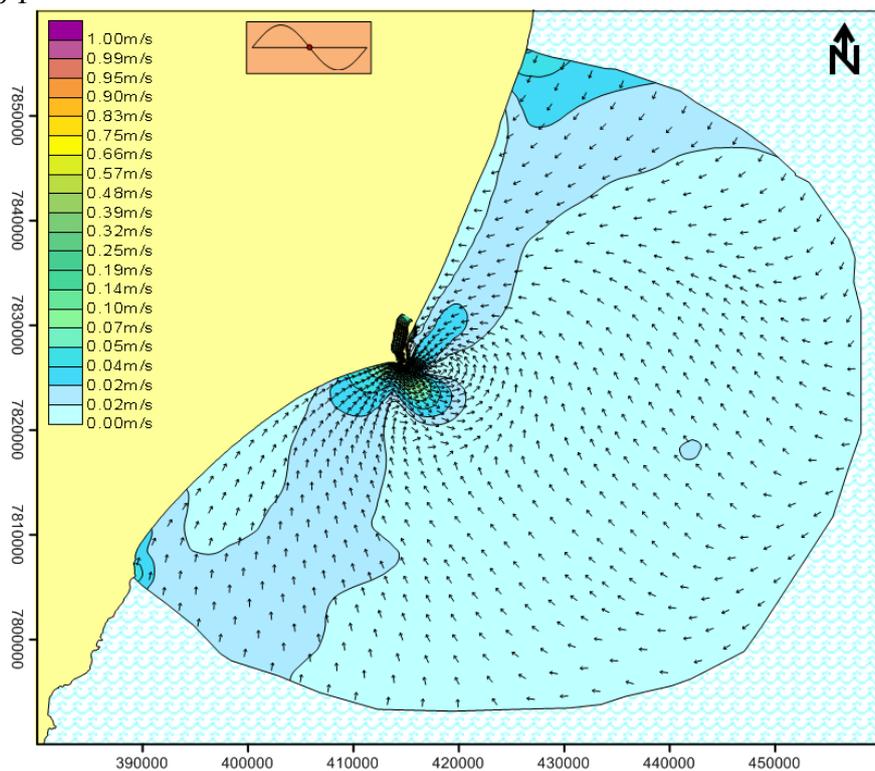


Figura 5.8 – Campo de correntes\* no domínio do modelo em situação de maré de quadratura, na preamar (instante  $t=777600$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A) *Cenário 1* e B) *Cenário 2*. \*vetores em escala fixa.

A) Cenário 1



B) Cenário 2

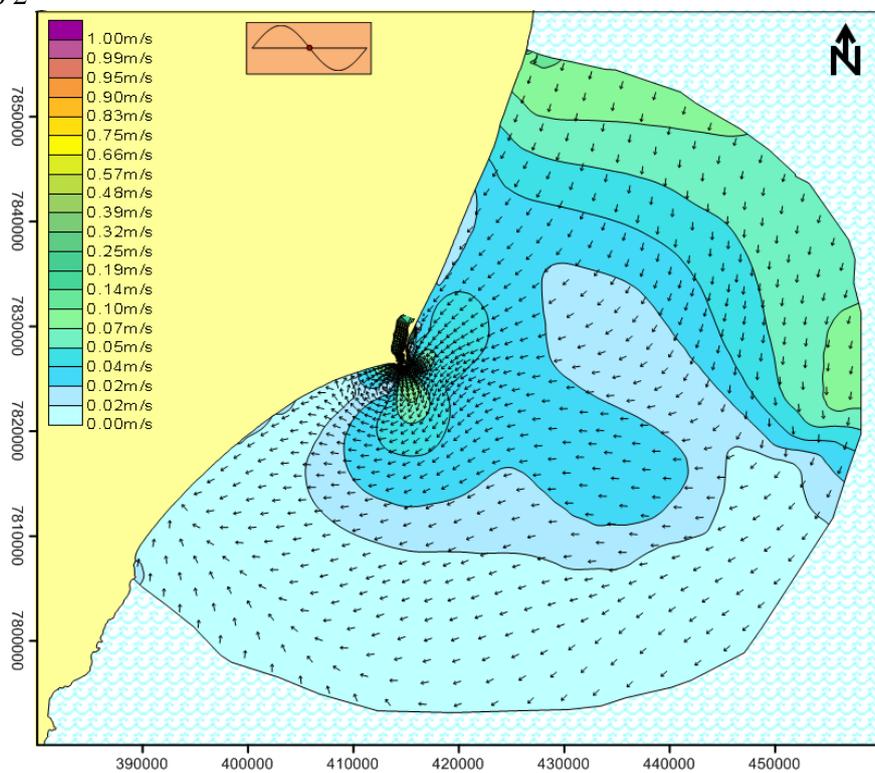


Figura 5.9– Campo de correntes\* no domínio do modelo em situação de maré de quadratura, na vazante (instante  $t=788400$ ), com isolinhas do módulo da velocidade para A) *Cenário 1* e B) *Cenário 2*. \*vetores em escala fixa.

Na Figura 5.10 são apresentados, com maior detalhamento da desembocadura, os resultados expostos nas Figuras 5.6 a 5.9, a fim de se destacar a presença de vórtices observados em ambos os cenários. Nota-se que os vórtices formados no *cenário 2* ocorreram sempre ao sul da foz, enquanto no *cenário 1* ocorreram ao sul ou ao norte da foz.

A presença de vórtices no entorno da foz demonstra que a vazão do rio domina a dinâmica na região próxima a sua descarga, assim como descrito por Yankovsky *et al.* (2001). Entretanto, a ocorrência dos vórtices ao sul da foz, para o *cenário 2*, evidencia a importante atuação do vento na hidrodinâmica local, concordando com os estudos de pluma de outros rios como o de Xing & Davies (1999) e de Liu *et al.* (2008), e o estudo da pluma do Rio Doce feito por Campos (2011).

Na Figura 5.11 são apresentados os valores do módulo da velocidade do vento e módulo da velocidade das correntes para o *cenário 1* e *cenário 2*, monitorados na Estação ADCP. Observa-se que a presença do vento intensifica a velocidade das correntes. Contudo, valores de vento abaixo de 5 m/s (aproximadamente) ou com intensidade inconstantes, levam a intensidade das correntes do *cenário 2* a valores próximos as correntes do *cenário 1*, condizendo com o observado por Campos (2011).

Na Figura 5.12 são apresentados os ângulos do vetor vento e os ângulos dos vetores de velocidade das correntes para o *cenário 1* e *cenário 2*, monitorados na Estação ADCP a cada seis horas, permitindo a análise da direção das correntes e comparação entre cenários. Nota-se no gráfico, que os ângulos para o *cenário 2* respondem as mudanças de direção do ventos enquanto os dados do *cenário 1* apresentam inversão de sentido praticamente regular, demonstrando a influência da maré sobre estes.

As informações apresentadas nas Figuras 5.11 e 5.12 corroboram com os mapas de campo de corrente previamente expostos. A análise dos dados de intensidade e ângulo das correntes para os cenários apresentados na presente seção demonstram que o vento, quando comparada a maré, tem maior influência sobre a circulação hidrodinâmica da região, principalmente nas regiões distais à desembocadura, permitindo-se afirmar que os padrões de escoamento da pluma do Rio Doce têm forte associação com o vento predominante, concordando com os resultados de Campos (2011) e ASA (2003 apud CAMPOS, 2011).

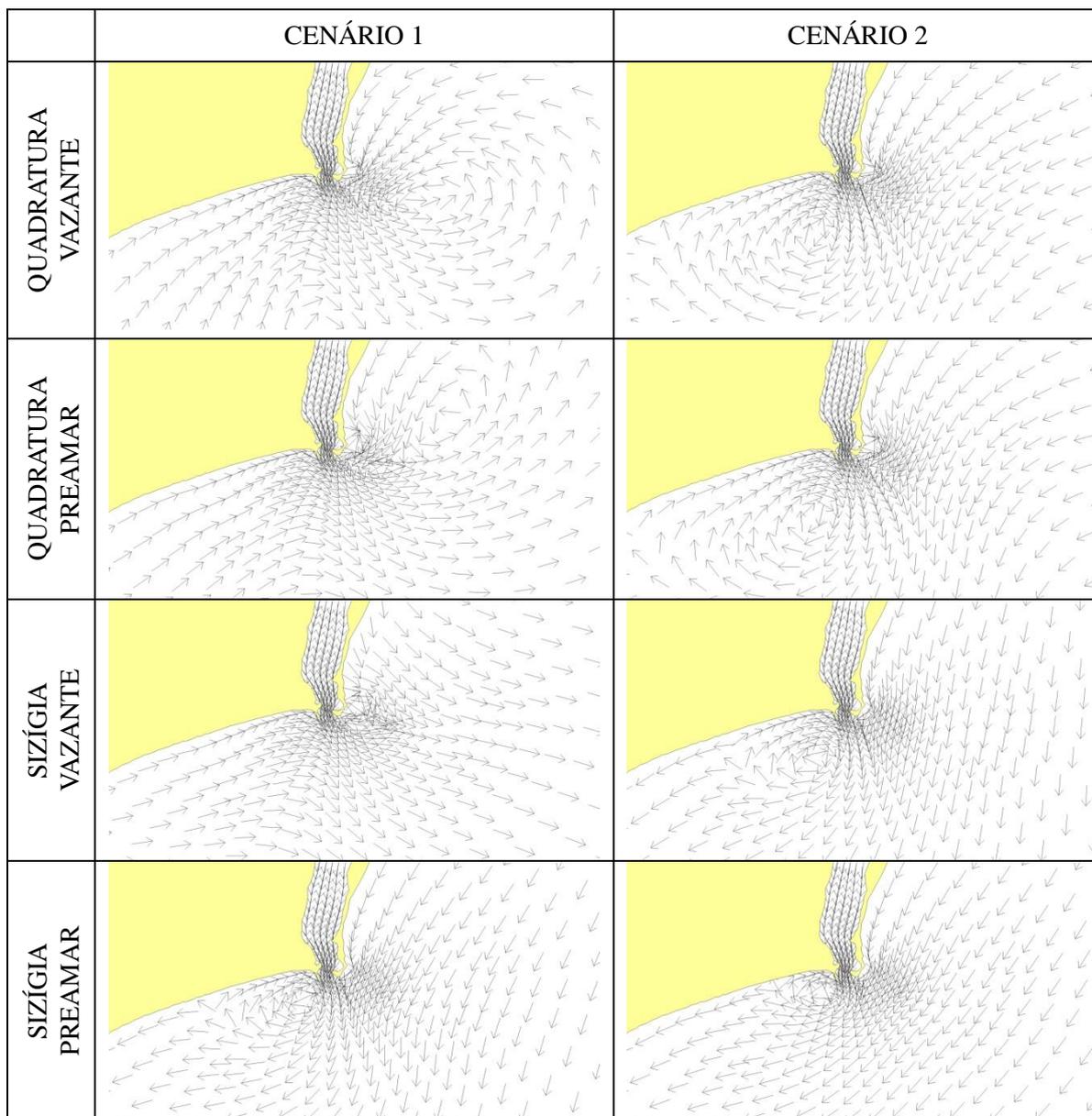


Figura 5.10- Campo vetorial\* evidenciando a formação de vórtices nos cenários 1 e 2, em diferentes condições de maré.\*vetores em escala fixa

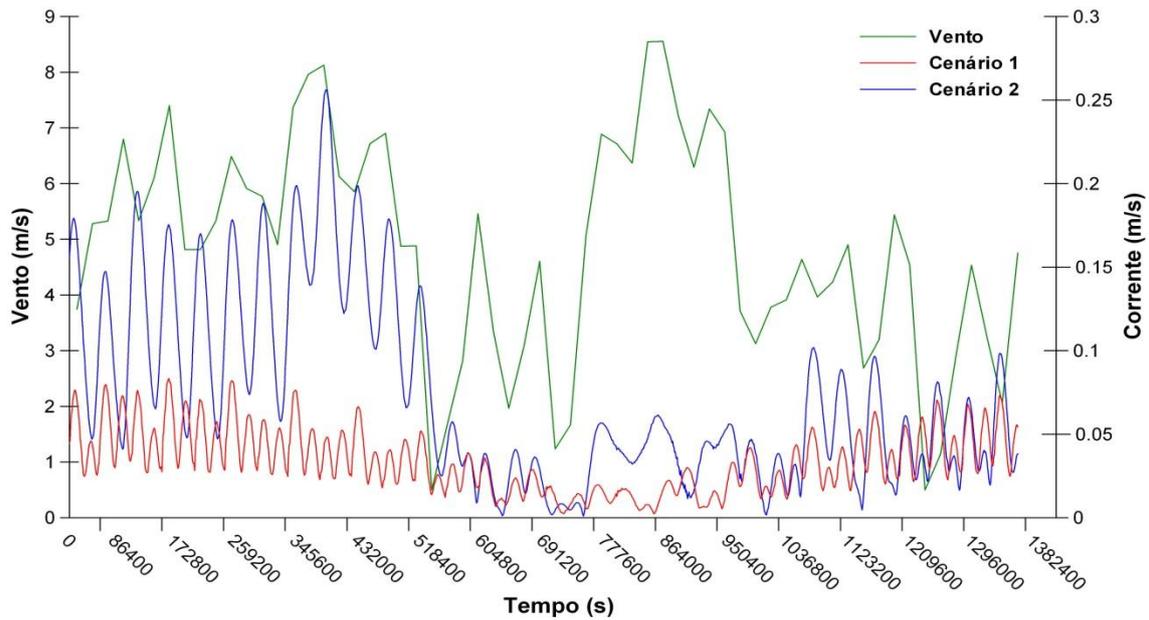


Figura 5.11- Série temporal do módulo da velocidade do vento e velocidade das correntes para o cenários 1 e 2, resultantes das simulações, monitorados na Estação ADCP.

