



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

Daniel Melo Martins de Góis

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE
ÓLEO NA ZONA COSTEIRA ENTRE MACAU E GALINHOS – RN**

Natal

2008

Daniel Melo Martins de Góis

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE
ÓLEO NA ZONA COSTEIRA ENTRE MACAU E GALINHOS – RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ada Cristina Scudelari

Co-orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

Natal

2008

DANIEL MELO MARTINS DE GÓIS

**ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA DISPERSÃO DE
ÓLEO NA ZONA COSTEIRA ENTRE MACAU E GALINHOS – RN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Ada Cristina Scudelari – Orientadora

Dr. Venerando Eustáquio Amaro – Co-orientador

Dra. Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha – Examinadora Externa UFPR

Dr. Moacyr Cunha de Araújo Filho – Examinador Externo UFPE

Natal, 04 de setembro de 2008

*“Ninguém tem amor maior do que aquele
que dá a sua vida pelos seus amigos.”*

João 15,13.

Dedico a todos os familiares e amigos que sempre acreditaram no meu potencial e nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Neste exato momento acabo de concluir meu trabalho com uma mistura de alegria e ansiedade ao mesmo tempo em que estou passando por um momento muito especial em minha vida, um momento de muitas mudanças. Mudanças essas nos campos pessoal, profissional, acadêmico e familiar.

Assim sendo não posso deixar de agradecer Àquele que nos fortalece a cada manhã, a cada instante ímpar do dia-a-dia de nossas vidas: DEUS. E junto a Ele sempre presente em minha caminhada também está ela: Nossa Senhora de Schoenstatt, a Mãe Peregrina.

Um agradecimento especial a minha família. Meu Pai que sempre foi exemplo de otimismo e fraternidade. Minha Mãe exemplo de amor, força e coragem. Minha irmã Marília exemplo de surpresa e bravura. Meu irmão André exemplo de serenidade e segurança. Minha irmã Juliana exemplo de silêncio e persistência. E minha irmã Beatriz exemplo de inocência e perdão.

Especial também é a minha companheira que sempre esteve ao meu lado nos melhores e nos mais difíceis anos da minha vida. Fernanda, ela que é a escada da minha subida, me fazendo enxergar que eu sempre posso ser mais do que eu imagino. Ela que é a espera na minha janela, mostrando que eu sempre posso mais do que eu simplesmente quero. À minha Linda todo meu amor, paixão, carinho e compreensão.

Agradeço a Veríssimo, um amigo especial, um irmão de coração (como poucos no mundo), um camarada que me conhece como ninguém, a quem eu guardo um carinho especial e que sempre me deu força e me encorajou muito na vida.

Ao LARHISA que me abriu as portas para a pesquisa acadêmica, em destaque à minha orientadora Ada Cristina Scudelari que abraçou minha idéia e a segurou até que este momento se concretizasse. Leonor que sempre esteve de portas e e-mails abertos, com um sorriso e um carinho enormes. Aos amigos de turma que concluíram essa caminhada meus parabéns, aos que desistiram por motivos diversos digo que continuem lutando sempre e espero EU, como último

integrante matriculado no mestrado, fechar esse ciclo com mais uma bela contribuição à UFRN.

A AECO/PEnO integrante da COPPE/UFRJ em nome do Prof. Dr. Paulo Cesar Collona Rosman que mais que um professor, foi um instrutor, um treinador, um orientador, um mestre e um exemplo de vontade de compartilhar seu conhecimento com paciência e sabedoria, os quais eu tive oportunidade de receber. À Mestre Valéria Nunes Oliveira que me ensinou os primeiros passos na modelagem computacional e que foi meu suporte por todo o período de estudo e pesquisa, tirando minhas dúvidas e me mostrando as saídas. À Patrícia Auler Rosman e ao colega Gustavo Spiegelberg que lá no Rio me ajudaram e me deram forças para seguir modelando. A todos vocês 'cariocas' que me tiraram do aperto, meus agradecimentos.

Não posso esquecer os que me receberam, também abraçaram minha idéia e me rechearam de dados, fontes e outros estudos na minha área de pesquisa. Os professores Doutores em Geologia da UFRN, Venerando Eustáquio Amaro meu co-orientador e Helenice Vital e ao amigo e professor Mestre do CEFET/RN, Leão Xavier da Costa Neto que se colocaram a minha inteira disposição nos momentos que precisei.

A cada um dos acima citados e a todos os outros não aqui descritos, mas não por mim esquecidos meu muitíssimo obrigado.

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a hidrodinâmica costeira e a dispersão da nuvem contaminante de óleo na região frontal a Macau e Galinhos, no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte no Nordeste do Brasil. Essa região apresenta uma dinâmica costeira muito acentuada devido a uma complexidade em suas feições geomorfológicas, desenvolvidas em regime de mesomarés semidiurnas, que apresenta praias, recifes, *spit*, estuários, mangues, lagoas e dunas. A região também possui um papel importante no desenvolvimento sócio-econômico do Estado, por concentrar a produção de petróleo e gás natural, sal e, mais recentemente, a carcinicultura.

O conjunto de plataformas petrolíferas é interligado por dutos que levam o óleo para o Pólo Petrolífero localizado na região e que podem a qualquer instante apresentar um vazamento que pode tomar proporções de grande estrago ecológico.

Para que os riscos de vazamento e contaminação da região praial fossem levantados, dois cenários hidrodinâmicos foram simulados. Os resultados obtidos foram utilizados na implementação de um modelo de transporte de contaminantes com a criação de vários cenários de vazamentos modelados em diferentes volumes (de pequeno e grande porte) e intensidades (pontuais e contínuos), em pontos tomados como críticos para o modelo (em duas plataformas e em duas interseções de dutos), em diversas condições de ventos (verão e inverno) e marés (preamar e baixamar de sizígia e de quadratura).

A utilização de modelos computacionais de circulação hidrodinâmica como ferramenta para a representação de uma situação real de projeto tem sido cada vez mais freqüente nos últimos anos, visto que eles possibilitam a simulação, com bastante realismo, do padrão de circulação hidrodinâmica em corpos d'água e analisam os impactos causados por lançamentos de contaminantes na água. Neste trabalho utilizou-se os modelos computacionais contidos no SisBAHIA[®], em desenvolvimento continuado na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ.

PALAVRAS-CHAVE: Circulação Hidrodinâmica, Derrame de Óleo, SisBAHIA[®].

ABSTRACT

This paper presents a study on coastal hydrodynamics and the spread of an oil spill in waters off Macau and Galinhos, on the east coast of the state of Rio Grande do Norte in Northeast Brazil. This area has a very marked coastal dynamic owing to the complexity of its geomorphological features, developed in a regime of semidiurnal mesotides involving reefs, spits, estuaries, mangroves, lakes and dunes. The region also plays an important role in the socioeconomic development of the state, given that the production of oil, natural gas, salt and shrimp is concentrated there.

The series of oil platforms is interconnected by a pipeline system that carries oil to the local terminal. This pipeline could leak at any moment, causing immense ecological damage.

To gauge the risks of an oil leak and resulting contamination of the coastal region, two hydrodynamic scenarios were simulated. The results obtained were used to implement a contaminant transport model with the creation of various oil leak scenarios modeled at different volumes (from small to large) and intensities (sporadic and continuous), at points considered critical for the model (on two platforms and at two pipeline intersections), under different wind (summer and winter) and tidal (high and low at new, full and quarter moon phases) conditions.

The use of hydrodynamic circulation computer models as a tool for representing a real project design has been increasingly frequent in recent years, given that they enable the realistic simulation of the hydrodynamic circulation pattern in bodies of water and an analysis of the impacts caused by contaminants released into the water. This study used the computer models contained in SisBAHIA®, in continuous development in the area of Coastal Engineering and Oceanography at COPPE/UFRJ.

KEYWORDS: Hydrodynamic Circulation, Oil Leak, SisBAHIA®.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Localização da área de estudos no Litoral Setentrional do RN.	02
FIGURA 2.1 – Mapa de localização.	06
FIGURA 2.2 – Imagem de sensoriamento remoto para a área de estudo. Plataforma Continental do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte.	07
FIGURA 2.3 – Variação do nível de marés.	10
FIGURA 2.4 – Direção dos ventos na micro-região Macau.	11
FIGURA 2.5 – Velocidade dos ventos medida em Guamaré–RN ao longo do ano, no período de janeiro de 1993 a abril de 1995.	12
FIGURA 2.6 – Floresta de manguezal típico da micro-região Macau.	13
FIGURA 2.7 – Relevo da região da área de estudo.	15
FIGURA 2.8 – Localização da área no contexto da bacia Potiguar.	16
FIGURA 2.9 – Bacias hidrográficas do RN.	19
FIGURA 2.10 – Balanço hídrico para a micro-região Macau.	21
FIGURA 3.1 – Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i representa a velocidade promediada na vertical. Note que as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$ e $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$ utilizando o índice $i = 1, 2$.	31
FIGURA 4.1 – Carta Náutica nº 720 – DE AREIA BRANCA A GUAMARÉ.	39
FIGURA 4.2 – Digitalização do contorno.	40
FIGURA 4.3 – Malha de discretização em elementos finitos da região costeira de Macau e Guamaré, com detalhamento na região onde os vazamentos de óleo podem ocorrer - os dutos -, composta de 728 elementos finitos biquadráticos e 3034 nós no plano horizontal e 21 níveis verticais.	41
FIGURA 4.4 – Batimetria do fundo do domínio de modelagem da região costeira de Macau e Guamaré como vista pelo modelo.	43
FIGURA 4.5 – Amplitude da rugosidade relativa do fundo da região costeira de Macau e Guamaré a partir da interpolação realizada pelo modelo.	45

- FIGURA 4.6 – Curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Guamaré operada pela DHN, podendo observar as marés de sizígia e de quadratura para o período de um mês 48
- FIGURA 4.7 – Direção e intensidade do vento no mês de janeiro de 2005, representando o vento de verão para a simulação, considerando vento dominante. Percebe-se que os ventos mais fortes ocorrem no horário da tarde na direção NE, com ventos de SE mais fracos no período da madrugada. 50
- FIGURA 4.8 – Direção e intensidade do vento no mês de junho de 2005, representando o vento de inverno para a simulação, considerando vento reinante. Percebe-se que os ventos da madrugada são quase inexistentes, e que os ventos da tarde não apresentam praticamente mudança de direção. 51
- FIGURA 5.1 – Curvas de decaimento dos óleos geradas pelo ADIOS2 e utilizados nas simulações. 57
- FIGURA 6.1 – Elevação da preamar de sizígia de verão 3D com vento dominante de NE. 60
- FIGURA 6.2 – Elevação da preamar de sizígia de inverno 3D com vento de SE. 61
- FIGURA 6.3 – Elevação da baixamar de quadratura de verão 3D com vento dominante de NE. 62
- FIGURA 6.4 – Elevação da baixamar de quadratura de inverno 3D com vento de SE. 63
- FIGURA 6.5 – Vetores de velocidades das preamares de sizígia de verão e de inverno na primeira camada abaixo da superfície. 66
- FIGURA 6.6 – Vetores de velocidades das baixamares de quadratura de verão e de inverno na primeira camada abaixo da superfície. 67
- FIGURA 6.7 – Cenário 4 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **8m³** (20 minutos) na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 73
- FIGURA 6.8 – Cenário 6 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 73
- FIGURA 6.9 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 74

- FIGURA 6.10 – Cenário 10 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **8m³** (20 minutos) em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 75
- FIGURA 6.11 – Cenário 12 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 75
- FIGURA 6.12 – Cenário 14 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 76
- FIGURA 6.13 – Cenário 16 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) em um duto a **15 km** da costa com ventos de **verão**. 77
- FIGURA 6.14 – Cenário 18 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos em um duto a **15 km** da costa com ventos de **verão**. 77
- FIGURA 6.15 – Cenário 20 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) na plataforma a **25 km** da costa com ventos de **verão**. 78
- FIGURA 6.16 – Cenário 22 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos na plataforma a **25 km** da costa com ventos de **verão**. 78
- FIGURA 6.17 – Cenário 4 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **8m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 80
- FIGURA 6.18 – Cenário 6 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 80
- FIGURA 6.19 – Cenário 8 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **contínuo** de **200m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**. 81
- FIGURA 6.20 – Cenário 10 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **8m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 82
- FIGURA 6.21 – Cenário 12 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 82
- FIGURA 6.22 – Cenário 14 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **contínuo** de **200m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**. 83

FIGURA 6.23 – Cenário 16 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame instantâneo de 200m³ a 15 km da costa com ventos de verão .	84
FIGURA 6.24 – Cenário 18 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame contínuo de 200m³ a 15 km da costa com ventos de verão .	84
FIGURA 6.25 – Cenário 20 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame instantâneo de 200m³ a 25 km da costa com ventos de verão .	85
FIGURA 6.26 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 01 hora .	86
FIGURA 6.27 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 12 horas .	86
FIGURA 6.28 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 24 horas .	87
FIGURA 6.29 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 36 horas .	87
FIGURA 6.30 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 60 horas .	87
FIGURA 6.31 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 96 horas .	88
FIGURA 6.32 – Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 132 horas .	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Densidade demográfica dos municípios da micro-região Macau.	24
TABELA 2.2 – Rendimento financeiro da população da micro-região Macau.	25
TABELA 4.1 – Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo (ϵ).	44
TABELA 4.2 – Amplitude da rugosidade equivalente de fundo para a região em estudo.	46
TABELA 4.3 – Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Guamaré, adaptadas à linha de praia.	47
TABELA 5.1 – Cenários de simulação para o Modelo de Transporte Lagrangeano.	54
TABELA 5.2 – Tipos de derrames e suas fontes. Vale observar que para cada fonte foi simulado para ventos de verão e de inverno, com óleos leves e pesados.	55
TABELA 5.3 – Tipos de óleos utilizados para a simulação dos cenários.	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 – APRESENTAÇÃO	1
1.2 – OBJETIVOS.....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
2.1 – INTRODUÇÃO.....	5
2.2 – LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO	5
2.3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-AMBIENTAL	7
2.3.1 – Micro-região Macau.....	7
2.3.2 – Plataforma Continental.....	21
2.4 – BIOTA.....	24
2.5 – SOCIOECONOMIA.....	24
3. SISTEMA DE MODELAGEM APLICADO	27
3.1 – A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO AMBIENTAL.....	27
3.2 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS.....	28
3.3 – MODELO DE CIRCULAÇÃO 3D PARA CORPOS D'ÁGUA RASOS COM DENSIDADE HOMOGÊNEA	29
3.3.1 – Descrição do Modelo Implementado no SisBAHIA®	29
3.3.2 – Resumo das Equações Governantes.....	30
3.3.3 – Estratégia Numérica.....	33
3.3.4 – Condições Iniciais e de Contorno.....	34
3.4 – MODELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DA PLUMA CONTAMINANTE	34
3.4.1 – Descrição do Modelo Implementado no SisBAHIA®	34
3.4.2 – Resumo das Equações Governantes.....	35