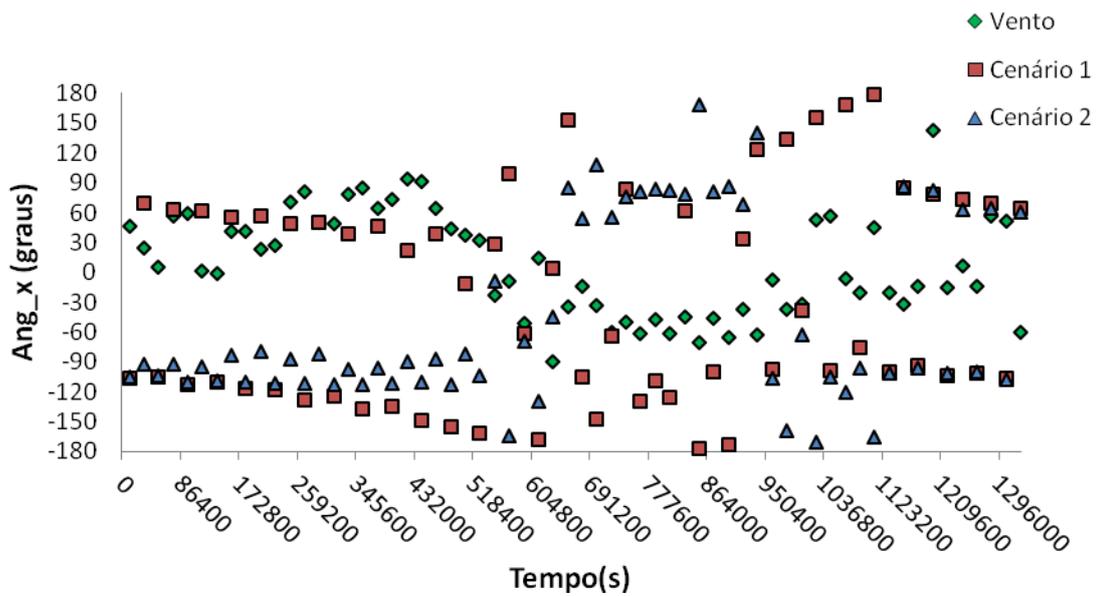


Figura 5.12- Série temporal do ângulo dos vetores de vento e ângulo dos vetores de velocidade da corrente, a cada seis horas, resultantes das simulações, monitorados na Estação ADCP.

### 5.3 SIMULAÇÃO DA PLUMA E USO DE IMAGENS DE SATÉLITE

Na presente seção são comparados os resultados do modelo Lagrangeano com as imagens de satélite. Os resultados da modelagem lagrangeana foram obtidos através de simulações computacionais (cenários) com as condições ambientais (maré, vento e vazão do Rio Doce) referentes à data da imagem de satélite. Na Tabela 5.2 são apresentados os cenários simulados com respectivas imagens de satélite (data, hora e satélite) as condições de vento predominante e vazão do Rio Doce.

Tabela 5.2- Cenários e respectivas imagens de satélite e condições ambientais.

Cenário	Data da imagem	Hora local	Satélite	Vento predominante	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
Cenário 3	7/5/2001	15:28:50	L7	SW	243
Cenário 4	1/10/2005	15:20:00	L5	SE	786
Cenário 5	14/4/2009	15:02:42	C2B	SE	1642
Cenário 6	5/4/2005	15:38:20	C2	NE	1577
Cenário 7	18/7/2005	15:47:50	C2	NE	603
Cenário 8	11/4/2006	15:30:00	L5	NE	882

Os resultados das simulações apresentadas na presente seção consideraram o período inicial de simulação igual a, aproximadamente, 72 horas antes da data de captação da imagem.

No intuito de comparar as imagens com os resultados das simulações, são apresentadas a imagem de satélite e o respectivo mapa de distribuição de partículas (do instante de tempo de simulação equivalente ao momento da captação da imagem). Para caracterização dos principais padrões de dinâmica da pluma são também apresentadas imagens de satélite, obtidas durante condições ambientes similares às imagens utilizadas no cenários, e mapas das distribuições das partículas durante alguns períodos da simulação dos cenários.

Os dados de intensidade e direção do vento para o *cenário 3* são apresentados na Tabela 5.3. Na Figura 5.13 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 3*. Nota-se na imagem de satélite a presença de sólidos em suspensão bem próximos a linha de costa e ao longo de sua extensão, que evidenciam forte ocorrência de processo de ressuspensão na linha de costa, corroborando como observado por Lorenzetti *et al.* (2007). Entretanto, percebe-se que há maior presença destes ao norte da foz do rio (indicação vermelha no quadro superior da Figura 5.13).

As partículas mostradas no mapa localizam-se ao norte da foz, demonstrando pouca influência da baixa vazão do rio na advecção das partículas e a predominante influência de correntes, possivelmente geradas pelo vento sudoeste, na advecção da pluma. Esta afirmação é corroborada pelos dados apresentados na Figura 5.14 que demonstram o deslocamento das partículas no sentido sul-norte entre os instantes 15:00 do dia 5/5/2001 e 6/5/2001 do tempo de simulação.

Tabela 5.3 - Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 3*.

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
4/5/2001 15:00	10,00	-78	N
4/5/2001 21:00	8,00	-89	N
5/5/2001 03:00	4,47	-117	NE
5/5/2001 09:00	0,89	153	SE
5/5/2001 15:00	3,62	62	SW
5/5/2001 21:00	3,52	83	S
6/5/2001 03:00	4,12	174	S
6/5/2001 09:00	4,03	67	SW
6/5/2001 15:00	7,00	44	SW
6/5/2001 21:00	4,74	44	SW
7/5/2001 03:00	5,20	60	SW
7/5/2001 09:00	5,20	45	SW
7/5/2001 15:00	6,38	66	SW

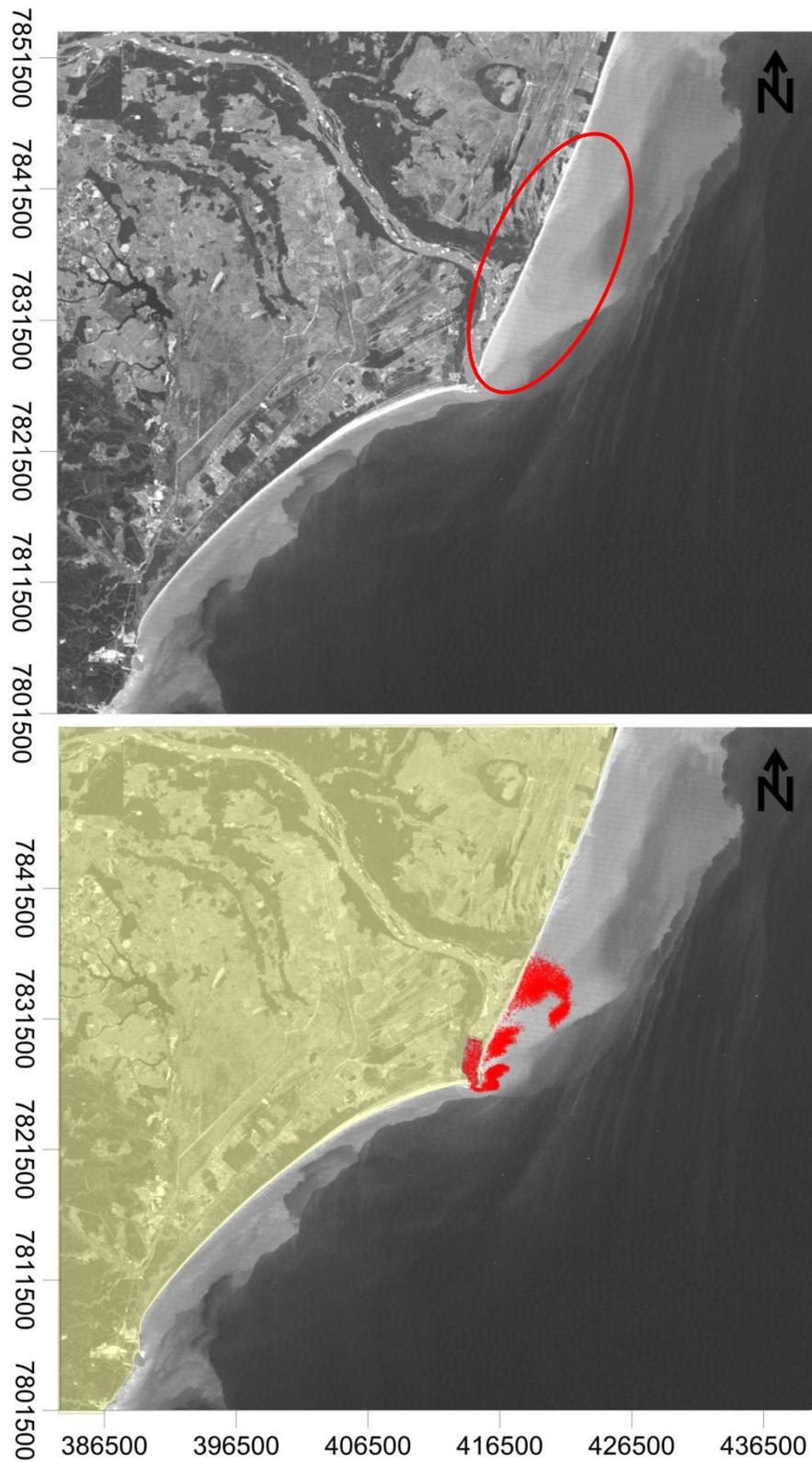


Figura 5.13 - Quadro acima - imagem de satélite referente o *cenário 3*, com indicação quanto a principal observação. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 7/5/2001. Vento SW. Vazão de 243 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