3.4.3 – Condições de Contorno.....	36
4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	38
4.1 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	38
4.2 – DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO	39
4.3 – DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....	40
4.4 – BATIMETRIA	42
4.5 – TIPO DE FUNDO E RUGOSIDADE EQUIVALENTE	44
4.6 – MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA E DO AR	46
4.7 – MARÉS	46
4.8 – VENTOS	48
4.9 – CONDIÇÕES DE CONTORNO	49
4.10 – CONDIÇÕES INICIAIS	52
5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO.....	53
5.1 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO	53
5.2 – CONDIÇÕES INICIAIS	54
5.3 – CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO FONTE.....	54
5.4 – CURVA DE DECAIMENTO DO ÓLEO	56
6. RESULTADOS	58
6.1 – MODELO HIDRODINÂMICO	58
6.1.1 – Elevação do Nível do Mar	59
6.1.2 – Correntes	65
6.2 – MODELO DE TRANSPORTE DE PLUMAS CONTAMINANTES	68
6.2.1 – Critérios de Limites para a Apresentação dos Resultados.....	70
6.2.2 – Resultados da Modelagem Probabilística	72
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7.1 – Conclusões	89

7.2 – Recomendações.....	93
REFERÊNCIAS.....	94

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 – APRESENTAÇÃO

A zona costeira brasileira compreende uma faixa de 8.698 km de extensão e de largura variável. Este litoral tão expressivo contempla um conjunto de ecossistemas contíguos sobre uma área de aproximadamente 324 mil km². Abrange tanto uma área terrestre, como uma área marinha (que corresponde ao mar territorial brasileiro), com uma largura de 22,2 km (12 milhas náuticas) a partir da linha de costa. Nessa faixa, destaca-se que das dezessete capitais dos estados litorâneos, treze delas situam-se a beira-mar, o que concentra quase um quarto da população do País, atingindo uma densidade média de 121 hab/km² (seis vezes superior a média nacional que é de 20 hab/km²) (MMA, 2006). Em 2006 as atividades econômicas existentes na zona costeira do Brasil foram responsáveis por cerca de 70% do PIB nacional (MMA, 2006).

O contraste na zona costeira brasileira é evidente, uma vez que nessa região são encontradas áreas onde incidem intensa urbanização, atividades portuárias e industriais relevantes, além da exploração turística em larga escala, gerando quadros problemáticos do ponto de vista da gestão ambiental, fazendo-se necessária a aplicação de ações de caráter corretivo. Por outro lado, ainda encontram-se áreas de baixa densidade de ocupação e ocorrência de ecossistemas de grande significado ambiental que vêm sendo objeto de acelerado processo de ocupação, demandando ações preventivas.

A micro-região de Macau (área de estudo desse trabalho) que compreende os municípios de Macau, Galinhos, Guamaré, São Bento do Norte e Caiçara do Norte, está localizada no nordeste do Brasil, mais especificamente no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1.1). Esta região está em total concordância com todo o litoral brasileiro, pois além de ser uma área de grandes belezas naturais, possui um importante papel no desenvolvimento sócio-econômico do Estado proveniente dos recursos naturais lá encontrados. Nela existem várias atividades geradoras de conflitos ambientais como as indústrias salineira e de carcinicultura, além do pólo industrial petrolífero de Guamaré.

A região em estudo é a maior produtora de sal do País e ocupa o primeiro lugar nacional na produção de petróleo em terra e o segundo no mar (IBGE, 2006) e está situada dentro da bacia petrolífera Potiguar, onde existe um pólo petrolífero (Pólo Petrolífero de Guamaré) constituído por poços terrestres, poços marinhos, sistemas de sucção e bombeamento e dutos.

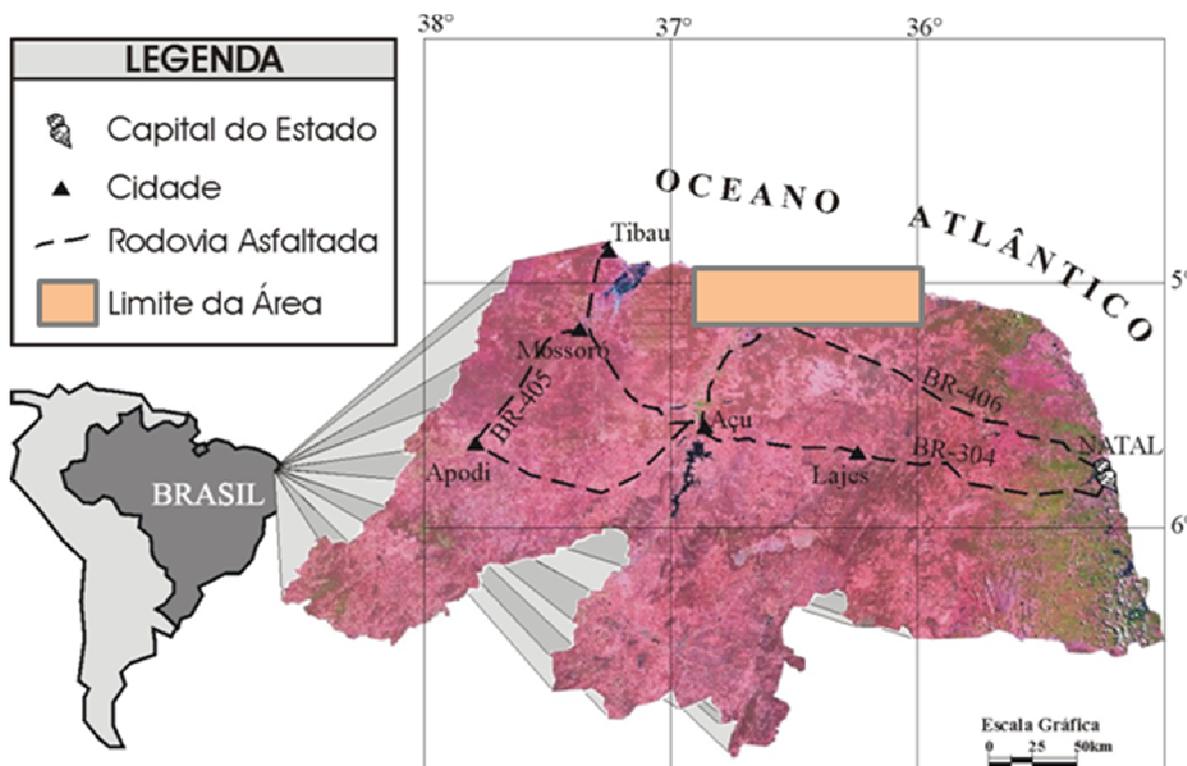


Figura 1.1: Localização da área de estudos no Litoral Setentrional do RN.

Somada às atividades sócio-econômicas locais, a micro-região Macau é marcada por uma intensa dinâmica costeira estando inserida numa zona caracterizada por várias feições morfológicas tais como estuário, planície de maré, terraços flúvio-marinhos, barras arenosas, dunas e superfícies de aplainamento, que são modeladas continuamente pela atuação conjunta de ventos, ondas, correntes, entre outros relacionados com as variações do nível do mar e variações climáticas globais. A complexidade nas formas do substrato marinho, como mostrou o levantamento batimétrico dessa região, revelou uma área de grande extensão com baixa declividade e com a presença de dunas subaquosas lineares longitudinais que atribuem uma forte irregularidade nas formas de fundo.

Para o meio ambiente o petróleo é uma constante ameaça devido ao seu poder de contaminação, uma vez que os danos ambientais causados com seus derramamentos ocorrem sempre em escalas devastadoras. Considerando ainda a existência de manguezais nessa região, de um estuário em delta complexo, que é um berçário natural, e de vários canais de maré, a região apresenta uma fragilidade ambiental natural elevada que a mantém em constante risco.

Dessa forma, a área vem sendo objeto de vários estudos que tentam contribuir para o entendimento dos processos costeiros presentes na região que são responsáveis pelas modificações verificadas no meio ambiente.

Do ponto de vista geodinâmico, estes estudos vêm sendo realizados por vários autores desde 1990. Dos trabalhos desenvolvidos na área, pode-se destacar: Costa Neto (1997), Silveira (2002), Tabosa (2002), Vital (2004), Vital *et al.* (2004 e 2005), Stattegger *et al.* (2004), Grígio *et al.* (2004, 2005 e 2006), Lima (2004), Souto (2004), Castro *et al.* (2006), Silveira *et al.* (2006), Souto *et al.* (2006), Souza (2006), entre outros. Os estudos já realizados identificam uma forte influência hidrodinâmica nos processos costeiros vigentes, apontando, assim, para a necessidade do conhecimento da circulação hidrodinâmica da área, bem como dos forçantes hidrodinâmicos (ondas, ventos, correntes e marés).

A utilização de modelos computacionais para simulação dos padrões de circulação hidrodinâmica e de qualidade de água tem se tornado, cada vez mais, uma importante ferramenta para estudos ambientais em águas costeiras, estuários, lagoas, lagoas, baías e reservatórios. O conceito de modelagem faz uso de aproximações que simplificam o fenômeno estudado à escala de interesse do objeto de estudo, frente a extrema complexidade dos sistemas naturais.

1.2 – OBJETIVOS

No estudo em questão foi realizada a implementação dos modelos de circulação hidrodinâmica e de transporte de escalares do SisBAHIA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, desenvolvido pela COPPE/RJ, com cenários de simulações de derrames de óleo em um domínio de aproximadamente 100 km de linha de costa e 40 km mar adentro na faixa litorânea setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, área da Bacia Potiguar.

Com o objetivo de prevenir e minimizar os efeitos de acidentes com derrames de óleo, levando a possibilidade de se realizar efetivos planos de contingência, este trabalho pretende, utilizando modelos computacionais, apresentar uma descrição detalhada da circulação hidrodinâmica e do transporte de contaminantes (por óleo) na zona costeira frontal à micro-região Macau. Além de avaliar os efeitos da evolução da mancha de óleo (leves e pesados) e as potenciais zonas de contaminação, considerando as situações de correntes geradas por maré com ventos típicos de verão e de inverno para os períodos de sizígia e quadratura.

Em resumo, os principais objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Apresentar os padrões típicos de circulação hidrodinâmica na área das plataformas petrolíferas e dos dutos de petróleo, para os seguintes cenários:
 - Cenário 1: Padrões de correntes gerados pela maré astronômica (sizígia e quadratura) com vento típico de verão;
 - Cenário 2: Padrões de correntes gerados pela maré astronômica (sizígia e quadratura) com vento típico de inverno.
- Estudar as plumas de contaminantes formadas por óleos leve e pesado proveniente de duas plataformas distantes 3 km e 25 km da praia e de dois dutos distantes 5 km e 15 km da praia, com vazamentos instantâneos de pequeno e grande portes além de um vazamento contínuo. Os resultados apresentados correspondem às plumas de contaminação obtidas sob as condições hidrodinâmicas acima descritas.

Em seqüência a este Capítulo 1, a dissertação se desenvolve com o Capítulo 2 que apresenta e caracteriza a área de estudo, considerando aspectos como localização, características físico-ambientais, biológicas e sócio-econômicas.

O sistema de modelagem aplicado é apresentado no Capítulo 3, abordando a importância da modelagem como ferramenta para a gestão ambiental, a descrição do modelo com suas equações governantes, condições iniciais e de contorno.

Os Capítulos 4 e 5 trazem em detalhes a implementação do SisBAHIA[®] no modelo hidrodinâmico e no modelo de transporte de escalares respectivamente. Os cenários simulados e as análises dos resultados obtidos a partir desses cenários serão apresentados no Capítulo 6.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações deste estudo.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente capítulo descreve a área de estudo com informações sobre a caracterização físico-ambiental da mesma, bem como as características biológicas e sócio-econômicas.

2.1 – INTRODUÇÃO

A área em estudo pertence a uma paisagem litorânea recente, localizada no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte e também é conhecida como a Costa Branca do RN. Segundo SOUTO (2004), a mesma é caracterizada pela intensa ação dos processos costeiros, o que ocasiona uma intensa mudança da linha de costa ao longo do tempo. A região ainda apresenta um potencial de riquezas naturais como o petróleo, sal, gás natural, gerando uma intensa atividade petrolífera e da indústria salinera. Mais recentemente a região apresenta a prática da carcinicultura.