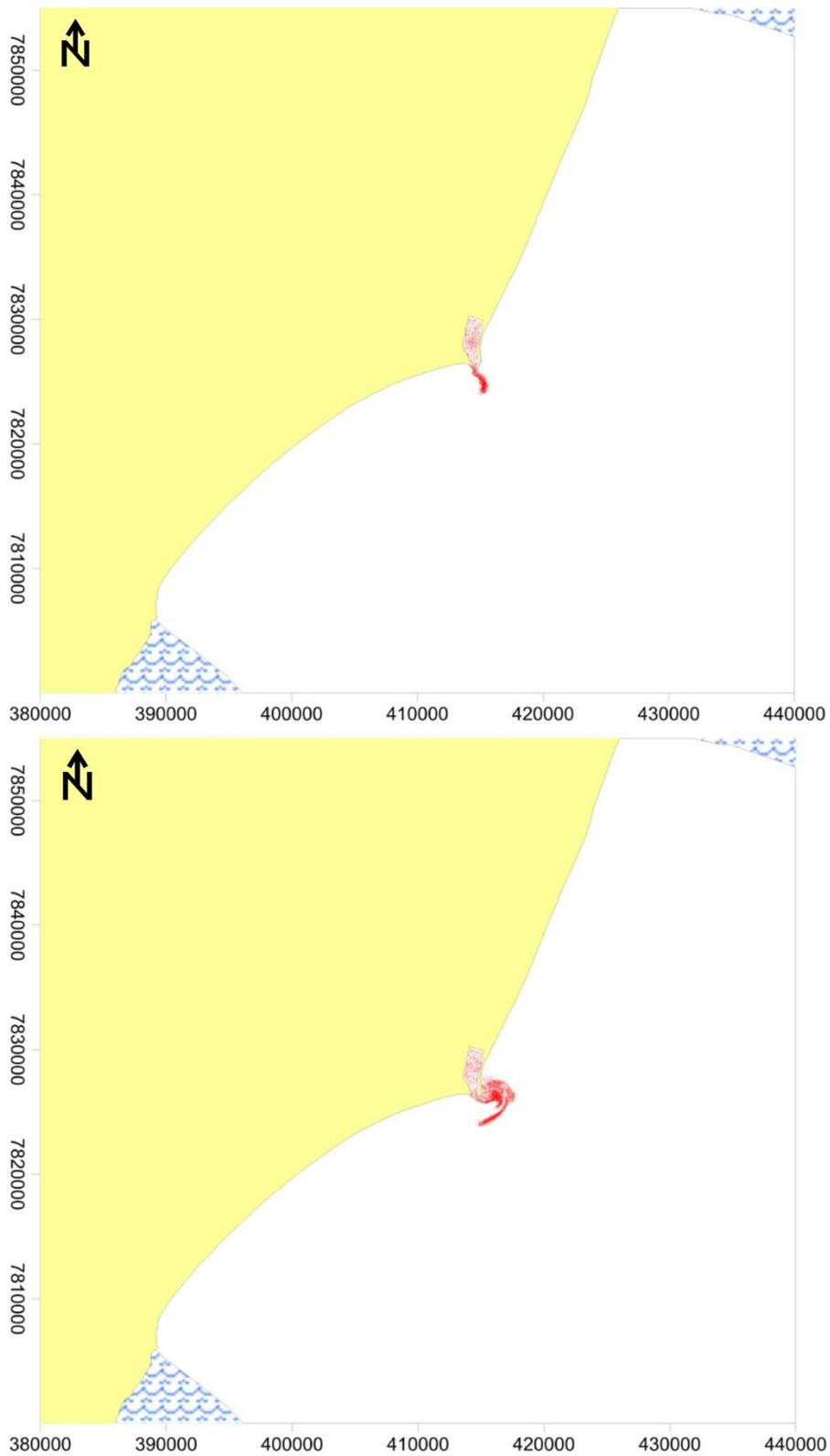


Figura 5.14 - Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 5/5/2001. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 6/5/2001. Vento SW. Vazão de 243 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

Os dados de intensidade e direção de vento para o *cenário 4* são apresentados na Tabela 5.4. Na Figura 5.15 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 4*. Nota-se na imagem de satélite a retenção de parte da pluma na região frontal da foz do rio, apresentando um formato protuberante pouco definido que se espalha para o norte da foz (indicação circular vermelha no quadro superior da Figura 5.15). Além disso, observa-se um possível processo de recirculação ao sul da foz (indicação circular amarela no quadro superior da Figura 5.15). Os resultados da simulação demonstram que a vazão do rio, próxima a vazão média, atua na advecção da pluma permitindo que esta atinja posições distais à linha de costa, contudo, a influência de correntes geradas pelo vento SE parece conter este processo advectivo. Na Figura 5.16 observa-se a formação de vórtices na região sul da foz, com retenção da pluma e deslocamento das partículas no sentido sul-norte.

Tabela 5.4- Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 4*.

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
28/9/2005 15:00	9,08	154,56	SE
28/9/2005 21:00	8,28	151,89	SE
29/9/2005 03:00	8,22	143,41	SE
29/9/2005 09:00	8,99	147,72	SE
29/9/2005 15:00	7,27	148,50	SE
29/9/2005 21:00	7,44	173,83	S
30/9/2005 03:00	6,04	167,57	S
30/9/2005 09:00	5,86	143,33	SE
30/9/2005 15:00	5,81	130,82	SE
30/9/2005 21:00	2,19	136,85	SE
1/10/2005 03:00	3,30	89,83	S
1/10/2005 09:00	4,74	108,43	SE
1/10/2005 15:00	6,14	102,23	E

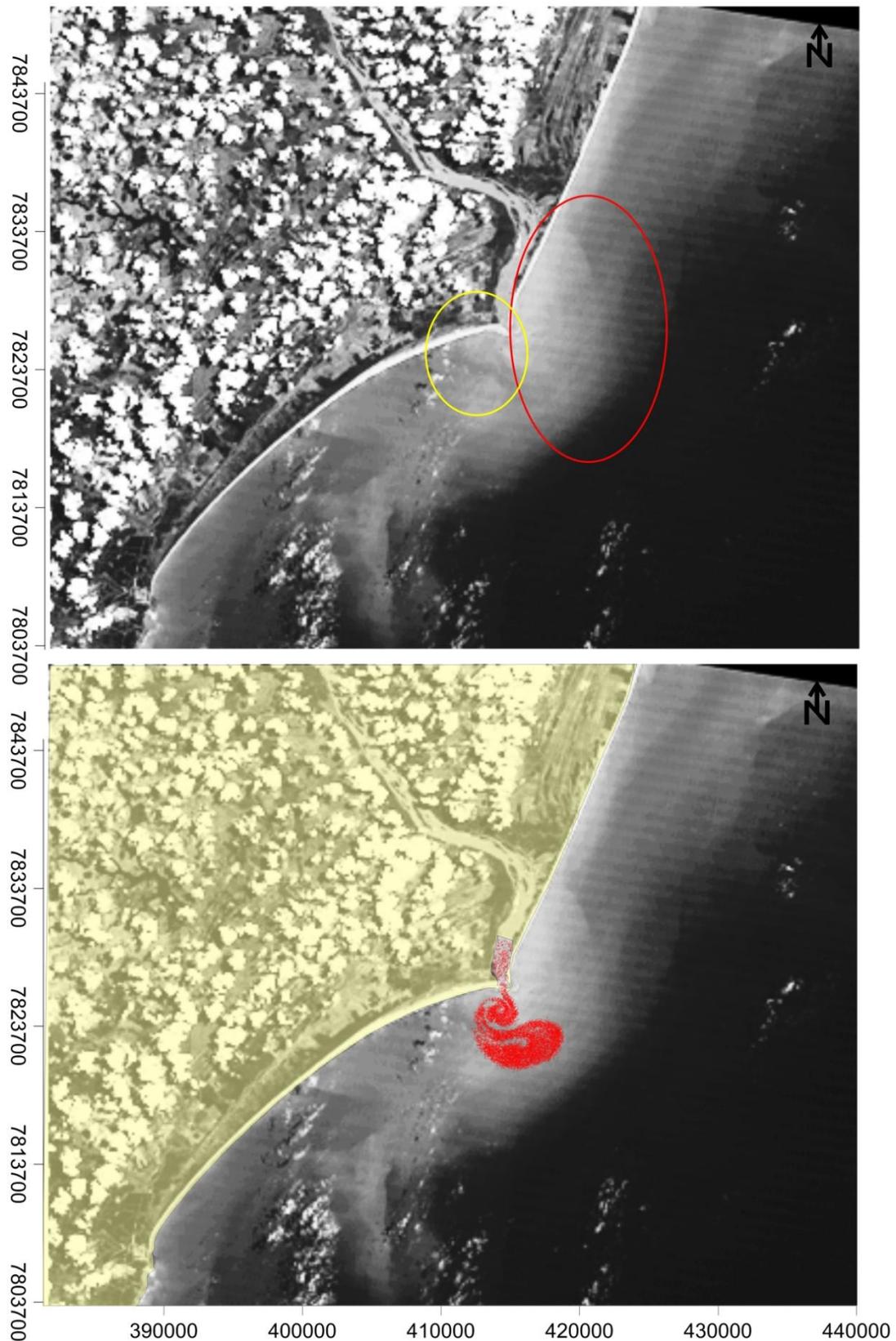


Figura 5.15-Quadro acima - imagem de satélite referente o *cenário 4*, com indicações das principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 1/10/2005. Vento SE. Vazão de 786 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

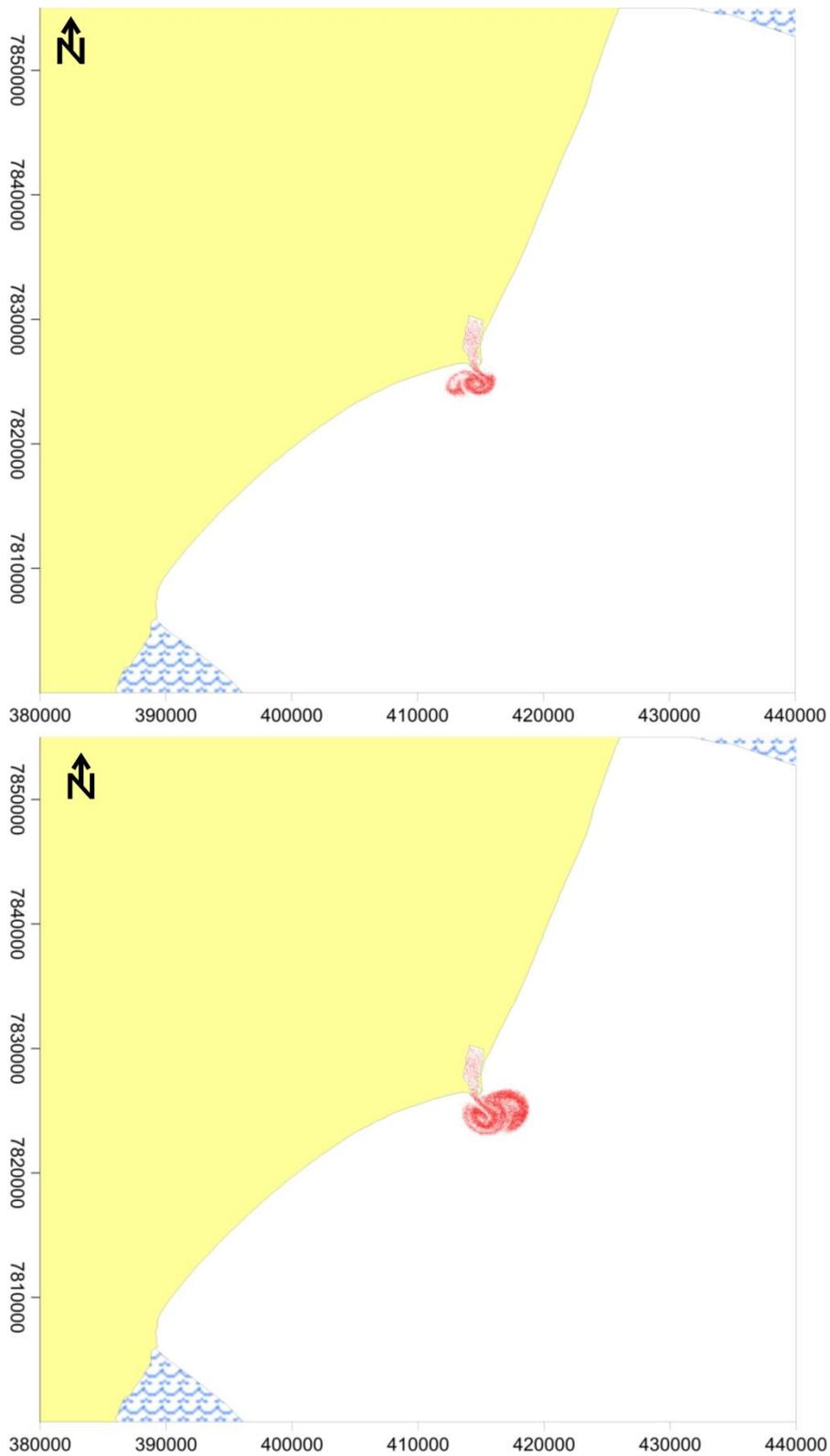


Figura 5.16- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 29/9/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 30/9/2005. Vento SE. Vazão de 786 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

Os dados de intensidade e direção para o *cenário 5* são apresentados na Tabela 5.5. Na Figura 5.17 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 5*. A retenção da pluma na região frontal da foz do rio demonstra-se ainda mais marcante quando comparada ao *cenário 4*, apresentando protuberância bem definida (indicação linear vermelha no quadro superior da Figura 5.17), condizendo com o padrão de dinâmica observado por Campos (2011).

A vazão alta do rio atua fortemente na advecção da pluma e há influência de correntes, possivelmente geradas por vento, na contenção parcial deste processo advectivo. Ao contrário do observado na imagem de satélite, a pluma mostrada no mapa não está adjacente a linha de costa, ao sul da foz. Tal fato pode ser explicado pela diferença de geometria da foz que contribui no direcionamento e alcance da pluma. Entretanto, mesmo diante desta limitação, o modelo demonstra boa representatividade espacial, com o mapa de partículas apresentando dimensões de sua pluma muito similar as dimensões da pluma da imagem.

As imagens de satélite da Figura 5.18 foram obtidas durante condições ambientais similares as do *cenário 5*, ou seja, vento predominantemente SE e vazão alta do rio. Estas imagens apresentam grande similaridade aos resultados apresentados para o *cenário 5*, demonstrando a existência um padrão na dinâmica da pluma, para estas condições ambientais, como evidenciado por Campos (2011).

A Figura 5.19 apresenta a distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 29/9/2005 e do dia 30/9/2005. A distribuição das partículas da pluma em camadas com formato “zig-zague” ocorre possivelmente devido a influência das marés, corroborando com as observações de Liu *et al.* (2008).

Tabela 5.5 - Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 5*.

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
11/4/2009 15:00	5,66	144,34	SE
11/4/2009 21:00	4,69	129,81	SE
12/4/2009 03:00	4,55	129,64	SE
12/4/2009 09:00	7,31	149,57	SE
12/4/2009 15:00	6,08	136,33	SE
12/4/2009 21:00	5,61	121,14	SE
13/4/2009 03:00	4,69	129,81	SE
13/4/2009 09:00	4,52	114,86	SE
13/4/2009 15:00	3,92	109,36	SE
13/4/2009 21:00	3,34	-171,38	E
14/4/2009 03:00	3,68	-157,62	NE
14/4/2009 09:00	2,18	-105,95	NE
14/4/2009 15:00	1,25	151,39	SE

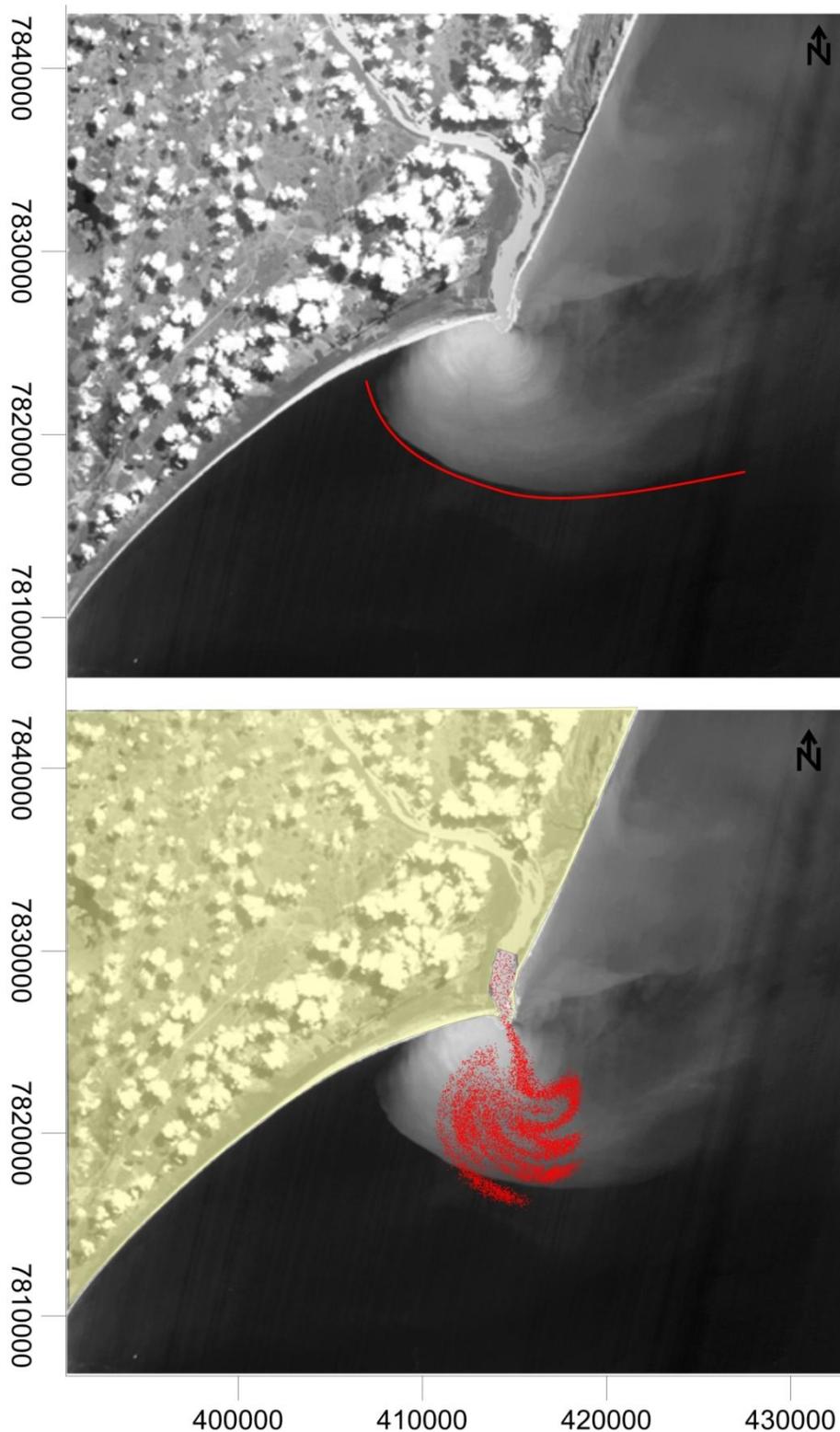


Figura 5.17- Quadro acima - imagem de satélite referente o cenário 5, com indicação linear quanto a principal observação. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 14/4/2009. Vento SE. Vazão de 1642 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

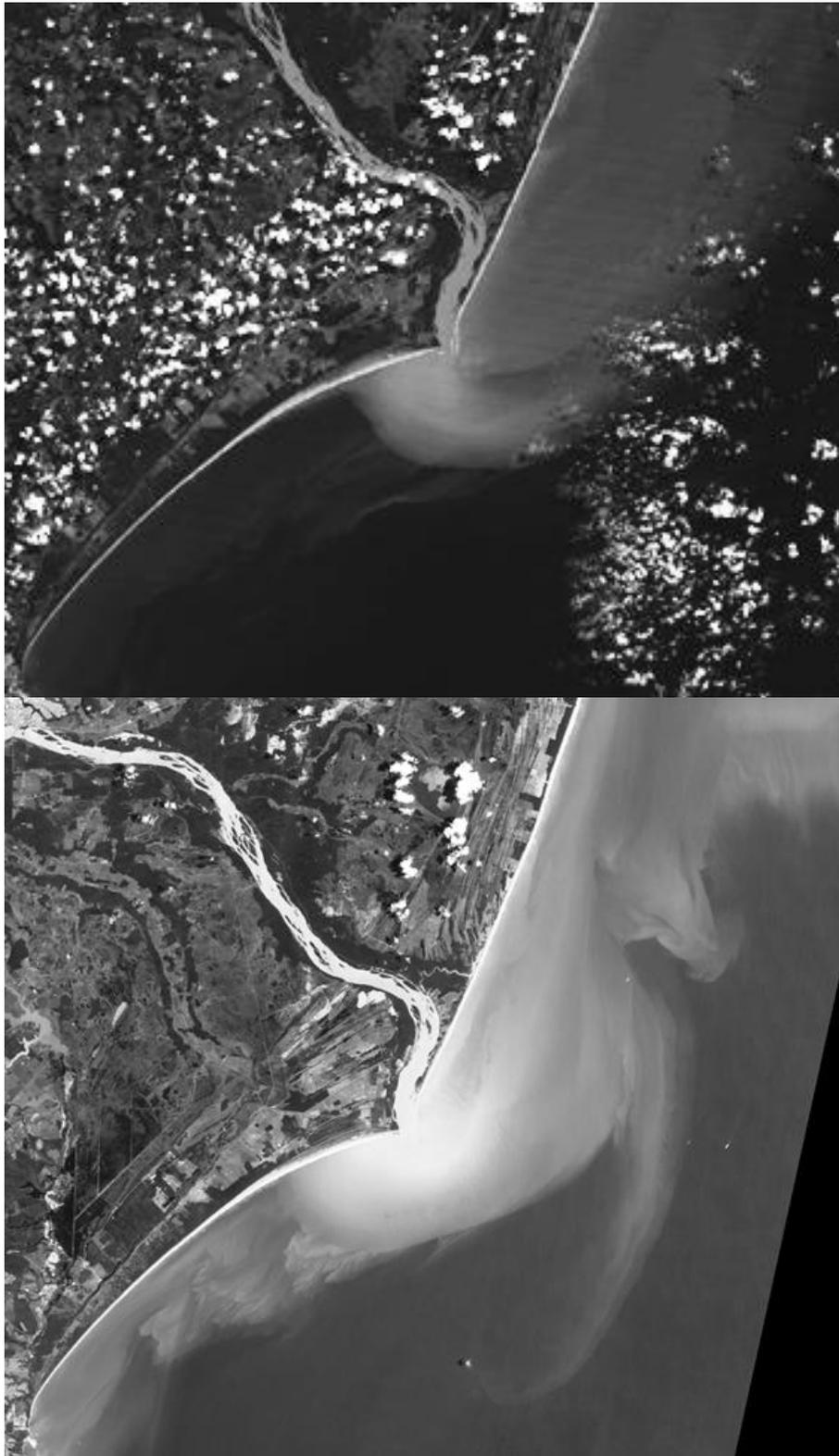


Figura 5.18- Quadro acima - imagem de satélite do dia 19/04/2009 obtidas pelo satélite Landsat5 Vento SE. Vazão de 1218 m<sup>3</sup>/s.Datum WGS84 –UTM.. Quadro abaixo - imagem de satélite do dia 19/01/2004 obtidas pelo satélite Cbers. Vento SE. Vazão de 4420 m<sup>3</sup>/s.Datum WGS84 –UTM.

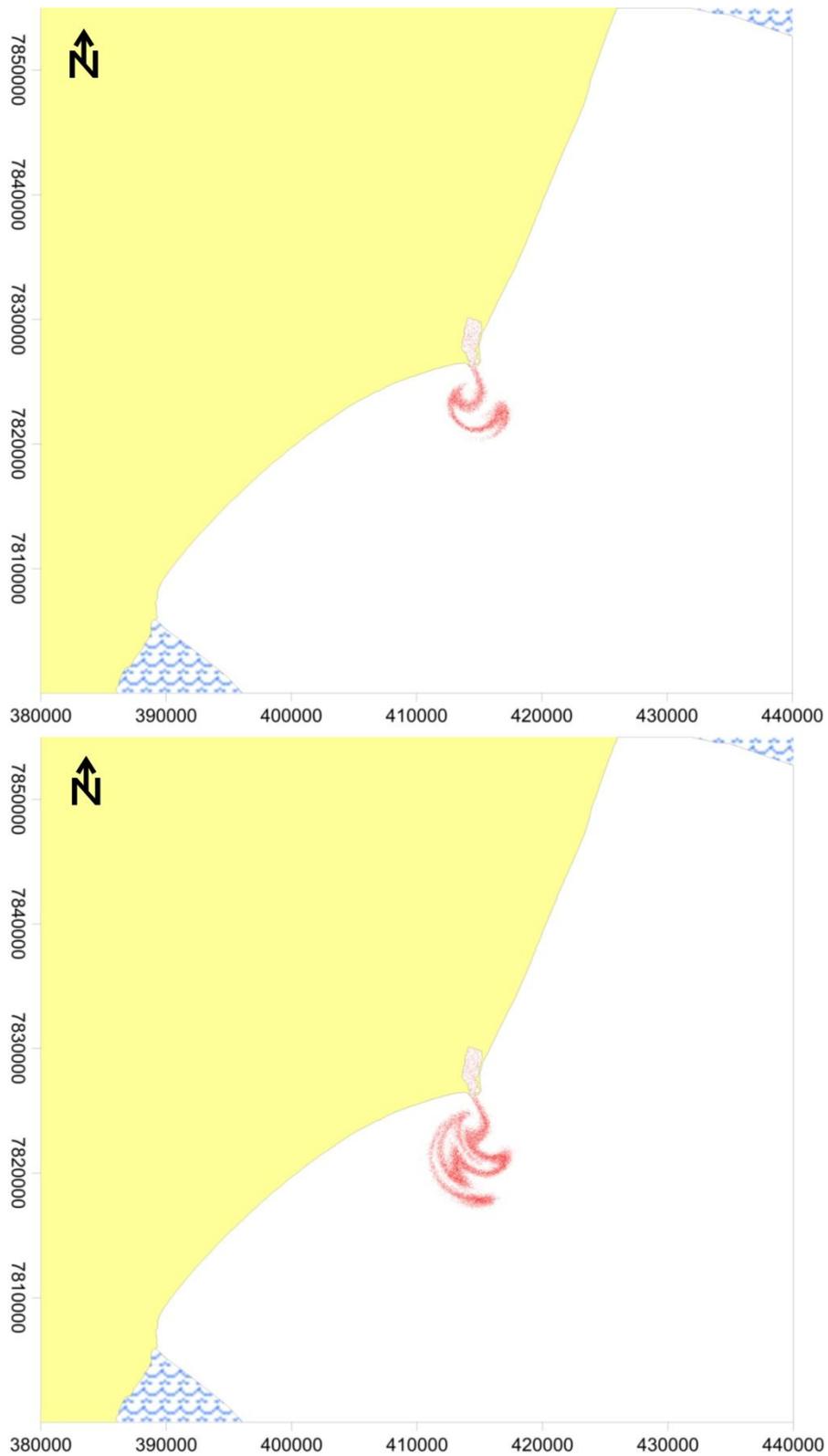


Figura 5.19- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 12/4/2009. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 13/4/2009. Vento SE. Vazão de 1642 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