2.2 – LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO

Inserida na Plataforma Continental da Bacia Potiguar, a área de estudo é limitada a extremo oeste pela Ponta do Mel no município de Areia Branca, com coordenadas $4^{\circ} 57,2' S$ e $36^{\circ} 53,2' W$, passando pelos municípios de Macau, Guamaré e Galinhos e limitada a extremo leste pela Ponta de Santo Alberto no município de São Bento do Norte, com coordenadas $5^{\circ} 03,0' S$ e $36^{\circ} 00,0' W$. Compreende aproximadamente 110 km de linha de praia, estendendo-se por aproximadamente 40 km para norte da plataforma continental (Figura 2.1).

Segundo TABOSA (2002), a região compreendida pelos municípios de Macau, Guamaré, Galinhos, São Bento do Norte e Caiçara do Norte é conhecida como micro-região Macau, a qual será feita referência durante todo o texto. A Bacia Potiguar apresenta uma área de 48.000 km², sendo 21.000 km² na porção emersa e 27.000 km² na porção submersa (plataforma e talude continentais) até a isóbata de 2.000 m (Costa Neto, 1997).

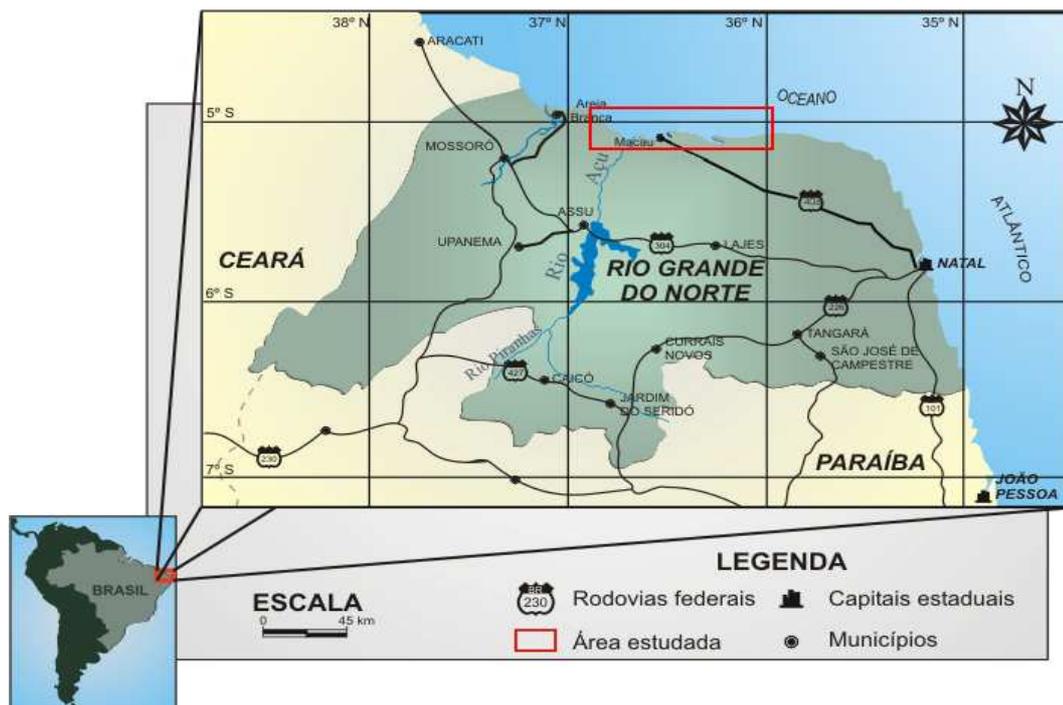


Figura 2.1: Mapa de localização. Adaptado de Souza (2006).

A micro-região Macaú apresenta uma complexidade em suas feições geomorfológicas, desenvolvidas em regime de mesomares semidiurnas, apresenta praias, recifes, *spit*, estuários, mangues, lagoas e dunas (adaptado de Souto, 2006).

Observando a Figura 2.2, a seguir, pode-se identificar na porção emersa da quebra da plataforma na parte superior da fotografia (em coloração preta); a oeste, a existência de um paleocanal do Rio Açu ou Piranhas (definido pela coloração mais escura que vai da foz do rio até a quebra da plataforma); a presença de dunas subaquosas (ao centro, próximo a linha de praia); a existência de recifes próximos e paralelos a quebra da plataforma; e de uma elevação abrupta do fundo no extremo leste da área estudada (em tom de branco); além de uma marcante deriva litorânea responsável por transportar os sedimentos de leste para oeste, gerando intensos processos de erosão e deposição ao longo da área de estudo (Souto, 2006). Vale ressaltar que a área de estudo compreende também a plataforma petrolífera de Macaú.

A Figura 2.2, a seguir, é uma imagem RGB321 LANDSAT 7ETM+ (WRS 215/064, adquirida em 12 de junho de 2000, com a baixamar às 7:41h/AM e com a passagem do satélite às 10:00 h/AM).

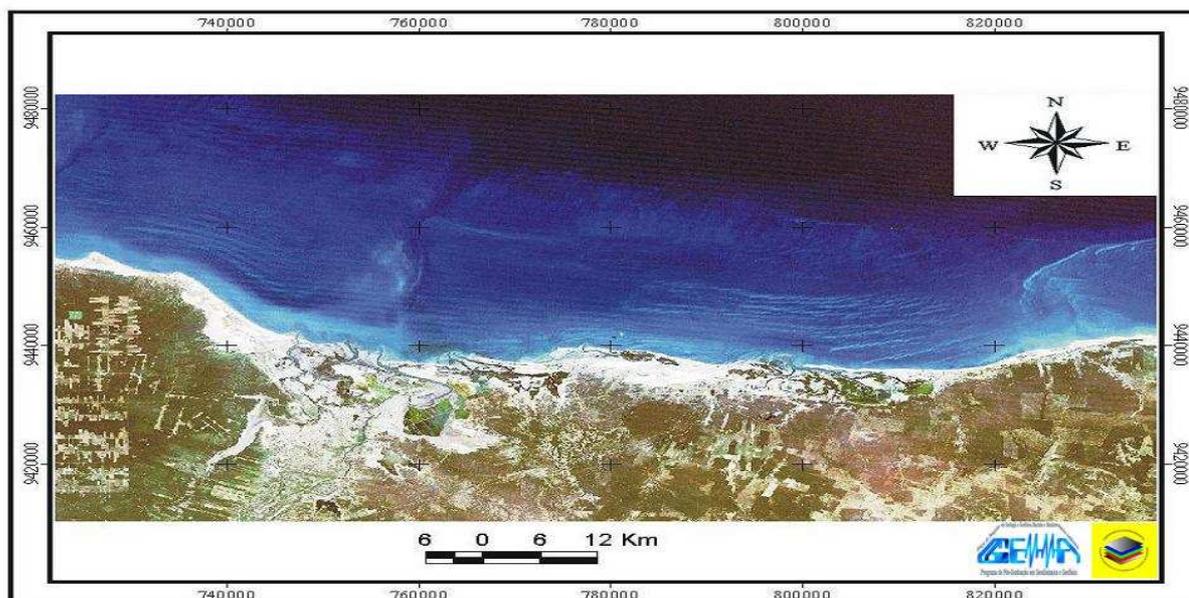


Figura 2.2: Imagem de sensoriamento remoto para a área de estudo. Plataforma Continental do litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte.

Fonte: Grupo de Pesquisa em Ciência do Mar e Ambientais da UFRN.

2.3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-AMBIENTAL

A zona costeira constitui uma área de transição entre o continente e o oceano, onde se concentra um grande número de atividades fundamentais ao homem, relacionadas a fatores sócio-econômicos e de qualidade de vida. Essas atividades normalmente situam-se em compartimentos geomorfológicos de estrutura frágil diante das intervenções antrópicas, devido a sua complexidade ambiental, onde atuam conjuntamente vários elementos naturais, tais como: ventos, ondas, correntes, precipitações pluviométricas, marés, insolação, evaporação, erosão e deposição, entre outros.

2.3.1 – MICRO-REGIÃO MACAU

A área de estudo está inserida nos domínios da região Nordeste do Brasil – que representa cerca de 18,26% do território nacional e que a maior parte dessa região é constituída por extensas planícies, com particularidades físicas variadas (clima, relevo, vegetação e hidrografia), condições estas realçadas de acordo com cada ambiente de domínio – no litoral setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. Esta área encontra-se alojada nos domínios da meso-região central do RN e na área

de influência da micro-região Macau. A micro-região Macau possui uma população estimada de 322.048 habitantes, distribuída pelos municípios de Macau, Guamaré, Galinhos, São Bento do Norte e Caiçara do Norte (Tabosa, 2002).

Esta micro-região possui um papel importante no desenvolvimento sócio-econômico do Estado, por concentrar boa parte da economia, como a produção de petróleo e gás natural, consolidando-se como uma região de Pólo Petrolífero, e origem de praticamente todo o sal produzido e comercializado no Estado, daí estar compreendida pelo grande projeto Pólo Gás-Sal e, mais recentemente, com a implantação da atividade de carcinicultura.

Para um melhor entendimento da dinâmica costeira da micro-região Macau e entorno, são apresentados a seguir alguns aspectos ambientais referentes aos meios físico, biótico e socioeconômico da região.

2.3.1.1 – CLIMA E METEOROLOGIA

A micro-região está inserida no contexto de um clima muito quente e semi-árido, onde se pode observar duas estações pluviométricas bem definidas: um período seco, de maior duração, que se estende de julho a janeiro quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se afasta da costa, provocando a ausência de chuvas e surgimento de ventos mais fortes; e uma estação chuvosa, que se estende de fevereiro a junho (sendo que sua maior incidência ocorre nos meses de março e abril), que está associada com o deslocamento para sul da ZCIT e formação de ventos mais brandos.

A pluviometria anual é baixa e irregular, alcançando um máximo anual de 1.639,8 mm e um mínimo anual de 246,9 mm, atingindo uma média anual de aproximadamente 693,7 mm/ano (Souto, 2004).

A temperatura é amena com oscilações em torno de 27,2 °C de média anual, atingindo nos meses mais quentes, temperaturas em torno dos 32,5 °C, enquanto que nos meses mais frios as temperaturas chegam a 21,0 °C. Segundo SILVEIRA (2002), essa pequena amplitude anual das variações térmicas deve-se a fatores como a baixa de latitude local, a amplitude e a influência de massas d'água oceânicas. A amplitude térmica diária normalmente está entre 8° e 10°C. A umidade relativa do

ar na região é normalmente de 68% e a insolação anual varia entre 2400 e 2700 horas/ano (IDEMA, 2006).

2.3.1.2 – PROCESSOS COSTEIROS

2.3.1.2.1 – Correntes Litorâneas

O litoral setentrional do Rio Grande do Norte apresenta uma importante corrente de deriva litorânea (*longshore drift*) na direção oeste. Segundo GRIGIO (2003), essas correntes marinhas formam-se em resposta à ação combinada entre a orientação preferencial E–W da linha de costa, a direção preferencial dos ventos E–SE e ao fluxo de ondas provenientes de NE–E. GRIGIO (2003) ainda afirma que na plataforma externa norte do Rio Grande do Norte, a Corrente Norte do Brasil, um ramo da Corrente Equatorial Sul, alcança velocidades superiores a 2,3 m/s para W.

Alguns trabalhos sugerem que a direção predominante desta corrente de deriva litorânea é caracterizada pela direção E–W devido à migração para W dos pontais arenosos costeiros (*spits*) e canais de maré (*inlets*), assim como pela construção e migração de E para W de bancos submarinos no assoalho da plataforma continental da costa NE (Grigio, 2003).

Segundo COSTA NETO (1997), as correntes medidas em seis estações ao largo do delta do rio Açu, mostraram velocidades em torno de 0,30 a 0,40 m/s, podendo atingir até 0,60 m/s. As direções predominantes são SSW (correntes convergentes à costa) e WSW, NNW, N e NNE (correntes não convergentes e paralelas à costa). A localização das estações e a grande variação nas suas direções caracterizam tais correntes como produzidas pelo efeito conjugado das marés e ventos. Durante a mudança das marés predominam várias correntes paralelas a costa (WSW). Em Galinhos–Guamaré, as correntes superficiais apresentaram velocidades médias de 0,51 m/s a 0,77 m/s para W.

2.3.1.2.2 – Marés

A hidrografia do litoral Norte Potiguar é fundamentalmente controlada pelas marés, com variações entre preamar e baixamar, alcançando a máxima de 330,00 cm e a mínima de 90,00 cm (IDEMA 2006).

Medições realizadas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil) na estação de Pontal do Alagamar, em Macau, mostra que a região apresenta uma maré do tipo semi-diurna, com desigualdade diária, cuja cota média é de 133,10 cm, com a cota média da maré de sizígia de 284,55 cm e a cota média da maré de quadratura de 220,54 cm. As amplitudes das marés de sizígia e quadratura são respectivamente 255,85 cm e 127,79 cm (Figura 2.3). Estas características de maré enquadram a região num regime de mesomarés.

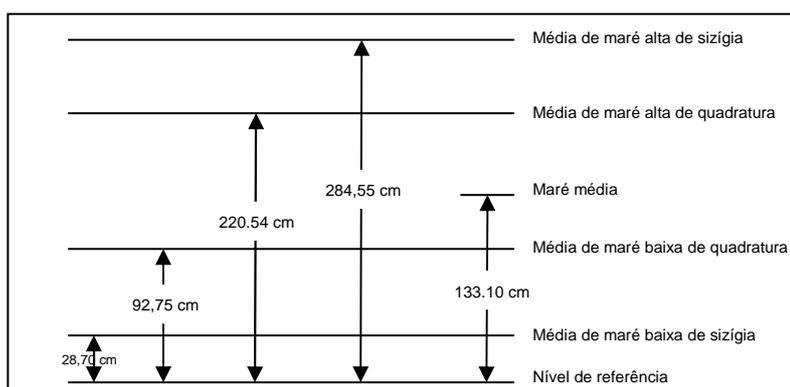


Figura 2.3: Variação do nível de marés. Onde o NR é o existente na Carta Náutica Nº 702.

Fonte: DHN - Porto de Macau.

2.3.1.2.3 – Regime de Ventos

No litoral norte do Estado do Rio Grande do Norte, mais precisamente na micro-região Macau, os ventos sopram de E (entre os meses de setembro a abril) e NE (entre os meses de abril a setembro), como é evidenciado pela direção de deslocamento das dunas eólicas costeiras (Figura 2.4). Do verão ao outono, existe uma convergência dos ventos alísios originários dos hemisférios Norte e Sul, devido à proximidade do litoral da Zona de Convergência Intertropical. A partir do final do outono, a atuação do Anticiclone do Atlântico Sul na região marca o término da estação chuvosa na região e torna os ventos de SE importantes no período de maio a agosto (Grigio, 2003).

FORTES (1987) mapeou a orientação das dunas costeiras no litoral do Rio Grande do Norte e observou uma tendência de E–NE na porção norte do estado (A oeste do Cabo do Calcanhar), enquanto que a leste do Cabo do Calcanhar, onde a linha de costa é orientada N–S, as dunas costeiras mostram orientação SE–NW.

A velocidade dos ventos medidas na Estação Meteorológica de Macau (NATRONTEC/ECOPLAN, 1995. Fonte: DNMET) no período de 1961 a 1990, é maior durante o verão, com máxima de 8,5 m/s no mês de outubro e menor durante o inverno, com mínima de 0,7 m/s no mês de abril.

Segundo COSTA NETO (1997), medições da direção do vento em Galinhos–Guamaré realizadas pela Petrobrás–RN, entre janeiro de 1993 e abril de 1995, mostrou que os ventos de NE são freqüentes durante o inverno, mas que ao longo do ano, também são encontrados ventos de SE e E, não havendo grandes variações na distribuição sazonal das direções, ocorrendo apenas mudanças nas freqüências. A Figura 2.5 mostra a direção dos ventos medida em Guamaré–RN (Petrobrás, Atividade Marítima do E&P RN/CE) ao longo do ano, no período de janeiro de 1993 a abril de 1995 na Estação Meteorológica de Macau – DNMET (1995).

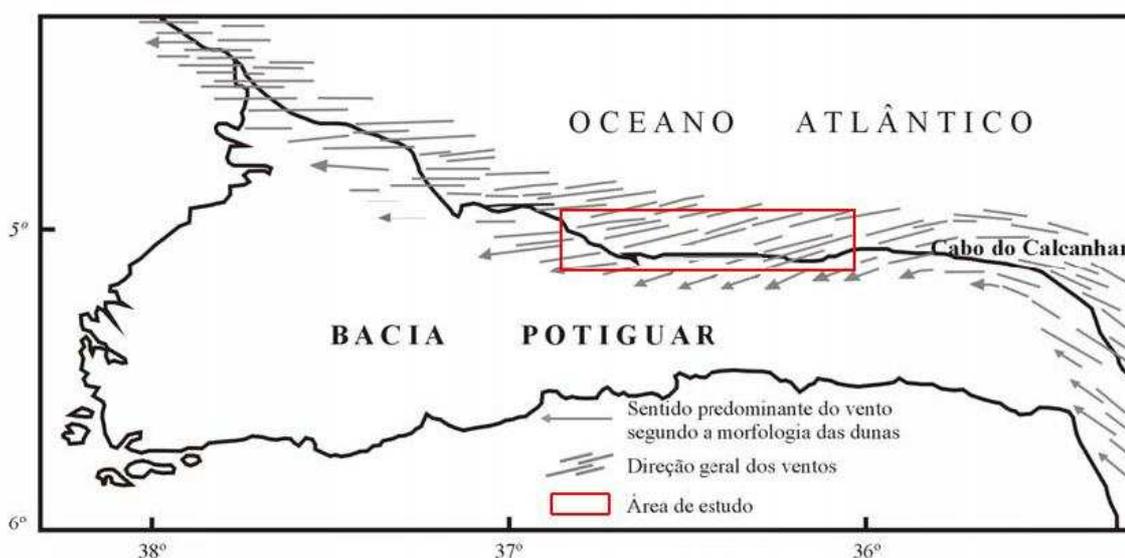


Figura 2.4: Direção dos ventos na micro-região Macau. Fonte: Grigio (2003).

Medições realizadas em São Bento do Norte e na região de Galinhos–Guamaré obtiveram, respectivamente, velocidades médias de 6,2 m/s (NATRONTEC/ECOPLAN 1995, Costa Neto 1997, Tabosa 2000, Silveira 2002), provenientes, sobretudo, de E entre os meses de agosto a abril, e de NE, nos meses de maio a julho. Nos meses de março a junho, os ventos apresentam-se mais brandos, com uma média mensal de 4,8 m/s, enquanto nos meses de agosto a dezembro, os ventos são mais fortes, podendo atingir até 9,0 m/s. obtendo uma velocidade média anual dos ventos de 5,7 m/s.

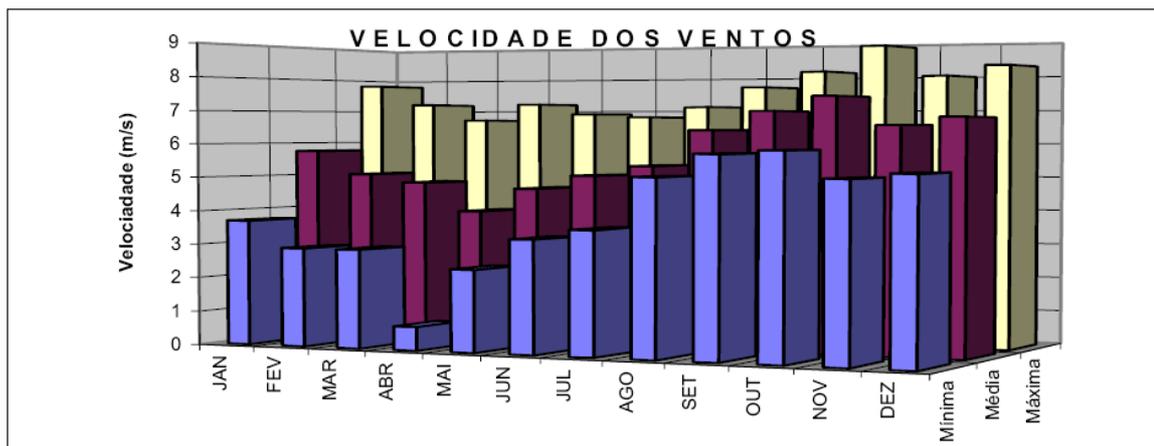


Figura 2.5: Velocidade dos ventos medida em Guamaré–RN (Petrobrás, Atividade Marítima do E&P RN/CE) ao longo do ano, no período de janeiro de 1993 a abril de 1995 (Estação Meteorológica de Macau – DNMET).

Fonte: NATRONTEC/ECOPLAN (1995).

2.3.1.2.4 – Ondas

Na região costeira, as ondas orientam-se de acordo com a direção dos ventos dominantes, que apresentam direção NE–E. Trabalhos de monitoramento realizados na região indicam variações de altura de ondas entre 0,2 m e 2,1 m (Guedes, 2002). COSTA NETO (1997) adotou dados de ondas de Fortaleza–CE (entre maio de 1991 a junho de 1993) que caracteriza predominância também NE–E, uma vez que a região de Fortaleza, assim como o litoral NNE brasileiro, apresentam condições meteorológicas que variam pouco ao longo do ano. O estudo apontou ondas de E, geradas localmente, como o principal estado de mar dessa região as quais mostram alturas significativas de 0,5 a 1,0 m e período variando de 5 a 8 segundos. Os maiores períodos de pico (8,0 a 18,0 segundos) de ondas foram observados no mês de janeiro, com direção dominante N e NE e alturas significativas de 0,5 m a 2,0 m e os menores períodos de pico foram observados nos meses de agosto e setembro (6,0 a 6,5 segundos).

A comparação entre alturas significativas médias observadas visualmente em Fortaleza–CE e Guamaré (Petrobrás–RN) guardam uma correlação significativa do padrão de ocorrência ao longo do ano. Entretanto, apresentam diferença relativa média de altura significativa em torno de 0,4 m (Costa Neto, 1997).

2.3.1.3 – FORMAÇÃO VEGETAL

Por toda a área de estudo, a vegetação mais comumente observada é a caatinga hiperxerófila, de caráter mais seco, com abundância de cactáceas e plantas de porte mais baixo e espalhado. Entre outras espécies destacam-se a jurema-preta, mufumbo, faveleiro, marmeleiro, xique-xique e facheiro (IDEMA, 2006).

Pode ser encontrada ainda em grande parte da área estudada a vegetação típica de restinga, um depósito arenoso de origem marítima, e o manguezal que constitui um sistema ecológico costeiro tropical dominado por espécies vegetais adaptadas a um solo periodicamente inundado pela maré, com grande variação de salinidade (Figura 2.6). Esses dois tipos de vegetação são considerados ecossistemas protegidos com preservação permanente pelo Código Florestal Brasileiro.

No Estuário do Rio Piranhas-Açu encontra-se o carnaubal, vegetação natural onde a espécie predominante é a palmeira de carnaúba. Há também a vegetação halófica, geralmente espécies herbáceas e rasteiras com elevada tolerância a solos com alta concentração de sais. As dunas são estabilizadas ou fixas quando cobertas por vegetação natural fixadora de areia.



Figura 2.6: Floresta de manguezal típico da micro-região Macau.

Fonte: SETUR/RN (2006).

2.3.1.4 – SOLO

A micro-região Macau apresenta, de modo geral, quatro tipos de solos que se resumem em: Areias Quartzosas Distróficas, de baixa fertilidade, textura arenosa, excessivamente drenado e de relevo plano. O Solochak Solonétzico, de alta salinidade, textura indiscriminada, de imperfeitamente a mal drenado e de relevo plano. O Latossolo Vermelho Amarelo Eutrófico, de fertilidade média a alta, textura média, fortemente drenado e de relevo plano. E o Podzólico Vermelho Amarelo Equivalente Eutrófico Abrupto, de fertilidade natural alta, textura argilosa, relevo plano, moderado a imperfeitamente drenado, medianamente profundo (IDEMA, 2006).

Quanto ao uso, nas áreas de ocorrências de Areias Quartzosas Distróficas, a agricultura é praticamente inexistente, cultivando-se apenas culturas de subsistência, em pequenas áreas. As limitações ao uso agrícola decorrem da falta d'água, da pouca capacidade de retenção e da baixa fertilidade natural, sendo, portanto, mais indicadas para culturas de ciclo longo, tais como coco, caju e sisal. Apresentam condições favoráveis ao uso de implementos agrícolas e seu aproveitamento racional requer adubações parceladas e irrigação, no período seco. A área de Solochak não se presta para agricultura devido, principalmente, ao excesso de sais. O que resta é uma área de Latossolo e outra de Podzólico que poderiam ser bastante cultivadas desde que resolvido o problema da falta d'água (IDEMA, 2006).

2.3.1.5 – RELEVO

Em toda a área estudada o relevo é marcado por planícies costeiras e superfícies aplainadas com suaves ondulações, que podem ser alterados em sua forma pela presença de dunas, não ultrapassando de dezenas de metros de altitude (Figura 2.7). Essas planícies são limitadas em direção ao continente pelos tabuleiros costeiros, também denominados de planaltos rebaixados, formados basicamente por argilas, podendo em alguns casos chegar ao litoral (IDEMA, 2006).



Figura 2.7: Relevo da região da área de estudo.

Pode-se observar ainda em Galinhos, a presença de um relevo diferenciado, denominado de Chapada da Serra Verde, localizado entre os tabuleiros costeiros e o relevo residual chamado “sertão de pedras”, sendo formada por terrenos planos, ligeiramente elevados (IDEMA, 2006).

2.3.1.6 – GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A Bacia Potiguar situa-se no extremo leste da margem continental brasileira. Compreende uma parte emersa e outra submersa, ocupando grande parte do Estado do Rio Grande do Norte e uma pequena porção do Estado do Ceará (Figura 2.8). Geologicamente, limita-se a sul, leste e oeste pelo embasamento cristalino, sendo que o Alto de Fortaleza, a oeste, define seu limite com a bacia do Ceará. Sua área, até a isóbata de 3.000 m, alcança 119.295 km², sendo 33.200 km² (27,8%) emersos e 86.095 km² (72,2%) submersos. A bacia Potiguar é atualmente a segunda maior região produtora de petróleo do País, atrás somente da bacia de Campos, com produção na bacia de 110 mil barris/dia (IDEMA, 2006).

Os municípios de Galinhos, Guamaré e São Bento do Norte situam-se geologicamente na faixa de domínio da bacia Potiguar (idade cretácea). Entretanto, predominam rochas pertencentes ao grupo Barreiras de idade terciária, composto por arenitos finos a médios, ou conglomeráticos, com intercalações de siltitos e argilitos, predominantemente associados a sistemas fluviais formadores de solos arenosos a a-

reno-argilosos de coloração creme a creme avermelhada, que recobrem o calcário da formação Jandaíra (estes ocorrem somente em sub-superfície) em Galinhos e São Bento do Norte. Já em Guamaré, solos característicos da formação Jandaíra são encontrados principalmente junto às margens do rio Camurupim e do riacho da Mutuca, compostos por calcarenitos e calcilutitos bioclásticos, cinza claros a amarelados, com níveis evaporíticos na base, depositados em extensa planície de maré e numa plataforma rasa, carbonática (IDEMA, 2006).

O município de Macau abrange, principalmente, terrenos do grupo Barreiras de idade terciária, caracterizado por arenitos inconsolidados e siltitos com intercalações de argilas variadas, arenitos caulínicos e lateritas, que formam espessos solos arenosos de coloração avermelhada (IDEMA, 2006).