Os dados de intensidade e direção de vento para o *cenário 6* são apresentados na Tabela 5.6. Destaca-se nesse cenário a baixa intensidade do vento. Na Figura 5.20 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 6*. Nota-se na imagem de satélite a presença de uma grande pluma paralela a linha de costa ao sul da foz (indicação circular vermelha no quadro superior da Figura 5.20) e pluma bem marcante na frente da foz (indicação circular amarela no quadro superior da Figura 5.20). Os resultados da simulação indicam que os ventos, com baixa intensidade, permitem a livre atuação da alta vazão do rio que desloca as partículas a grandes distâncias da linha de costa, assim como permite o espalhamento da pluma dominado pela maré, caracterizada pelo formato em “zig-zague”. Este fato é corroborado pelos resultados apresentados na Figura 5.21. As diferenças observadas entre os resultados possivelmente estão associadas a fatores como forma da foz e as limitações inerentes a resolução dos dados e a escolha do instante inicial do processo de simulação

Tabela 5.6 - Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 6*.

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
2/4/2005 15:00	3,67	101,00	E
2/4/2005 21:00	3,49	-113,63	NE
3/4/2005 03:00	2,89	-14,04	NO
3/4/2005 09:00	3,71	-117,26	NE
3/4/2005 15:00	3,94	-120,47	NE
3/4/2005 21:00	4,27	-73,69	N
4/4/2005 03:00	3,62	-65,56	N
4/4/2005 09:00	4,87	-109,18	NE
4/4/2005 15:00	4,91	-123,37	NE
4/4/2005 21:00	4,03	-82,87	N
5/4/2005 03:00	2,33	-43,26	N
5/4/2005 09:00	3,11	-146,82	NE
5/4/2005 15:00	4,68	-163,89	NE

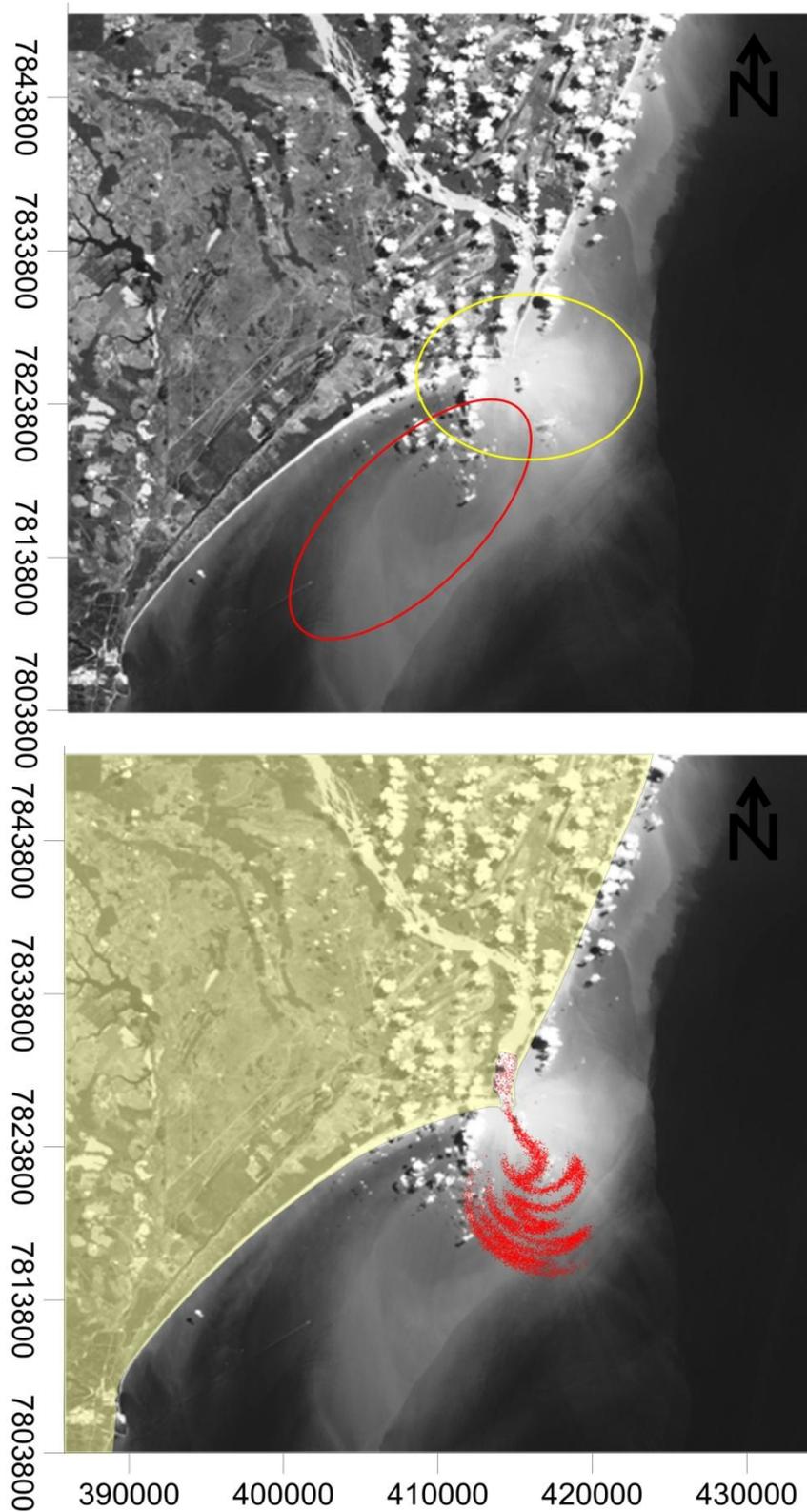


Figura 5.20- Quadro acima - imagem de satélite referente o *cenário 6*, com indicações quanto as principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 5/4/2005. Vento NE. Vazão de 1577 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

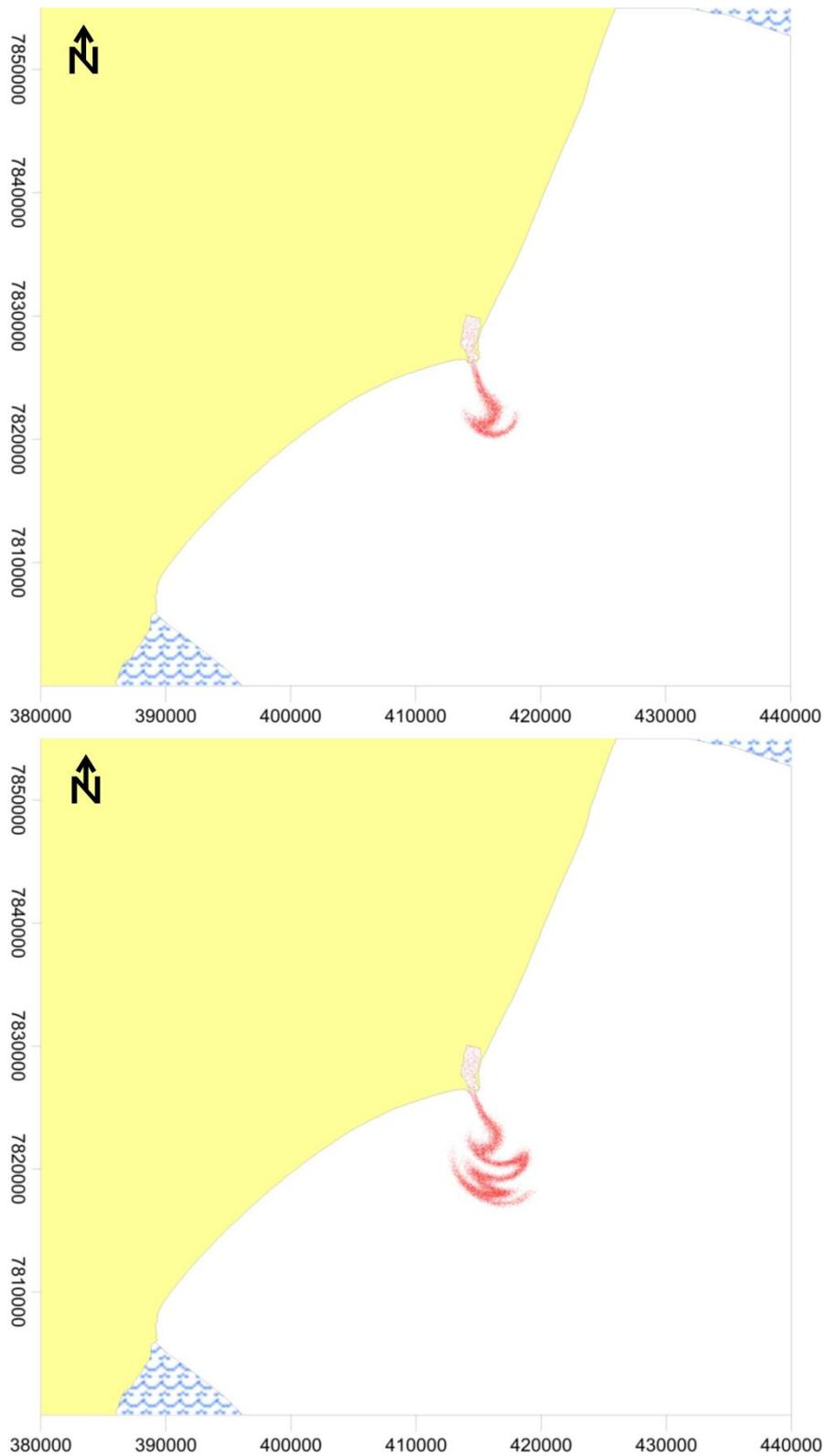


Figura 5.21- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 3/4/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 4/4/2005. Vento NE. Vazão de 1577 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM.

Os dados de intensidade e direção de vento para o *cenário 7* são apresentados na Tabela 5.7. Destaca-se nesta simulação a alta intensidade do vento NE. Na Figura 5.22 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 7*. Nota-se na imagem de satélite a presença de sedimentos em suspensão provenientes da região ao norte da foz (indicação retangular vermelha). Entretanto, é possível visualizar a pluma fluvial, com coloração mais escura devido à menor presença de material em suspensão (indicada pela seta amarela), fenômenos como vórtices (indicados pelas setas vermelhas) e recirculação (indicado pela seta azul no quadro superior da Figura 5.22). No mapa resultante da simulação pode ser observada a presença dos vórtices (indicada pelas setas verdes) e de processos de recirculação ao sul da foz (indicada pela seta azul no quadro inferior da Figura 5.22), que demonstram a capacidade do modelo em representar os principais processos ambientais para este cenário.

As imagens de satélite da Figura 5.23 foram obtidas durante condições ambientais similares as do *cenário 7*, ou seja, vento predominantemente NE, com intensidade alta, e vazão relativamente baixa do rio. Estas imagens apresentam grande similaridade com os resultados apresentados para o *cenário 7*, demonstrando a existência de um padrão na dinâmica da pluma, para estas condições ambientais.