Figura 2.8: Localização da área no contexto da bacia Potiguar.

Fonte: Silveira (2002).

Abaixo do grupo Barreiras, interpretado como leques fluviais costeiros, afloram as rochas calcárias de formação Jandaíra, e na parte sul do município afloramentos da formação Tibau composta por arenitos médios e grossos, imaturos, ama-

relados, freqüentemente interdigitados, e por vezes de difícil individualização, com o grupo Barreiras (IDEMA, 2006).

Na região estuarina estão presentes os aluviões do rio Piranhas-Açu formando depósitos de planícies e canais de marés, compostos por pelitos arenosos e carbonosos. Geomorfologicamente esta área é caracterizada como planície fluviomarina, área plana resultante da combinação de processos de acumulação fluvial e marinha, geralmente sujeitas a inundações periódicas, com vegetação de mangues, chegando até 35 km para o interior. Trata-se de áreas propícias para a extração do sal marinho (IDEMA, 2006).

No litoral dos municípios, o grupo Barreiras encontra-se recoberto por dunas móveis, de origem marinha e remodeladas pelo vento, os depósitos de praias formados por areias finas a grossas, com níveis de cascalho; arenitos e conglomerados com cimento carbonático, definindo cordões de *beachrocks*. As paleodunas ou dunas fixas são formadas por areias bem selecionadas, amareladas, inconsolidadas ou parcialmente consolidadas, que foram transportadas pela ação dos ventos, formando cordões, atualmente fixados por vegetação (IDEMA, 2006).

2.3.1.7 – RECURSOS HÍDRICOS

2.3.1.7.1 - Hidrogeologia

A micro-região Macau apresenta quatro tipos de aquíferos. Um deles é o aquífero Barreiras, apresenta-se confinado, semi-confinado e livre em algumas áreas. Os poços construídos mostram capacidades máximas de vazão, variando entre 5 e 100 m³/h, com águas de excelente qualidade química, com baixos teores de sódio, podendo ser utilizada praticamente para todos os fins, encontrado nos municípios de Macau, Galinhos e São Bento do Norte (IDEMA, 2006).

Um segundo tipo encontrado na micro-região é o aquífero Aluvião, que apresenta-se disperso, sendo constituído pelos sedimentos geralmente arenosos depositados nos leitos e terraços dos rios e riachos de maior porte. Estes depósitos caracterizam-se pela alta permeabilidade, boas condições de realimentação e uma profundidade média em torno de 7 m. A qualidade da água geralmente é boa e pouco explorada. Encontrado nos municípios de Macau, Guamaré e Galinhos (IDEMA, 2006).

Nos municípios de Macau e Galinhos ainda existe o aquífero Cristalino, que engloba todas as rochas cristalinas, onde o armazenamento de águas subterrâneas somente se torna possível quando a geologia local apresenta fraturas associadas a uma cobertura de solos residuais significativa. Os poços perfurados apresentam uma vazão média baixa de 3,05 m³/h e uma profundidade de até 60 m, com água comumente apresentando alto teor salino de 480 a 1400 mg/l com restrições para o consumo humano e uso agrícola (IDEMA, 2006).

Por fim, em São Bento do Norte, pode-se encontrar o aquífero Jandaíra, composto predominantemente por calcários, apresentando água geralmente salobra e uma composição química favorável a pequena irrigação. É também um aquífero livre ou confinado com vazões que variam até 30 m³/h, com média de 3 m³/h e poços com profundidade média em torno de 8 m. Abaixo do Jandaíra encontra-se o aquífero Açú (IDEMA, 2006).

2.3.1.7.2 – Hidrologia

Segundo o mapa das bacias hidrografias do RN da SERHID/RN (2006), apresentado na Figura 2.9, a área de estudo está inserida em quase sua totalidade na faixa litorânea norte de escoamento difuso, compreendendo os municípios de São Bento do Norte, Galinhos, Guamaré e parte do município de Macau, além da área a extremo leste. Outra parte do município de Macau está inserida na porção NE da maior bacia hidrográfica que deságua no litoral Potiguar (a bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu).

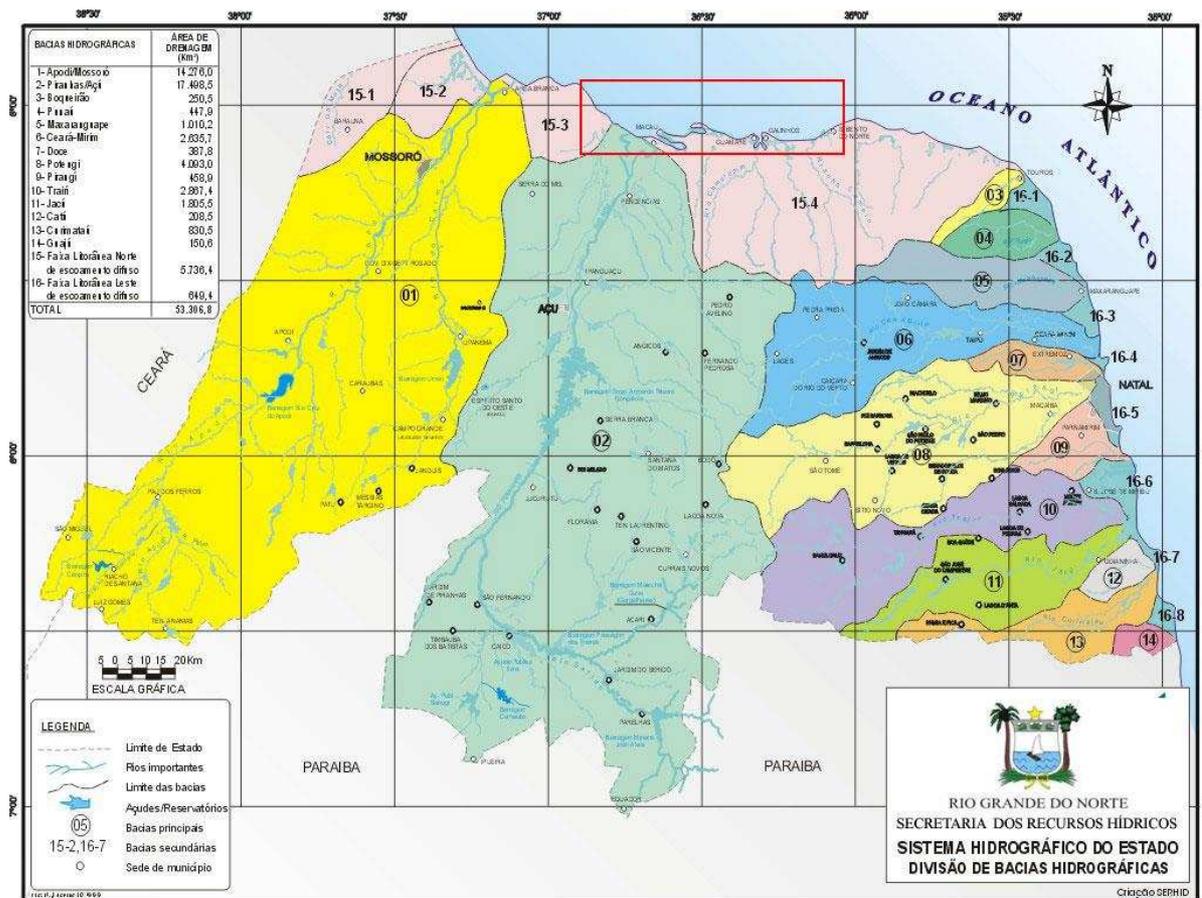


Figura 2.9: Bacias hidrográficas do RN. Fonte: SERHID/RN (2006).

O aporte fluvial mais importante da área de Macau é definido pelo rio Açú, seguido pelos rios dos Cavalos, das Conchas, da Casqueira e Conceição, além de inúmeros canais de maré (Costa Neto, 1997).

Segundo MAFRA (2005), o rio Açú é perenizado próximo ao litoral, sofrendo assim influência das marés, que podem penetrar até uma distância aproximada de 25 km de sua foz. Significativas modificações na hidrografia do rio Piranhas–Açú foram acarretadas devido ao cultivo de camarão recentemente, e no passado a exploração de salinas, através da construção de diques e canais artificiais. MAFRA (2005) afirma ainda em seus estudos que dos demais rios da região, a maioria são de caráter transitório, correndo unicamente no período de chuvas.

Os rios do estuário Galinhos–Guamaré recebem contribuições do continente por meio de drenagens ativas apenas durante o período chuvoso e com vazões reduzidas e o aporte fluvial é definido pelo rio Camurupim, seguido pelos rios Tomás, Catanduba, Volta do Sertão, Pisa Sal, Galinhos, Acauã, do Saco e Carnaúba. Cor-

respondem a canais influenciados integralmente pela ação das marés, destacando-se, nesse caso, o chamado sistema estuarino de Galinhos–Guamaré. (IDEMA, 2006).

Segundo SOUTO (2004), a maioria das lagoas que se encontram na porção interdunar da micro-região Macau, corresponde à parte aflorante do lençol freático da região.

2.3.1.7.3 – Estuários

Estuário é um corpo d'água semi-confinado na costa, que tem ligação livre com o mar, estendendo-se ao longo do rio até o limite da influência da maré, dentro do qual a água do mar entra em contato com a água doce proveniente da drenagem do interior das terras (Dyer, 1997).

Os estuários têm uma importância muito grande para o meio ambiente. São áreas de reprodução, crescimento, alimentação e refúgio para inúmeras espécies da flora e da fauna, microscópicos e macroscópicos, terrestres e aquáticos. Segundo DINERSTEIN *et al.* (1995), os estuários são ecossistemas-chave cuja preservação é crítica para o funcionamento de outros ecossistemas maiores e mais diversos.

A micro-região Macau é formada por mais de um estuário que é um ecossistema muito complexo e extremamente frágil que tem uma importância muito grande para a permanência deste e de outros ecossistemas marinhos e terrestres maiores que são diretamente dependentes do ecossistema estuarino.

2.3.1.7.4 – Balanço Hídrico

O balanço hídrico para a micro-região Macau (Figura 2.10) foi estimado por SILVEIRA (2002) a partir da determinação da evapotranspiração pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), cujos procedimentos estão apresentados em TUCCI E BELTRAME (1993). A estimativa média foi feita para a estação climatológica de Macau. Considerou-se o valor de 30 ml como a capacidade de armazenamento de água numa camada de 1 m de espessura, de areia quartzosa, que é o solo predominante da micro-região Macau.

SILVEIRA (2002) observou que, durante a maior parte do ano, os solos permanecem com deficiência hídrica, que apresenta um valor anual de 784 ml (figura 2.10). Do final de fevereiro a meados de junho é o período com água disponível no solo. A partir do início do mês de março, a precipitação excede a evapotranspiração potencial, comportamento que se estende até meados de maio coincidindo com os meses chuvosos. A partir de maio, as chuvas diminuem de volume e a evapotranspiração suplanta-se, começando a ser utilizada a água que está armazenada no solo. A partir do final do mês de junho e até o final de fevereiro, os solos da região permanecem com deficiência hídrica.

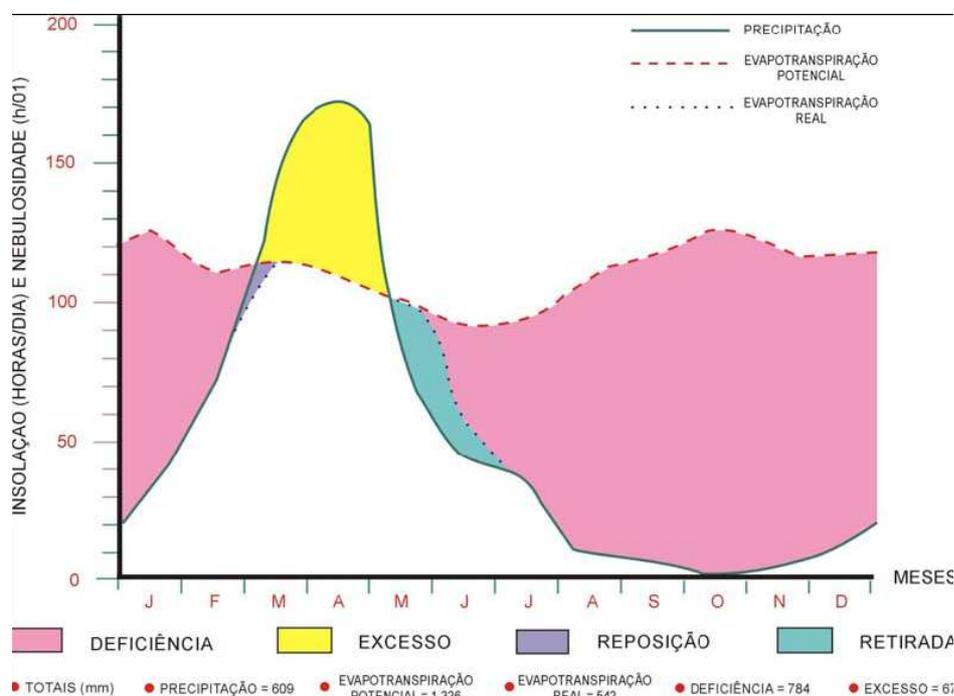


Figura 2.10: Balanço Hídrico para a micro-região Macau (DNMET/2000).

Fonte: Silveira (2002).

2.3.2 – PLATAFORMA CONTINENTAL

A plataforma continental do Rio Grande do Norte apresenta morfologia irregular com gradiente médio em torno de 1:1000. Sua quebra ocorre aproximadamente a 50-60 m de profundidade, distando cerca de 30-40 km da linha de costa.

Morfologicamente as principais feições que ocorrem na plataforma continental são: paleocanais dos principais rios que cortam a plataforma (rio Açu e Mossoró); bioconstruções de algas e corais calcárias (baixo de Maracajá e Rio do Fogo); reci-

fes de arenito descontínuos de extensão variável, paralelos à costa (risca do Liso, risca da Galemeira, urca da Conceição, urca do Minhoto e urca do Tubarão), campos de dunas subaquosas ao largo de Touros e bancos arenosos ao largo de Galinhos. (Costa Neto, 1997).

A orientação EW dos *grabens* na porção submersa da bacia Potiguar, delineada desde a abertura dos continentes Sul-Americano e Africano, definiu o padrão de isóbatas paralelos aos mesmos, e também condicionou a morfologia da linha de costa atual.

Na plataforma interna predominam as areias finas até a isóbata de 10 m, enquanto a granulometria dos sedimentos da plataforma média e externa (acima da isóbata de 10 m) é geralmente grossa, constituindo uma mistura de areia grossa e cascalho. A percentagem de lama dos sedimentos da plataforma interna e em alguns pontos da plataforma externa não chegam a 2,5%.

Em estudos anteriores, foi caracterizado entre Macau e Guamaré um fundo submarino com alternância de bancos e depressões alinhados EW, com elevações isoladas e semicirculares, as quais não formam bancos alinhados, apresentando relevo relativo de 4 a 5 m, foram detectados em profundidades superiores a 10 m.

Atualmente o sistema de circulação hidrodinâmico da micro-região Macau re-trabalha a linha de praia, bem como as feições da plataforma interna, de forma que essa região costeira vive em constante processo de modificação. As feições descritas abaixo foram adaptadas de COSTA NETO (1997).

Paleocanal

Situado ao largo da foz do rio Açu, com direção NE, existe a formação de um paleocanal que apresenta largura média de 4 km, se estendendo a aproximadamente 23 km da linha de praia (isóbata de 25 m), apresenta um fundo plano com gradiente de 1:700.

A uma profundidade de 14 m, existe uma base de aproximadamente 550 m de largura que divide o canal em dois setores: o interno (lado da linha de praia) com profundidade máxima de 22 m e o externo (lado do mar aberto) com profundidade máxima de 24 m.

O paleocanal é um local de deposição de sedimentos carreados pelos rios da região em direção a plataforma, na forma de uma pluma de sedimentos em suspensão e também das areias trazidas pela deriva litorânea.

Dunas Subaquosas (Bancos Arenosos)

Geralmente apresentam uma morfologia de cristas e cavas, com larguras que variam de 300 a 800 m e alturas relativas de 1 a 3 m. São de caráter contínuo e com orientação paralela a linha de praia, entre as profundidades de 2 a 5 m. Observa-se a presença de sedimentos lamosos nas cavas e de areias nas cristas.

As orientações paralelas a linha de praia deve-se provavelmente a corrente litorânea que é de E–W, porém em frente a Galinhos esses bancos arenosos apresentam um ângulo de 30° em relação à linha de costa. Essa angulação se deve a presença de uma crista a leste da área de estudo que, devido a sua grande elevação, força a corrente litorânea a contorná-la e retornar a sua orientação original.

Recifes

Os recifes constituem estruturas que se elevam do fundo submarino e estão distribuídos próximos à quebra da plataforma na área de estudos. Os pequenos recifes (urcas) apresentam relevo variando de 2,5 a 10 m e largura variando de 500 a 1000 m e podem ser bem representados pela urca do Minhoto, urca do Tubarão, urca da Conceição. Os recifes de grande extensão (riscas) apresentam extensão variando de 10 a 30 km, com larguras que variam de 1,5 a 5,0 km representados pelas riscas da Bicuda.

Crista

Segundo TABOSA (2006), na plataforma interna em frente a São Bento do Norte existe um alto topográfico submerso, com cerca de 5 m de altura, 1 km de largura e mais de 24 km de extensão. Essa crista emerge parcialmente na baixa-mar, é basicamente constituída por areia fina e exerce um papel muito importante no controle dos processos sedimentares e oceanográficos, bem como da evolução costeira da região do estado do RN e que afetam diretamente a região do Pólo Petrolífero de Guamaré.

2.4 – BIOTA

Nessa região, as maiores ameaças à biota são os desmatamentos e ocupação desordenada pelas salinas e pelos viveiros de camarão, além da falta de saneamento básico e suas conseqüências, como a baixa qualidade das águas e dos sedimentos e a destruição dos manguezais.

Os manguezais representam um ecossistema costeiro de transição entre os ambientes terrestres e marinhos, onde há influência da maré e intrusão de salinidade do mar. Por serem áreas de reprodução de diversas espécies, os mangues são considerados berçários de várias espécies. A vegetação protege as margens e encostas, evitando erosões e transporte excessivo de sedimentos. (Figueiredo, 2007).

2.5 – SOCIOECONOMIA

Segundo o censo realizado pelo IBGE (2006) a micro-região Macau conta com um total de 40.551 habitantes. Esta população está distribuída em uma área total de 1.678 km², sendo mais detalhada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Densidade demográfica dos municípios da micro-região Macau.

Município	Unidade	Macau	Guamaré	Galinhos	São Bento do Norte
População	hab	25521	9444	2082	3504
Área	km ²	788	259	342	289
Densidade	hab/km ²	32.4	36.4	6.1	12.1

Fonte: IBGE, 2006.

O grau de instrução das pessoas responsáveis pelos domicílios particulares permanentes é muito baixo, de tal forma que para a micro-região, quando discriminados por anos de estudo, o contingente sem instrução ou com até três anos de estudo apresenta um percentual maior que 60,0% (IBGE, 2006). A baixa instrução da população em geral reflete-se no rendimento mensal das pessoas responsáveis pelos domicílios particulares permanentes.

Dados do IBGE (2000) mostram que a população economicamente ativa da região é em média 33,21%, com rendimento nominal médio de R\$ 250,00 e a maio-

ria das residências são administradas por pessoas que não possuem rendimentos ou que ganham até um salário mínimo (Tabela 2.2).

O desenvolvimento socioeconômico na região está amplamente relacionado às atividades artesanais e pesqueiras, assim como a produção agropecuária de subsistência confinada a pequenas propriedades rurais que utilizam, na sua maioria, a mão-de-obra familiar para o plantio de feijão, milho, batata e a extração de castanha de caju, coco e sisal.

Tabela 2.2: Rendimento financeiro da população da micro-região Macau.

Município	Unidade	Macau	Guamaré	Galinhos	São Bento do Norte
População economicamente ativa	hab (%)	9945 (38.96)	2426 (25.69)	633 (30.40)	1325 (37,81)
Rendimento nominal	R\$	285.73	243.70	218.81	251.88
Chefe família com 1 salário	%	44.92	51.73	63.13	56.05
Chefe família com 2 salários	%	23.68	25.38	17.42	16.18
Chefe família com mais de 2 salários	%	27.10	19.28	14.65	5.93
Chefe de família sem renda	%	4.30	3.61	4.80	21.84

Fonte: IDEMA / IBGE, 2000.

Na agricultura a aptidão está restrita para lavouras e aptas para culturas especiais de ciclo longo (algodão arbóreo, sisal, caju e coco).

As atividades econômicas que vem se ampliando nos últimos anos neste litoral são: o turismo, a indústria petrolífera com a exploração de petróleo e gás natural com poços produtores (em terra e no mar), oleodutos e estações coletoras ao longo de quase toda a costa, sobretudo em zonas onde o efeito erosivo é muito acentuado. A produção de sal marinho, que está em forte declínio, onde as áreas antes ocupadas por salinas estão sendo gradualmente substituídas por grandes fazendas de camarão (carcinicultura). Entretanto, a ausência de planejamento no desenvolvimen-

to das atividades relacionadas à carcinicultura pode causar danos irrecuperáveis ao ecossistema local.

A região da Costa Branca é responsável por 95% do sal marinho produzido no Brasil, sendo Macau o maior produtor do Estado. A cidade está praticamente dentro das salinas da Companhia Álcalis, que tem 700 hectares e produz mais da metade dos dois milhões de toneladas por safra. A pesca artesanal é outra importante atividade econômica na região, apresentando produção anual de 1300 ton (IDEMA, 2002).

O pólo industrial de Guamaré ou pólo petroquímico de Guamaré aproveita e processa grande parte do gás natural proveniente dos campos de Ubarana, Agulha, Aratum, Pescada e Arabaiana, na plataforma continental, em alto mar, e dos Campos terrestres, sob a forma de gás liquefeito de petróleo (gás de cozinha) e gás residual (gás composto principalmente de metano), numa unidade de processamento de gás natural. O gás residual é comercializado para o abastecimento de indústrias nos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, interligando Guamaré ao Cabo de Santo Agostinho, em Pernambuco, numa extensão de 420 km, sendo denominado gasoduto Nordesteão.

A produção de gás natural chega a 4 milhões de m³/dia, destacando o Estado como o terceiro maior produtor do Brasil, com mais de 3,9 mil poços em operação. São produzidos mais de 95 mil barris/dia de petróleo, colocando o Estado como o segundo maior produtor nacional e o maior produtor em terra (Lima, 2005).

3. SISTEMA DE MODELAGEM APLICADO

Este capítulo apresenta, em linhas gerais, o modelo utilizado no presente estudo. Trata-se do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – SisBAHIA[®] desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica – AECO/PEnO – e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos integrantes da COPPE/UFRJ. São apresentados os aspectos relacionados aos módulos hidrodinâmicos bidimensionais e tridimensionais e ao modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo.

3.1 – A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO AMBIENTAL

A utilização de modelos como ferramenta para a representação de uma situação real em projetos de engenharia tem sido cada vez mais freqüente nos últimos anos. A importância dos modelos de circulação hidrodinâmica está na possibilidade de simular, com bastante realismo, o padrão de circulação hidrodinâmica em corpos de água costeiras, estuários, baías, lagos, lagoas e reservatórios. Os modelos dão suporte a comparações de variadas intervenções feitas no ambiente, não apenas de atividades diretamente poluidoras como o lançamento de efluentes, ou no caso desse estudo como os derrames de óleo, mas também de obras civis, que afetam características físicas, observando como o meio aquático será afetado nas suas características gerais, e até que ponto isso restringirá seu uso para outras finalidades.

Portanto, torna-se inquestionável a necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílio à gestão ambiental de recursos hídricos, face à complexidade do ambiente de corpos d'água naturais, considerando que os modelos são uma representação simplificada do mundo real e são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais (Rosman, 2001).

A gestão ambiental e o gerenciamento de corpos d'água naturais requer dados ambientais, os quais, devido ao alto custo para seu levantamento, geralmente são escassos. Através de modelos calibrados, capazes de reproduzir valores nos pontos onde se fez medições, podem-se interpolar e extrapolar espacial e temporal-

mente as informações obtidas nos poucos pontos onde os dados foram medidos para toda a área de interesse, o que permite uma melhor interpretação das medições isoladas, como por exemplo, fornecendo uma noção do trajeto das manchas de óleo (Rosman, 2001).

Além disso, a aplicação de modelos numéricos para a estimativa de padrões de circulação e transporte fluido em corpos d'água costeiros é de importância fundamental, tanto no que se refere à sua poderosa contribuição na avaliação de impactos ambientais, como na identificação e definição das estratégias para a operacionalização e gerenciamento de programas de monitoramento ambiental (Rosman, 1997).

3.2 – DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Segundo ROSMAN (1997), os modelos hidrodinâmicos aplicáveis a sistemas estuarinos e de águas rasas podem ser divididos em três tipos, variando de acordo com a sua complexidade demandada e escala de interesse:

- **Modelos tridimensionais:** são modelos que possuem todas as dimensões (x, y, z, t). Os modelos gerais ou 3Dg, incluem todas as equações, e considera os gradientes de densidades. São aplicáveis a qualquer caso. Já os modelos simplesmente 3D possuem uma hidrodinâmica mais simples, pois não são incluídos gradientes de densidades na sua formulação. São aplicáveis a corpos d'água com coluna d'água homogênea ou pouco estratificada, com o objetivo de se obter perfis verticais das variáveis.
- **Modelos bidimensionais:** são modelos que têm as variáveis promediadas dos modelos tridimensionais. Estes modelos são subdivididos em 2 tipos: modelo bidimensional na horizontal (2DH) e modelo bidimensional na vertical (2DV). No modelo 2DH as variáveis são médias verticalmente, ou seja, possuem somente as dimensões (x, y, t). São aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados, tendendo a verticalmente homogêneos. No modelo 2DV as variáveis são médias lateralmente, restando as dimensões (x, z, t). São aplicáveis a corpos d'água com estratificação vertical de densidade, mas com pouca variação lateral. Normalmente são corpos d'água estreitos.

- **Modelo unidimensional (1D):** este modelo é aplicável a corpos d'água longitudinais com seção transversal homogênea, como canais. Considerando o eixo x como longitudinal, têm-se somente as dimensões (x,t) .

A adoção de um modelo hidrodinâmico tridimensional geral é possível para todos os casos de um dado sistema em estudo, mas a escolha do modelo a ser aplicado deverá passar primeiro por uma avaliação de custo/benefício (Rosman, 1997). Os custos relacionados a sua utilização, seja o tempo de execução ou o tipo de ferramenta a ser utilizada, serão sempre maiores em modelos do tipo 3Dg. A depender das características do corpo d'água a ser estudado e da qualidade dos resultados requeridos, bons resultados podem ser alcançados com modelos mais simplificados com economia de tempo e de recursos.

O SisBAHIA[®] permite a utilização do modelo 2DH acoplado ao modelo 3D para o estudo em questão. O sistema é capaz de calcular campos de velocidade promediados na vertical, 2DH, e campos de velocidades tridimensionais, 3D, gerando assim os perfis de velocidade ao longo da profundidade (ao longo do eixo vertical).