Na Figura 5.24 é demonstrado o deslocamento das partículas no sentido norte-sul durante todo o tempo de simulação. A análise dos mapas resultantes da simulação demonstra a predominância do vento na advecção da pluma, assim como sua importância na formação dos vórtices. Nota-se que a pluma ao sair da foz é deslocada para o sul da foz, após este processo parte das partículas são carregadas novamente pela influência da vazão do rio e padrão de correntes gerado pelo vento, formando um vórtice, que posteriormente se desloca no sentido norte-sul. A repetição deste padrão permite a presença de vários vórtices, como observado nas imagens e nos mapas resultantes, concordando com as observações de Campos (2011).

Tabela 5.7 - Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 7*

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
15/7/2005 15:00	5,79	-170,05	E
15/7/2005 21:00	4,70	-141,91	NE
16/7/2005 03:00	4,02	-145,12	NE
16/7/2005 09:00	5,83	-120,96	NE
16/7/2005 15:00	7,29	-136,67	NE
16/7/2005 21:00	7,84	-119,84	NE
17/7/2005 03:00	7,44	-83,83	N
17/7/2005 09:00	6,80	-88,32	N
17/7/2005 15:00	8,38	-125,78	NE
17/7/2005 21:00	8,01	-110,47	NE
18/7/2005 03:00	6,86	-82,46	N
18/7/2005 09:00	6,24	-125,22	NE
18/7/2005 15:00	6,08	-136,33	NE

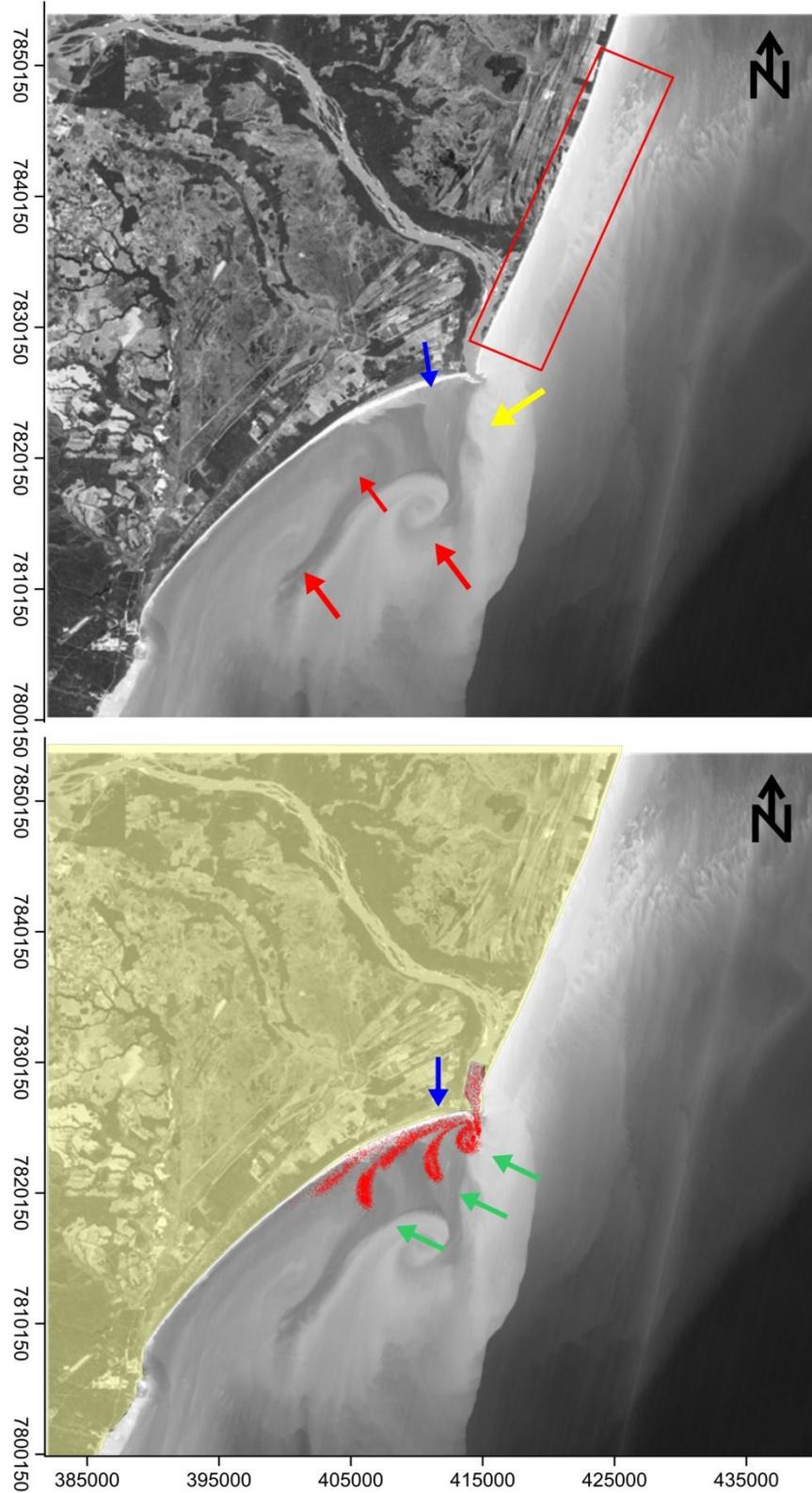


Figura 5.22-Quadro acima - imagem de satélite referente o *cenário 7*. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 18/7/2005. Ambos com indicações quanto as principais observações. Vento NE. Vazão de 603 m<sup>3</sup>/s.Datum WGS84 –UTM.



Figura 5.23- Quadro acima - imagem de satélite do dia 16/08/2000 obtidas pelo satélite Landsat 5. Vento NE. Vazão de 322 m<sup>3</sup>/s.Datum WGS84 –UTM Quadro abaixo - imagem de satélite do dia 23/05/2001 obtidas pelo satélite Landsat 7. Vento NE. Vazão de 303 m<sup>3</sup>/s.Datum WGS84 – UTM

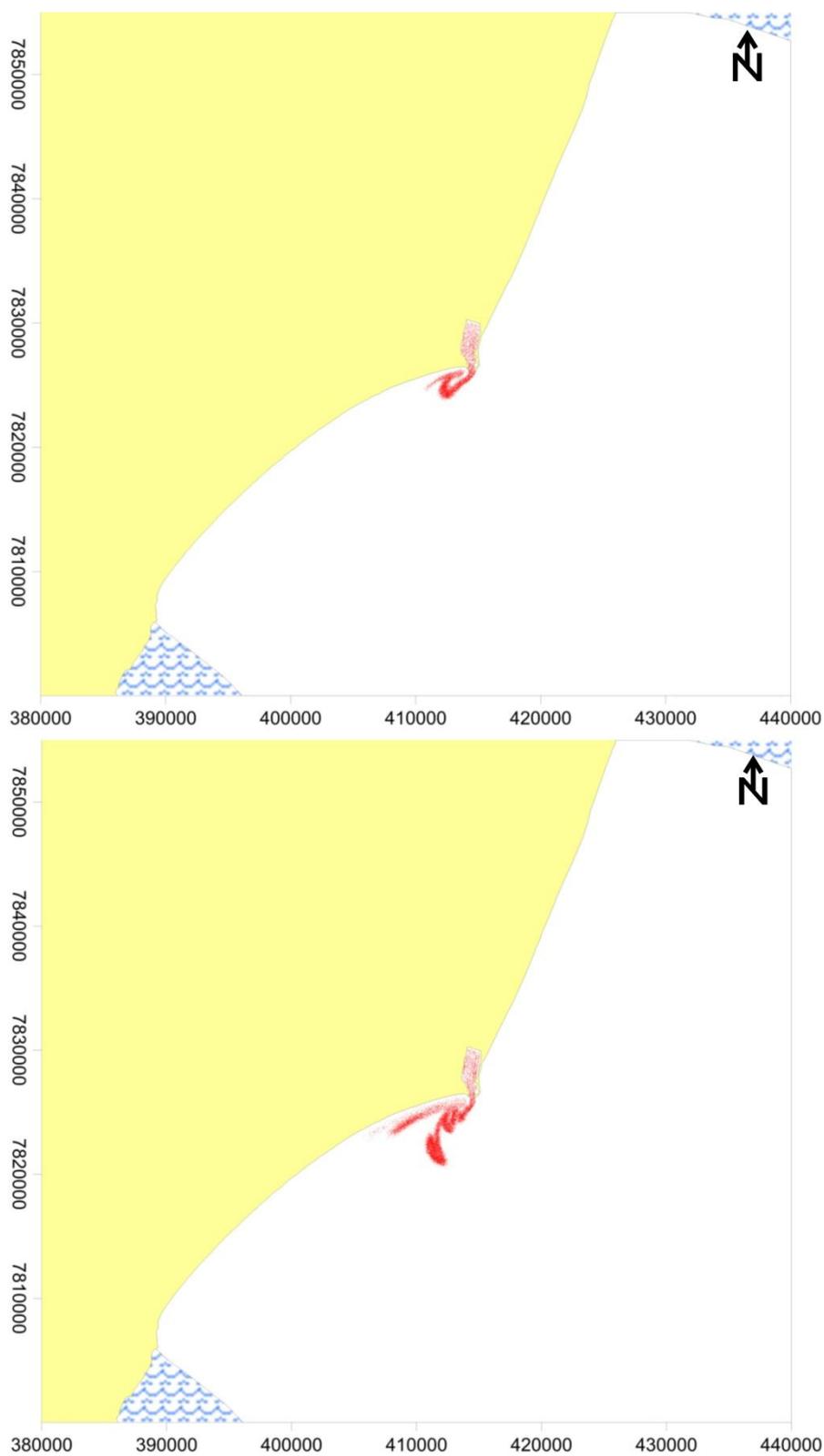


Figura 5.24- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 16/7/2005. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 17/7/2005. Vento NE. Vazão de 603 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM

Os dados de intensidade e direção de vento para o *cenário 8* são apresentados na Tabela 5.8. Na Figura 5.25 são apresentadas a imagem de satélite e mapa de distribuição de partículas (sobreposta a imagem) referente ao *cenário 8*. Nota-se na imagem de satélite a concentração da pluma na frente da foz (indicação circular vermelha), plumas de sedimentos em suspensão um pouco mais fracas, paralelas a linha de costa e ao sul da foz (indicações lineares verdes), e um pequeno vórtice ao norte da foz (indicação circular amarela no quadro superior da Figura 5.25). Da mesma forma, o mapa de distribuição de partículas demonstra a presença de maior quantidade de partículas em frente a foz, a presença de plumas paralelas a costa ao sul da foz e a formação de um pequeno vórtice.

Os mapas da Figura 5.26 demonstram o deslocamento das partículas no sentido norte-sul, com formação de vórtices nos instantes iniciais e intermediários da simulação, entretanto a diminuição da intensidade do vento a partir do instante 21:00 do dia 10/4/2006 permite o acúmulo da pluma na frente da foz.

Tabela 5.8- Dados de vento utilizados durante a simulação do *cenário 8*.

Instante	Velocidade	Ângulo	Classificação
8/4/2006 15:00	3,22	-126,16	NE
8/4/2006 21:00	5,22	-102,17	N
9/4/2006 03:00	5,69	-108,43	NE
9/4/2006 09:00	4,32	-103,39	N
9/4/2006 15:00	6,47	-129,35	NE
9/4/2006 21:00	7,32	-104,23	N
10/4/2006 03:00	5,20	-89,89	N
10/4/2006 09:00	7,65	-107,49	NE
10/4/2006 15:00	8,24	-95,57	N
10/4/2006 21:00	7,88	-81,97	N
11/4/2006 03:00	4,52	-54,90	N
11/4/2006 09:00	3,00	-89,81	N
11/4/2006 15:00	4,14	-81,67	N

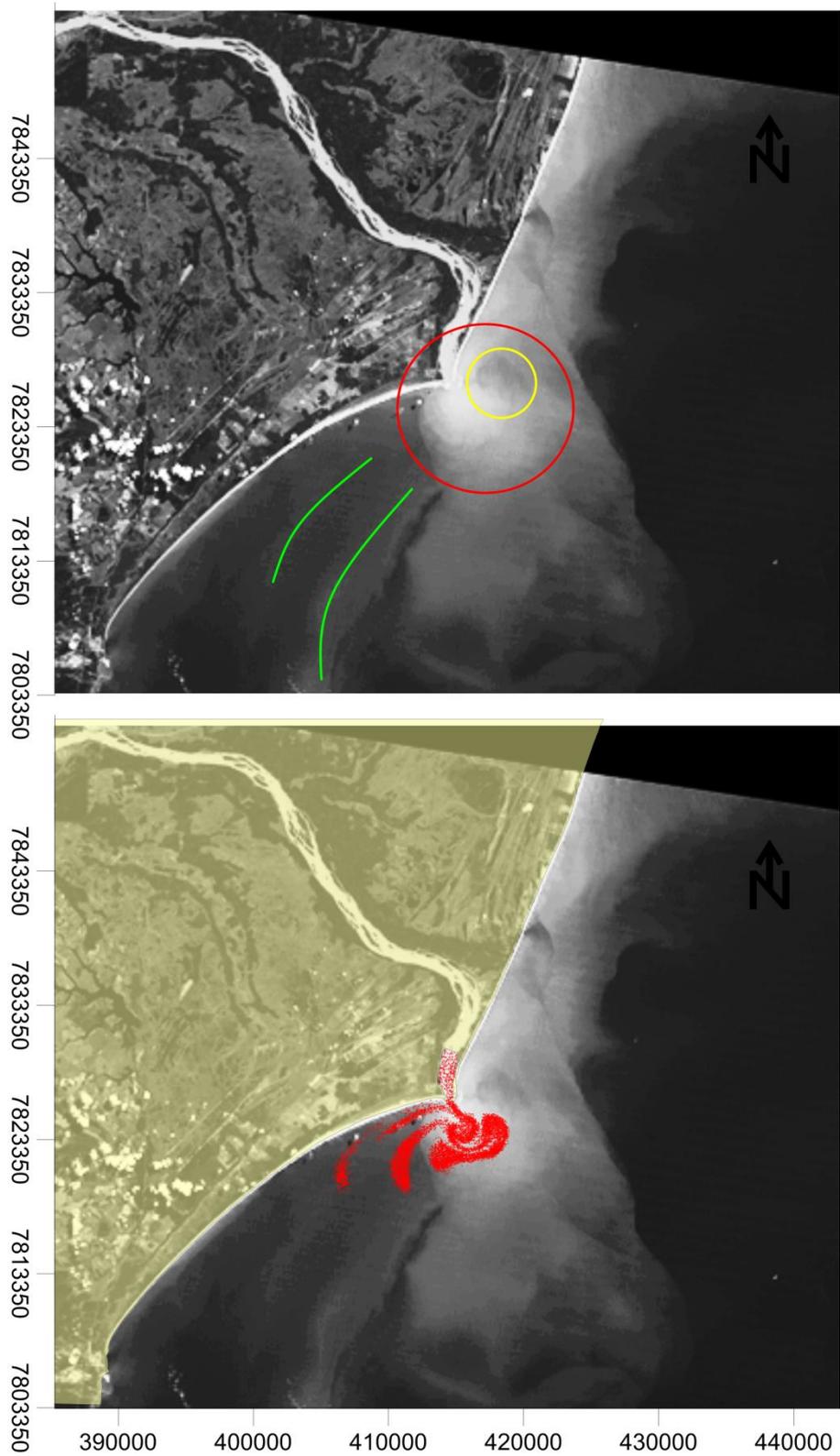


Figura 5.25- Quadro acima - imagem de satélite referente o *cenário 8* , com indicações quanto as principais observações. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 11/4/2006. Vento NE. Vazão de 882 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM

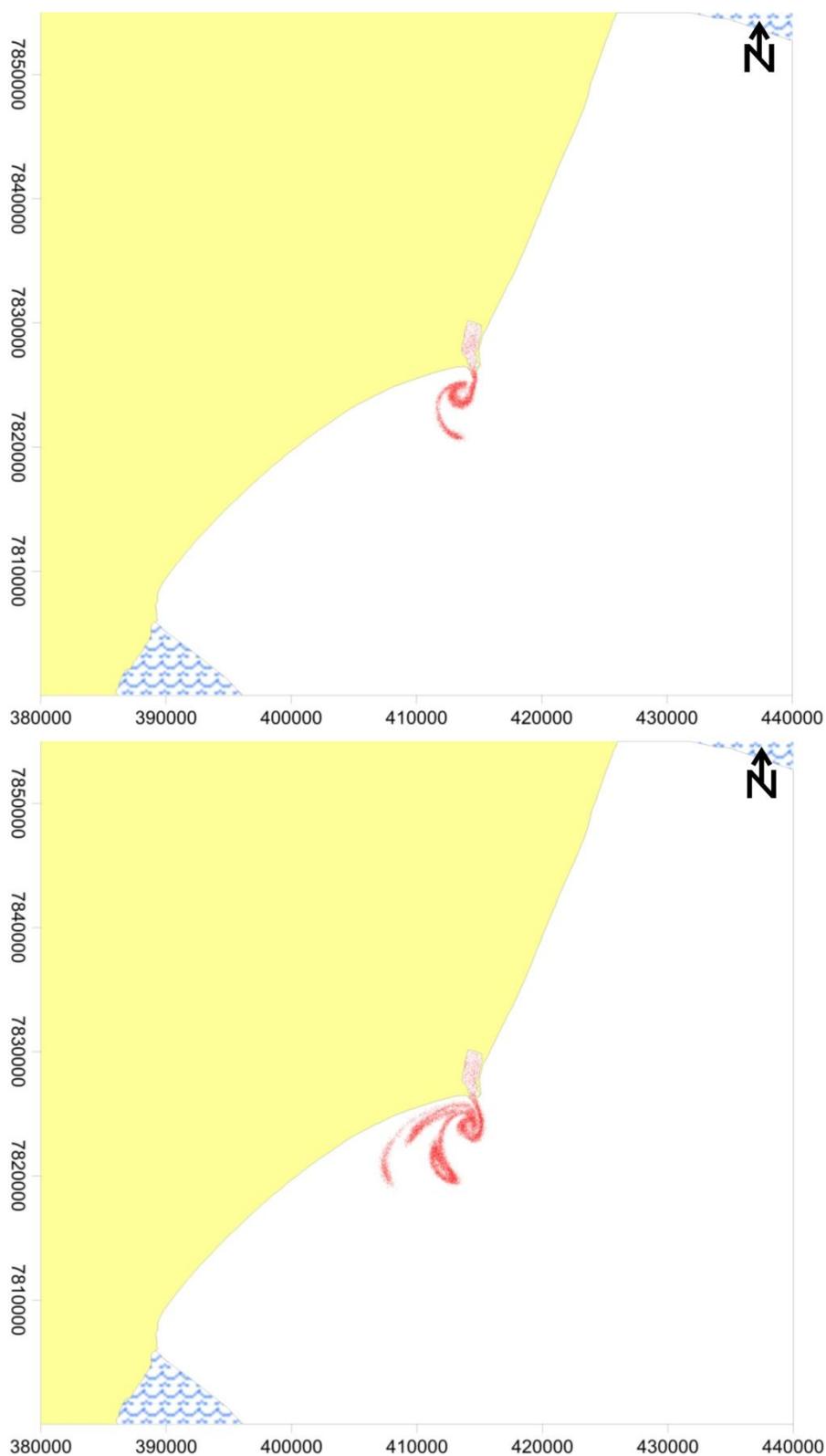


Figura 5.26- Quadro acima - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 9/4/2006. Quadro abaixo - distribuição das partículas no instante 15:00:00 do dia 10/4/2006. Vento NE. Vazão de 882 m<sup>3</sup>/s. Datum WGS84 –UTM

A análise dos cenários demonstrou que o modelo apresenta melhores resultados nas simulações em que os ventos variaram pouco em direção e intensidade, e em simulações com intensidade alta de ventos. Este fato pode ser explicado pela possível existência de estratificação da pluma do rio, que a torna mais suscetível a correntes geradas por vento, assim como proposto por Campos (2011). Posto isso, ressalta-se que os dados de vento adotados no presente trabalho consideram a escala de tempo sinótica (6h) e a uniformidade espacial, impossibilitando o modelo de representar eventos com resolução temporal inferiores há 6 horas. A adoção de dados de vento com baixa resolução temporal (6h) não permite a representação de oscilações de curto período. Entretanto, Marques (2009) ao comparar dados de campo com dados do *Reanalyses* verificou a boa representação destes dados. Contudo, estudos de Siminato *et al.* (2006) demonstraram que os dados do *Reanalyses* subestimam em até 50% os eventos de alta intensidade.

Cabe ressaltar o fato do modelo 2DH desconsiderar a estratificação da coluna de água, o que possivelmente compromete parcialmente a aplicabilidade deste tipo de modelo hidrodinâmico na representação de cenários com ventos de baixa intensidade. Por outro lado, os ventos com maior intensidade possivelmente diminuem a estratificação vertical na região costeira, tornando possível a aplicação do modelo 2DH. Este fato, pode ser evidenciadas pelos resultados obtidos nas simulações dos *cenários 5 e 7*, que representam bem os principais processos como a protuberância da pluma, com ventos de alta intensidade de SE (*cenário 5*), e a formação dos vórtices, com ventos de alta intensidade de NE (*cenário 7*), assim condizendo com os estudos de Campos (2011).

Os resultados indicam que há atuação da maré no espalhamento da pluma, principalmente quando associada a vazões elevadas do rio, como observados nos *cenários 5 e 6*, com formação de espalhamento de partículas em formato de “zig-zague”. Estas informações concordam com os estudos de ASA (2003 apud CAMPOS, 2011) para o Rio Doce, e Leite (2007), Silva *et al.* (2009) e Marques (2009) para outras plumas existentes na costa Brasileira.

Valores elevados da vazão, como nos *cenário 5 e 6*, também apresentaram propagação de plumas para regiões mais distais à linha de costa, enquanto os demais cenários mantiveram a pluma bem próxima a costa e/ou desembocadura. Entretanto, estas observações devem ser consideradas com ressalvas devido à utilização de um mesmo formato de barra da desembocadura para diferentes vazões.

Como nos cenários 1 e 2, quase todos os outros cenários formaram vórtices próximos ao entorno da desembocadura. Este fato é supostamente explicado pela indução da vazão do rio na formação dos vórtices, que são ainda mais intensos quando associados à atuação dos ventos, corroborando com os resultados de Liu *et al.* (2008) e Yankovisky *et al.* (2001).

A utilização do modelo lagrangeano demonstrou boa aplicabilidade, uma vez que os mapas apresentarem distribuições de partículas similares aos materiais sólidos em suspensão observados nas imagens de satélite. Contudo, a ocorrência freqüente de ressuspensão demonstra a importância da adoção de taxas de decaimento e ressuspensão das partículas do modelo, para assim melhorar a representatividade dos resultados, como exposto por James (2002). Não obstante, o modelo Lagrangeano utiliza os campos de velocidade gerados pelo modelo hidrodinâmico 2DH, que pela análise dos dados de calibração se apresentou quantitativamente inadequado quanto aos dados de corrente. Portanto, a representação do modelo torna-se limitada ao desempenho do modelo hidrodinâmico e principalmente as características de resolução dos dados adotados. Com isso, há de se considerar a adoção de modelos com estratificação vertical (3D); de dados de vento com resolução temporal inferiores a escala sinótica e não espacialmente uniformes; e de anomalias de densidade acoplados aos modelos lagrangeanos para o melhoramento de seu desempenho, como e evidenciado por Liu *et al.* (2008), Yankovisky *et al.* (2001) e James (2002).

Diante do exposto, considera-se que as diferenças observadas entre os resultados dos cenários e as respectivas imagens de satélite possivelmente estão associadas ao formato da foz, que muda regularmente, mas foi mantida fixa para todos os cenários deste trabalho; a precisão da batimetria, que foi mantida constante; a desconsideração da estratificação da pluma; a escolha do instante inicial do processo de simulação; as limitações devido à comparação entre uma pluma de sólidos em suspensão (imagens) e uma pluma de partículas (simulações) sem taxa de decaimento e ressuspensão de sedimentos; e principalmente a adoção de dados de vento com baixa resolução temporal.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A simulação computacional através de modelo 2DH demonstra boa aplicabilidade como primeira aproximação para a representação da dinâmica da pluma do Rio Doce e da região oceânica adjacente em condições de vento com alta intensidade. Entretanto, devem-se considerar os resultados qualitativamente, uma vez que a calibração do modelo não apresentou respostas quantitativas satisfatórias quanto às correntes, e não foram avaliadas as dimensões das plumas e fenômenos como vórtices.

Ciente das ressalvas, conclui-se que o vento tem atuação importante no padrão de distribuição da pluma quando este ocorre com forte intensidade. A vazão do rio influencia na formação de vórtices no entorno da desembocadura, predominando no movimento advectivo da pluma nas proximidades da foz, e quando elevada, influencia no alcance da pluma. A maré, por sua vez, atua no espalhamento da pluma, principalmente em condições de alta vazão do rio e em regiões distais à foz.