3.3 – MODELO DE CIRCULAÇÃO 3D PARA CORPOS D'ÁGUA RASOS COM DENSIDADE HOMOGÊNEA

A seguir apresenta-se uma breve descrição do modelo de circulação 3D do SisBAHIA[®]. Maiores detalhes podem ser encontrados em Rosman, 1989; Rosman, 1997; Rosman, 2001 e em Rosman, 2006.

3.3.1 – DESCRIÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO NO SisBAHIA[®]

O SisBAHIA[®] contém um modelo hidrodinâmico capaz de simular a circulação hidrodinâmica em corpos d'água rasos sob diferentes cenários propostos pelo usuário (Rosman, 2006).

Esse modelo hidrodinâmico é da linhagem FIST (*“Filtered In Space and Time”* ou Filtrado no Espaço e no Tempo) otimizado para corpos de água naturais, utilizando elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. A linhagem FIST representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a

modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES – *Large Eddy Simulation*). Vale mencionar que a LES é considerada estado da arte para modelagem de turbulência em escoamentos geofísicos (Rosman, 2006). A versão 3D do FIST resolve as equações completas de Navier–Stokes com aproximação de águas rasas, i.e., considerando a aproximação de pressão hidrostática.

A seguir, são descritas as principais características do SisBAHIA[®]:

- Tensões e difusividade turbulentas são modeladas de forma que a calibragem do modelo seja o mais baseado possível em variáveis naturais. O emprego de esquemas auto-ajustáveis para a turbulência na escala sub-malha minimiza a necessidade de calibragem.
- O campo de vento e as condições de atrito no fundo podem ser variáveis no espaço e no tempo.
- O modelo hidrodinâmico é capaz de calcular perfis de velocidade ao longo da profundidade (ao longo do eixo vertical). Isso pode ser obtido de duas formas: através de uma rotina com solução analítico-numérica ou de uma rotina com solução para uma formulação completa de modelo numérico 3D.
- Os modelos são baseados em esquemas numéricos bem estabelecidos, para aumentar a validade e aceitação dos mesmos.

Neste estudo aplicou-se o modelo 2DH para a avaliação do comportamento médio das correntes e a previsão das elevações da superfície livre, e adotou-se a solução analítico-numérica 3D para a obtenção dos perfis de velocidade no escoamento horizontal. Neste tipo de solução, os perfis são computados através de uma solução analítica que é função das velocidades 2DH promediadas na vertical, elevação da superfície livre, rugosidade equivalente de fundo, e da velocidade do vento atuando na superfície livre da água.

3.3.2 – RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Os modelos hidrodinâmicos computacionais são regidos por equações gerais que representam os escoamentos naturais dos corpos de águas, sendo que as mesmas são não-lineares e não possuem solução analítica conhecida para os domí-

nios e condições de contorno existentes. Para que seja possível a solução destas equações, utilizam-se soluções numéricas, substituindo o domínio contínuo por um domínio discreto, o que resulta em equações algébricas cujas soluções podem ser obtidas através de algoritmos computacionais (Scudelari, 1997).

Segundo ROSMAN (2006), as equações que governam a mecânica do movimento para escoamento em regime turbulento são as equações de Navier–Stokes. Estas equações representam o princípio da conservação da quantidade de movimento, e em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo d'água.

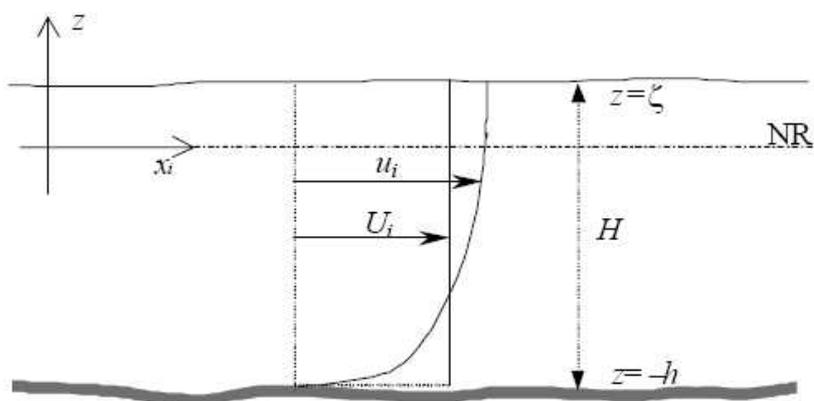


Figura 3.1: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH), onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i representa a velocidade promediada na vertical. Note que as coordenadas e velocidades horizontais são representadas como $(x, y) \equiv (x_1, x_2)$ e $(u, v) \equiv (u_1, u_2)$ utilizando o índice $i = 1, 2$. Fonte: Rosman, 2006

Os escoamentos de grande escala, aqueles onde as escalas dos movimentos horizontais são pelo menos 20 vezes maiores do que a profundidade podem ser considerados escoamentos em águas rasas. Para tais situações, as equações governantes são chamadas de equações de águas rasas e deduzidas a partir das equações gerais de escoamentos em regime turbulento, determinam as quatro incógnitas de circulação hidrodinâmica em um escoamento 3D (u, v, w, ζ) :

- Equação da quantidade de movimento 3D, com aproximação hidrostática, na direção x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial(\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (3.1)$$

Onde:

- u, v e w são componentes da velocidade do escoamento nas direções x, y e z ;
- $\zeta(x, y)$ é a elevação da superfície livre;
- g é a aceleração da gravidade;
- ρ é a densidade local do fluido;
- ρ_0 é uma densidade constante de referência;
- Φ é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de latitude.

- Equação da quantidade de movimento 3D, com aproximação hidrostática, na direção y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (3.2)$$

- Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

- Equação da continuidade (do volume) integrada na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (3.4)$$

A seguir o significado dos termos que compõem estas equações é descrito de forma simplificada. Maiores detalhes podem ser obtidos em ROSMAN (2006).

Para as equações da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{Aceleração local do escoamento;}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad \text{Aceleração advectiva do escoamento;}$$

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ Resultante da pressão hidrostática na direção x, devido a declividade da superfície d'água na direção x;

$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$ Resultante das tensões turbulentas dinâmicas no escoamento.

Para a equação da continuidade;

$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ Faz com que o divergente da velocidade do escoamento seja nulo, i.e., o volume das partículas no escoamento é incompressível.

Para a equação da continuidade integrada ao longo da vertical;

$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0$ Tem o mesmo significado que a equação da continuidade.

3.3.3 – ESTRATÉGIA NUMÉRICA

O método numérico utilizado pelo SisBAHIA[®] para resolver as equações governantes de águas rasas é o Método dos Elementos Finitos – MEF, que utiliza para a discretização temporal o Método do Fatoramento Implícito Modificado e para a discretização espacial utiliza o MEF com elementos Lagrangeanos sub-paramétricos.

A discretização temporal é feita sobre a equação da continuidade, juntamente com as equações da conservação da quantidade de movimento, escritas na formulação fraca de elementos finitos, utilizando o método da fatoração implícita generalizado por ROSMAN (1997).

A discretização espacial é feita sobre as equações discretas no tempo, aplicando a formulação de elementos finitos às mesmas. O método de Galerkin é o adotado com a utilização de elementos Lagrangeanos sub-paramétricos, i.e., o número de pontos que definem a geometria dos elementos é inferior ao usado para definir as demais grandezas envolvidas no problema.

3.3.4 – CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Para a imposição das condições iniciais, o modelador precisa fornecer apenas as condições iniciais 2DH, ou seja, para o instante inicial de simulação, t_0 , deve ser fornecido os valores da elevação da superfície livre ζ , e as componentes da velocidade 2DH, U e V , para todos os nós do domínio. O FIST3D gera automaticamente as condições iniciais para o módulo 3D a partir desses valores 2DH, da velocidade do vento e rugosidade equivalente do fundo, usando o módulo de solução analítico-numérica (Rosman, 2000).

Para o modelo 3D (FIST 3D), as condições de contorno consideradas são verticais e horizontais. Para o módulo 3D, as condições de contorno são: velocidade zero no fundo; e a tensão de atrito do vento na superfície livre calculada a partir das velocidades de vento dadas. Os contornos horizontais podem ser de dois tipos: de terra e abertos.

Os contornos de terra ou fronteiras de terra caracterizam as margens do corpo de água e possíveis afluentes e captações. Usualmente a margem é considerada como impermeável e impõe-se valor zero. Nos afluentes e captações, inclui-se a vazão normal. Os contornos abertos não são fronteiras físicas, geralmente representam os limites do domínio de água modelado.

No FIST3D associasse aos contornos fechados a prescrição de fluxos ou velocidades normais, e aos contornos abertos as elevações da superfície livre.

3.4 – MODELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DA PLUMA CONTAMINANTE

A seguir apresenta-se uma breve descrição do modelo Lagrangeano de partículas do SisBAHIA[®]. Maiores detalhes podem ser encontrados em Rosman, 1997; Rosman, 2001 e em Rosman, 2006.

3.4.1 – DESCRIÇÃO DO MODELO IMPLEMENTADO NO SISBAHIA[®]

O SisBAHIA[®] contém um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo, para simular o transporte de substâncias, contaminantes que possam estar bem misturados, ou ocupando apenas uma camada, na coluna d'água. Esse tipo de

modelo é, na maioria das vezes, utilizado no estudo do transporte, relativamente local, de plumas ou nuvens de contaminantes.

O modelo Lagrangeano tem a vantagem de ser facilmente aplicável a fontes de pequena escala e fortes gradientes. Para isso, um dado número de partículas é lançado na região fonte em intervalos de tempo regulares. As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes.

3.4.2 – RESUMO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Nesta técnica de modelagem Lagrangeana para escalares passivos, a incógnita básica não é a concentração, mas a posição de partículas discretas. Dessa forma a massa do contaminante lançado no corpo d'água é discretizada em múltiplas partículas cujas trajetórias são determinadas a partir dos resultados do modelo hidrodinâmico. Cada partícula representa o centro de massa de uma pequena mancha de contaminantes com uma dada distribuição de concentrações. A soma das manchas de todas as partículas resulta na distribuição de concentrações do escalar no meio, que é a incógnita dos modelos convencionais. Assim, com essa técnica, calcula-se as concentrações do contaminante indiretamente.

No instante de lançamento cada partícula é posicionada aleatoriamente dentro de uma área fonte. As dimensões desta área são pré-definidas pelo usuário de forma que se modele apenas os processos de transporte de uma mancha de contaminantes passiva no campo afastado da região dos possíveis jatos existentes na fonte emissora.

O transporte advectivo da nuvem de partículas já lançadas, em cada instante, é definido através da trajetória de cada partícula, calculando-se sua posição a cada tempo $(n+1)\Delta t$, P^{n+1} . Para isso, adota-se a expansão em série de Taylor a partir da posição anterior P^n , no instante $n\Delta t$:

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{\partial P^n}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{\partial^2 P^n}{\partial t^2} + T.A.O \quad (3.5)$$

onde *T.A.O* são os termos de alta ordem desprezados. As derivadas temporais da posição *P* são obtidas a partir do campo de velocidades calculado pelo modelo hidrodinâmico da seguinte forma:

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad (3.6)$$

$$\frac{d^2P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial\vec{V}}{\partial z} \quad (3.7)$$

As velocidades para o transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$, seguem as velocidades das correntes do corpo receptor, que variam temporal e espacialmente, de acordo com as forças locais (maré, vento, etc.). A inclusão dos termos de aceleração na determinação da posição é opcional, mas permite o uso de intervalos de tempo significativamente maiores, com boa precisão.

Evidentemente, na pequena escala local das partículas, as velocidades apresentam componentes de pequena escala, chamadas velocidades difusivas, ou turbulência, não capturadas pelo campo de velocidades de maior escala calculado pelo modelo hidrodinâmico. É dessa forma porque o campo de velocidades do modelo tem escalas associadas à malha fixa de elementos finitos.

De modo a inserir o efeito de tal turbulência na simulação do transporte das partículas, após a determinação da nova posição de cada partícula, pode-se impor um desvio aleatório, como o que seria causado pelas velocidades difusivas. A magnitude do desvio aleatório é função das derivadas espaciais das difusividades de quantidade de movimento. Mas, por vezes, há que se incluir uma aleatoriedade estimada.

Este tipo de modelo de trajetória de partículas representa uma alternativa cada vez mais empregada no lugar da resolução direta das equações de transporte advectivo-difusivo, possibilitando a obtenção de bons resultados, resolvendo muito bem gradientes fortes e frentes de concentração e evitando problemas como a perda de massa, oscilações e difusões numéricas (Rosman, 1987).

3.4.3 – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Existem, basicamente, dois tipos de condições de contorno para o modelo de transporte Lagrangeano de partículas. O primeiro é ao longo dos contornos abertos, i.e., quando uma partícula atravessa um segmento de contorno, ela sai do domínio modelado, e, conseqüentemente, é perdida. Por esse motivo, não se deve usar o

modelo Lagrangeano para regiões fontes próximas aos limites de contornos abertos. Isso implica em que o contorno aberto deve estar suficientemente afastado da região fonte, de tal forma que, se as partículas deixarem o domínio, não causarão nenhuma consequência sensível para problema tratado. O segundo tipo ocorre ao longo de contornos de terra.

Ao longo das fronteiras de terra, podem ser consideradas duas possibilidades distintas, com variações: 1A) a partícula sofre reflexão total; 1B) a partícula sofre reflexão total e um pequeno desvio aleatório; 2A) a partícula permanece na sua posição; 2B) a partícula sofre um pequeno desvio em relação a sua posição inicial. Assim, se em um determinado instante, a nova posição da partícula atravessa um segmento de fronteira terrestre, deve-se adotar uma das estratégias acima. A estratégia adotada deve ser definida através de parâmetros nos arquivos de entrada de dados, geralmente, a estratégia 2B é adotada, (Horita e Rosman, 1997).