Existem diferentes padrões de distribuição da pluma do Rio Doce: ventos com alta intensidade provenientes do NE induzem a formação de vórtices ao sul da desembocadura enquanto ventos com alta intensidade provenientes do SE atuam na contenção da pluma formando uma protuberância junto à foz. Vazões elevadas do rio induzem a formação de protuberância junto à foz.

O modelo Lagrangeano apresenta-se capaz de representar a dinâmica da pluma do Rio Doce, demonstrando, dentro das ressalvas, boa similaridade com os processos hidrodinâmicos e dinâmica da pluma observados através das imagens de satélite. Contudo, para o seu efetivo sucesso estes modelos devem ser acoplados a modelos hidrodinâmicos 3D, devem utilizar dados com alta resolução temporal e devem levar em consideração parâmetros como densidade da água, e decaimento e ressuspensão de partículas.

A associação de imagens de satélite e o modelo computacional apresenta-se como uma boa metodologia para o estudo da dinâmica da pluma do Rio Doce.

Como continuidade dos estudos propõem-se as seguintes linhas de ação:

- O estudo da estratificação da pluma do Rio Doce.

- A utilização de dados de correntes, marés, vento e vazão, medidos concomitantemente, para melhor calibração do modelo.
- Aplicação do modelo considerando taxas de decaimento e ressuspensão das partículas, baseando-se em dados medidos *in situ*.
- A modelagem considerando a influência do formato da foz na dinâmica da pluma do rio.
- A modelagem hidrodinâmica considerando a estratificação vertical nas simulações de distribuição da pluma do Rio Doce.
- A utilização de série histórica de registro de ventos levantados na região e com resolução temporal mais precisa.
- Desenvolvimento de metodologia de validação de modelos através de imagens de satélite.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALBINO, J. **Morfodinâmica e processo de sedimentação atual das praias de Bicanga à Povoação, ES.** São Paulo – SP, 1999. Tese de doutoramento. Programa de Pós- Graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo (USP).
- AMARAL, J. K. **Estuário do rio Macaé: Modelagem computacional como ferramenta para o gerenciamento integrado de recursos hídricos.** Rio de Janeiro, Brasil, 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do rio de Janeiro. COPPE/UFRJ.
- ANA - Agência Nacional das Águas. **Diagnóstico consolidado da Bacia hidrográfica do Rio Doce 2005.** 2005. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/Diagnostico2005>. Acessado em: 22 mar. de 2009.
- ARENTZ, M. F. R. **A Modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no Canal Norte do Estuário do Amazonas.** Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do rio de Janeiro. COPPE/UFRJ.
- BARBOSA, L. P. F. **Aplicação da Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do Rio Maracanã (do Pará).** Belém, Brasil, 2008. Dissertação de Mestrado em Geologia- Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Pará.
- BRASIL, Lei nº9433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acessado em: 22 mar. 2009.
- CAMPOS, A. P. M. **Análise da variabilidade espacial e temporal da pluma do rio doce (ES) através de sensoriamento remoto.** Vitória, Brasil, 2011. Dissertação de Mestrado em Oceanografia Ambiental- Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.
- CAWLEY, A., M.; HARTNETT, M. **Sensitivity od a 2-dimensional hydrodynamic model to boundary conditions.** Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters. Ed. R. A. Falconer. Ashgate, p.157-171, 1992.
- CHAPMAN, D.C.; LENTZ, S. J. **Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer.** J. Phys. Oceanogr., v.24, p.1464-1479, 1994.
- COELHO, A. L. N. C. **Alterações hidrogeomorfologia do médio-baixo Rio Doce.** Niterói, Brasil, 2007. Tese de Doutorado em Geografia da Universidade Federal Fluminense.
- COOPER, J. A. G. **The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour: contrasts between river- and tide-dominated microtidal estuaries.** Sedimentary Geology v.150 (2002), p. 123–137, 2001.

- DAVIS JR, R. A.; FITZGERALD, D. M. **Beaches and Coasts**. 1ª ed. Blackwell Publising. Reino Unido, 2004.
- DIAS, F. J. S. **Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE)**. Fortaleza, Brasil, 2007. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará.
- FEMAR- Fundação de Estudos do Mar. Catálogo de estações maregráficas brasileiras, Folha 159. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br>. Acessado em: 22 mar. 2009.
- FONG, D. M., GEYER, W. R. **The alongshore transport of freshwater in a surface trapped river plume**. Journal of Physical Oceanography, v.32, p.957–972, 2002.
- GARCIA BERDEAL, I.; HICKEY, B. M.; KAWASE, M. **Influence of wind stress and ambient flow on a high discharge river plume**. Journal of Geophysical Research, v.107 (C9), p.3130, 2002.
- GARVINE, R. W. **Penetration of buoyant coastal discharge onto the continental shelf: a numerical model experiment**. Journal of Physical Oceanography v.29, p.1892–1909, 1999.
- HOLZ, K. P.; SUNDERMANN, J. **Mathematical Modelling of Estuarine Physics**. 1ª ed., Editora Springer-Verlag. Berlin,1980.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.**Manual do Usuário do Catálogo de Imagens da DGI/INPE**. DPI/INPE, 2008.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.Catálogo de Imagens. Disponível em : <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acessado em: 2010.
- JAMES, I. D. **Modelling pollution dispersion, the ecosystem and water quality in coastal waters: a review**. Environmental Modelling & Software v.17, p. 363-385, 2002.
- KOWSMANN, R. O.; COSTA, M. A. **Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes**. In: Projeto REMAC - Sedimentologia quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. PETROBRÁS, Rio de Janeiro. Série Projeto REMAC, (8):1-55. 1979.
- KOURAFALOU, V. H.; OEY, L. Y.; LEE, T. N.; WANG, J. D. **The fate of river discharge on the continental shelf**. Modeling the river plume and the inner shelf coastal current. Journal of Geophysical Research, v.10, p.3415-3434 ,1996.
- LEITE, S. L. **Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guamaré-RN, Brasil**. Recife, Brasil, 2007. Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Pernambuco..
- LIU, W. B.; CHEN, W. B.; CHENG, R. T.; HSU, M. H. **Modelling the impact of wind stress and river discharge on Danshuei River Plume**. Applied Mathematical Modelling, v.32, p.1255-1280, 2008.
- LORENZZETTI, J. A.; NEGRI, E., KNOPERS, B.; MEDEIROS, P.R.P. **Uso de imagens LANDSAT como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais. São José dos Campos: INPE, 2007.

- Artigos, p. 3429-3436. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.21.18/doc/3429-3436.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2010.
- MANN, K. H.; LAZIER, J. R. N. **Dynamics of marine ecosystems : biological-physical interactions in the oceans**, 3ª edition. Blackwell Science, Boston, 2006.
- MARQUES, W. C.; FERNANDES, E.H.; MONTEIRO, I. O.; MOLLER, O. O. **Numerical modeling of Patos lagoon coastal plume**. Continental Shelf Research v.29 (2009), p. 556-571, 2009.
- MARTIN, L.; KENITIRO, S.; FLEXOR, J. M.; ARCHANJO, J. D. **Coastal Quaternary Formations of Southern part of the State of Espírito Santo (Brazil)**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 68, p. 389-404, 1996.
- MCCOY, R. M. **Field methods in remote sensing**. 1ª ed., Editora Guilford Press. Nova York, 2005.
- MESTRES, M.; SIERRA, J. P.; SANCHEZ-ARCILLA, A. **Factors influencing the spreading of a low-discharge river plume**. Continental Shelf Research v.27 (2007), p. 2116–2134, 2007.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**, 1ª ed., São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP, 2002.
- MILLERO, F. J. **Chemical Oceanography**. 3ª ed. Taylor & Frank Group. Nova Iorque, 2006.
- MUEHE, D. **Caracterização físico-natural da plataforma continental interna e área costeira adjacente**. Relatório Interno. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Brasília, 70p. , 1995.
- NCEP- National Centers for Environmental Predictions. **Reanalysis data. NOAA/OAR/ESRL PSD**, Colorado, EUA. Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> .Acessado em: 5 de nov. de 2010.
- NOGUEIRA, R. M. **Aspectos Hidrodinâmicos da lagoa dos patos na formação do depósito lamítico ao largo da praia de Cassino – RS**. Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.
- ODD,N. V. M.; MURPHY, D. G. **Experience ond recommended practice for the construction and objective calibration of coastal pollution models**. Hydraulic and Environmental Modelling: Coastal Waters. Ed. R. A. Falconer. Ashgate, p.229-239, 1992.
- O'DONNELL, J. **The formation and fate of a river plume: a numerical model**. Journal of Physical Oceanography v.20, p.551–569, 1990.
- PEREIRA,V. S. A. **Proposta de uma metodologia para análise de outorgas de uso da água em regiões sujeitas à influência de maré**. Rio de Janeiro, Brasil, 2006. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

- PETROBRAS- Petróleo Brasileiro S/A. **Subprojeto de Monitoramento da Morfodinâmica Praial da Região da Praia de Cacimbas sob Influência da Instalação do duto de Camarupim** - Relatório Final EIA/RIAM. Vitória, Brasil, 2010.
- PIUMBINI, P. P. **Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo**. Vitória, Brasil, 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEA/UFES.
- PRATA, P. M. **Caracterização do ambiente marinho do estado do Espírito Santo utilizando dados do banco nacional de dados oceanográficos**. Vitória, Brasil, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEA/UFES.
- ROSMAN, P. C. C. **MODELAÇÃO DE CIRCULAÇÃO EM CORPOS D'ÁGUA RASOS** – Capítulo 3 do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3, pp 231-343, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.
- ROSMAN, P. C. C.; MARTINS, R. P. **MODELO 3D PARA CORPOS DE ÁGUA COM DENSIDADE VARIÁVEL VIA DIFERENÇAS FINITAS** – Capítulo 3 do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 4, pp 187-264, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999.
- ROSMAN, P. C. C. **Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental**. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. *et al.*, *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5*, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.
- ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**. Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- SALDANHA, J. C. S. **Análise da influência do Rio Santa Maria da Vitória na Baía de Vitória, através da modelagem computacional: uma contribuição ao processo de enquadramento**. Vitória, Brasil, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEA/UFES.
- SIQUEIRA, J. M. **Estudo do mecanismo de alagamento e secamento em modelo computacional 2DH baseado em elementos finitos**. Vitória, Brasil, 2007. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, PPGEA/UFES.
- SILVA, A. C.; SANTOS, M. L. S.; ARAUJO, M. C.; BOURLÈS, B. **Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica** . ACTA AMAZONICA, vol. 39, p. 361 - 370, 2009.
- SIMINATO, C. G.; MECCIA, V. L.; DRAGANI, W. C.; NUNˆEZ, M. N. **On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Rio de La Plata estuary**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v.70, p.195–206, 2006.

- STACEY, M. T. **Plume dispersion in a stratified, near-coastal flow: measurements and modeling.** Continental Shelf Research, n.20, p.637-663, 1999.
- SUMMERHAYES, C. P.; MELO, U.; BARRETTO, H. T. **The influence of upwelling on suspended matter and shelf sediments off southeastern Brazil.** Jour. Sedimentary Petrology, v.6(4), p.819-828, 1976.
- TROCHIMCZUK, A.; SCHETTINI, C. A. F. **Avaliação da dispersão espacial da pluma do estuário do Rio Itajaí-açu em diferentes períodos de descarga.** Notas Técnicas Facimar, v.7, p. 83-96, 2003.
- WISEMAN, W.; GARVINE, R. W. **Plumes and coastal currents near large river mouths.** Estuaries, v.18 (3), p.509–517, 1995.
- WROBEL, L. C. **INTRODUÇÃO AOS MÉTODOS NUMÉRICOS** – Capítulo 1 do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 1, pp 1-81, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.
- XING, J.; DAVIES, A. M. **The effect of wind direction and mixing upon the spreading of a buoyant plume in a non-tidal regime.** Continental Shelf Research, v.19 (11), p.1437–1483, 1999.
- YANKOVSKY, A. E.; CHAPMAN, D.C. **A simple theory for the fate of buoyant coastal discharges.** J. Phys. Oceanogr., v.27, p.1386- 1401, 1997.
- YANKOVSKY, A. E.; HICKEY, B.; MUNCHOW, A. **Impact of variable inflow on the dynamics of a coastal buoyant plume.** Journal of Geophysical Research, v.106 (C9), p.19809–19824, 2001.
- ZOFFOLI, M. L.; KAMPEL, M.; FONSECA, L. M. G. **Caracterização da pluma de sedimentos do rio Doce (ES) utilizando dados TM –Landsat 5. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5025 INPE - São José dos Campos - SP, Brasil, 2011.