4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico é a base fundamental para o conhecimento do comportamento da circulação hidrodinâmica sob condições diversas de marés, ventos e contribuição hidrológica.

Entretanto, a aplicação de um modelo hidrodinâmico no estudo da circulação na área de interesse só se torna viável se existir um conjunto de dados de entrada consistentes, previamente selecionados e preparados. A fase de coleta e elaboração dos dados vai desde a definição da área a ser modelada até a adequação dos dados à utilização do modelo (Rosman, 1987).

Neste capítulo estão apresentados os cenários modelados e os dados ambientais da região necessários à aplicação do modelo hidrodinâmico tais como batimetria, maré e vento, além das condições iniciais e de contorno.

4.1 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

O estudo do padrão de circulação hidrodinâmico em corpos d'água é realizado através de simulações, caracterizando diferentes situações. Estas simulações, divididas em cenários, são diferenciadas através de fenômenos meteorológicos e oceanográficos, mais precisamente o vento, a onda de maré representada pela variação do nível d'água num determinado período, assim como os métodos de modelagem aplicados (2DH e 3D). A adoção do modelo 2DH permite a avaliação dos padrões médios de circulação, enquanto que o modelo 3D fornece os perfis verticais de velocidade.

Com o objetivo de estudar o padrão de circulação da zona costeira de Macau e Guamaré com a aplicação de modelo hidrodinâmico 3D, considerou-se dois cenários de simulação caracterizando as seguintes situações:

- Cenário 1: Padrões de correntes gerados pela maré astronômica com vento de verão.
- Cenário 2: Padrões de correntes gerados pela maré astronômica com vento de inverno.

4.2 – DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO

Visando determinar a importância da circulação hidrodinâmica na Micro-região Macau, com o objetivo de se conhecer as tendências de espalhamento da mancha de óleo proveniente de um possível derramamento deste contaminante numa área de plataformas e dutos petrolíferos, o domínio do trabalho foi determinado a partir dos vários estudos realizados anteriormente (supracitados nos capítulos anteriores) na área costeira do Pólo Petrolífero de Guamaré.

Os contornos da costa, dos estuários e da área marítima deste estudo foram definidos a partir da utilização de cartas náuticas do Ministério da Marinha – DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil). Como base principal utilizou-se a carta náutica nº 720 (DHN, 2003), apresentada na Figura 4.1, em associação às cartas náuticas nº 700 (DHN, 1981), nº 702 (DHN, 1973). A Figura 4.2 mostra a digitalização do contorno da área de estudo desse trabalho.

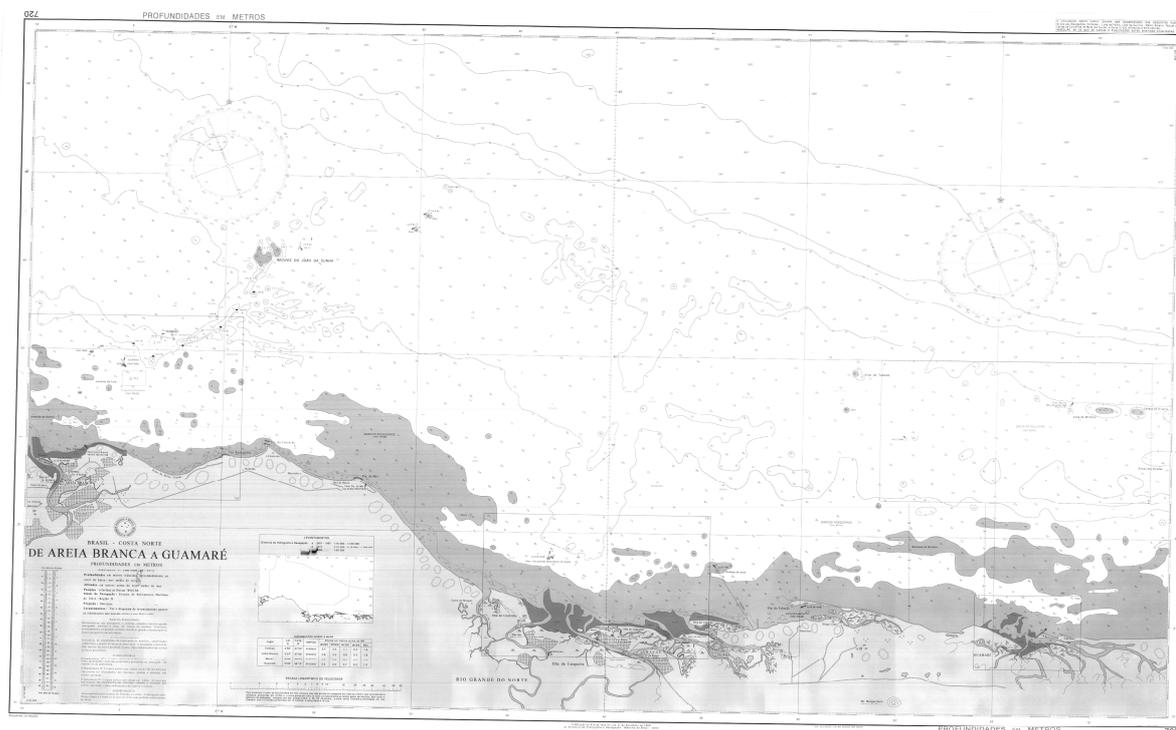


Figura 4.1: Carta Náutica nº 720 – DE AREIA BRANCA A GUAMARÉ. (DHN, 2003).

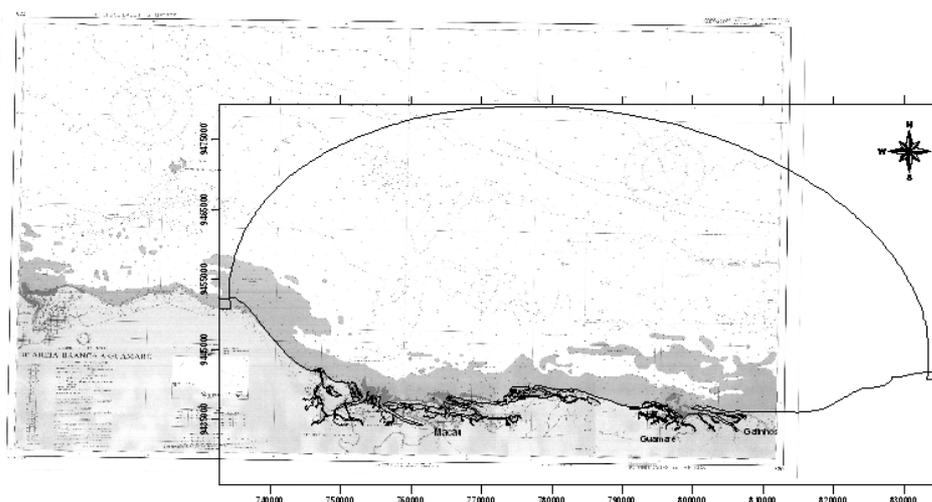


Figura 4.2: Digitalização do contorno.

4.3 – DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL – MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Para que se obtenham bons resultados do modelo hidrodinâmico, a confecção da malha de elementos finitos foi feita de forma bastante cuidadosa no sentido de preservar ao máximo os contornos naturais, evitando elementos com grandes distorções geométricas, de modo a garantir uma boa acurácia e estabilidade numérica. A discretização é mais refinada nas áreas de interesse, próximas aos dutos.

Na discretização optou-se por adotar elementos quadráticos sub-paramétricos Lagrangeanos. Embora o modelo permita a adoção de uma malha de elementos finitos triangulares, obtém-se melhores resultados com a malha quadrática.

O domínio foi discretizado (Figura 4.3) através de uma malha de 728 elementos finitos biquadráticos, totalizando 3034 nós, dentre os quais 177 fazem parte do contorno de terra, 69 pertencem à fronteira aberta, 02 pertencem ao contorno de terra/aberto, os demais são nós internos.

Considerando-se que a modelagem da circulação hidrodinâmica foi realizada utilizando o modelo 2DH acoplado ao modelo 3D, foram definidos 21 níveis ao longo da profundidade do corpo d'água, o que resultou em um total de 63714 pontos de cálculos (nós).

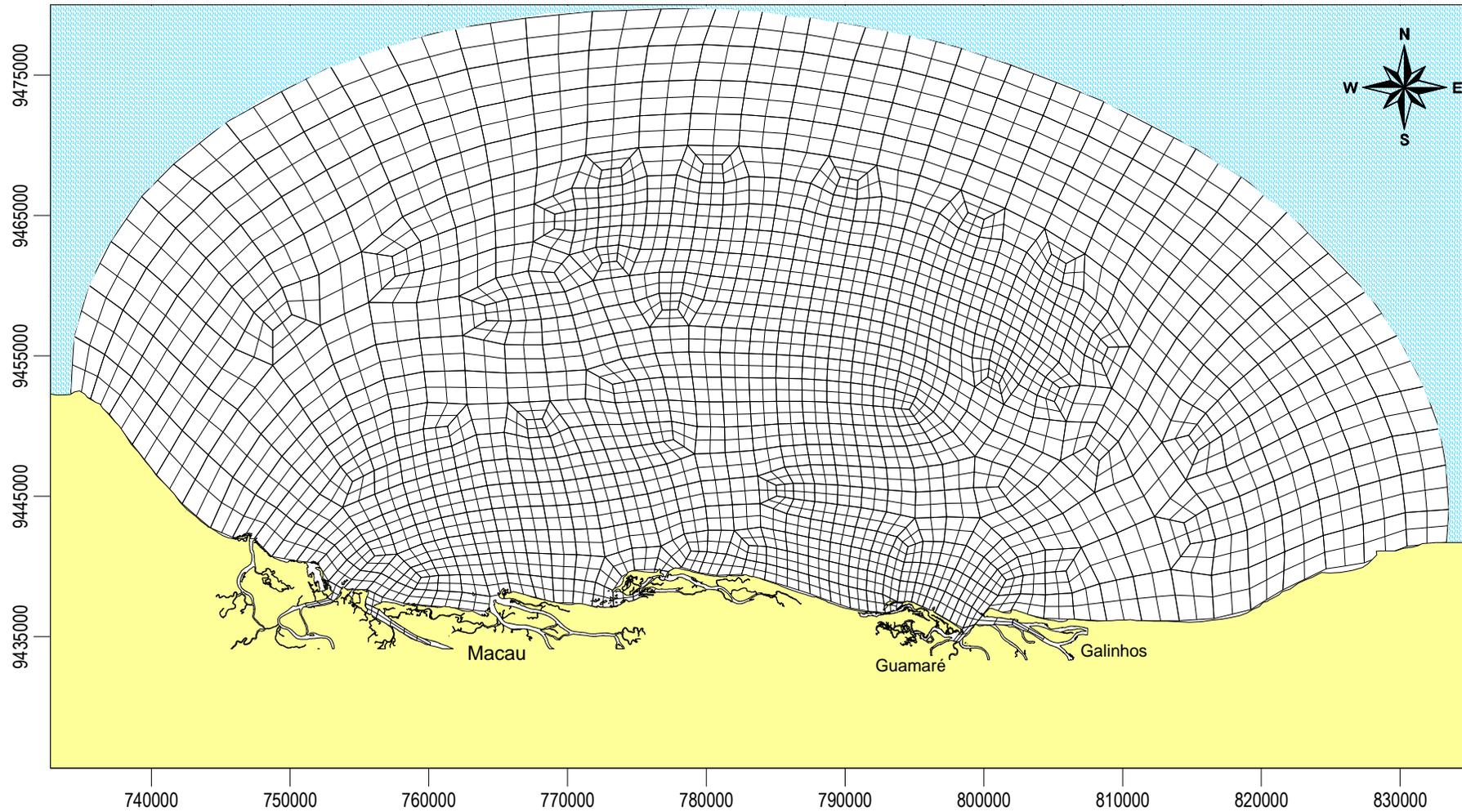


Figura 4.3: Malha de discretização em elementos finitos da região costeira de Macau e Guamaré, com detalhamento na região onde os vazamentos de óleo podem ocorrer - os dutos -, composta de 728 elementos finitos biquadráticos e 3034 nós no plano horizontal e 21 níveis verticais.

4.4 – BATIMETRIA

As informações relativas à batimetria utilizada nesse estudo foram obtidas das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN: carta *de Areia Branca a Guamaré* nº 720, na escala 1:100.000; carta *de Fortaleza a Ponta dos Três Irmãos* nº 700, na escala 1:316.200; carta *Porto de Macau* nº 702, na escala 1:23.000. Além da base da DHN também foi utilizada a base do Grupo de Pesquisa em Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento Ambiental – GGEMMA/UFRN e Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO/UFRN), ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, obtida a partir de levantamentos batimétricos *in situ* realizado em 2005.

Os valores de profundidade nos nós da malha de elementos finitos, apresentados na Figura 4.4, foram calculados pelo modelo através de interpolações usando método de *krigagem* (Kriging), a partir das coordenadas (x,y,z) fornecidas pela batimetria utilizada. Entretanto, o nível de referência para o modelo é o nível médio da maré na estação de Guamaré, cerca de 1,30 m acima do nível de redução das cartas náuticas. Tal valor foi acrescentado aos dados batimétricos das cartas náuticas.

Com o intuito de evitar a “secagem” de pontos pertencentes ao domínio em estudo, ou seja, evitar que o nível da água durante o processamento do modelo alcance valores negativos, foi preciso impor valores mínimos de profundidade aos registros batimétricos, além de valores iniciais de elevação para simular o modelo hidrodinâmico. Para o estudo em questão adotou-se um valor mínimo de 1,00 m de profundidade, e para a elevação inicial foi adotado um valor de 1,90 m, levado-se em consideração o nível médio (1,30 m) acrescido da elevação inicial da maré astronômica (0,60 m).

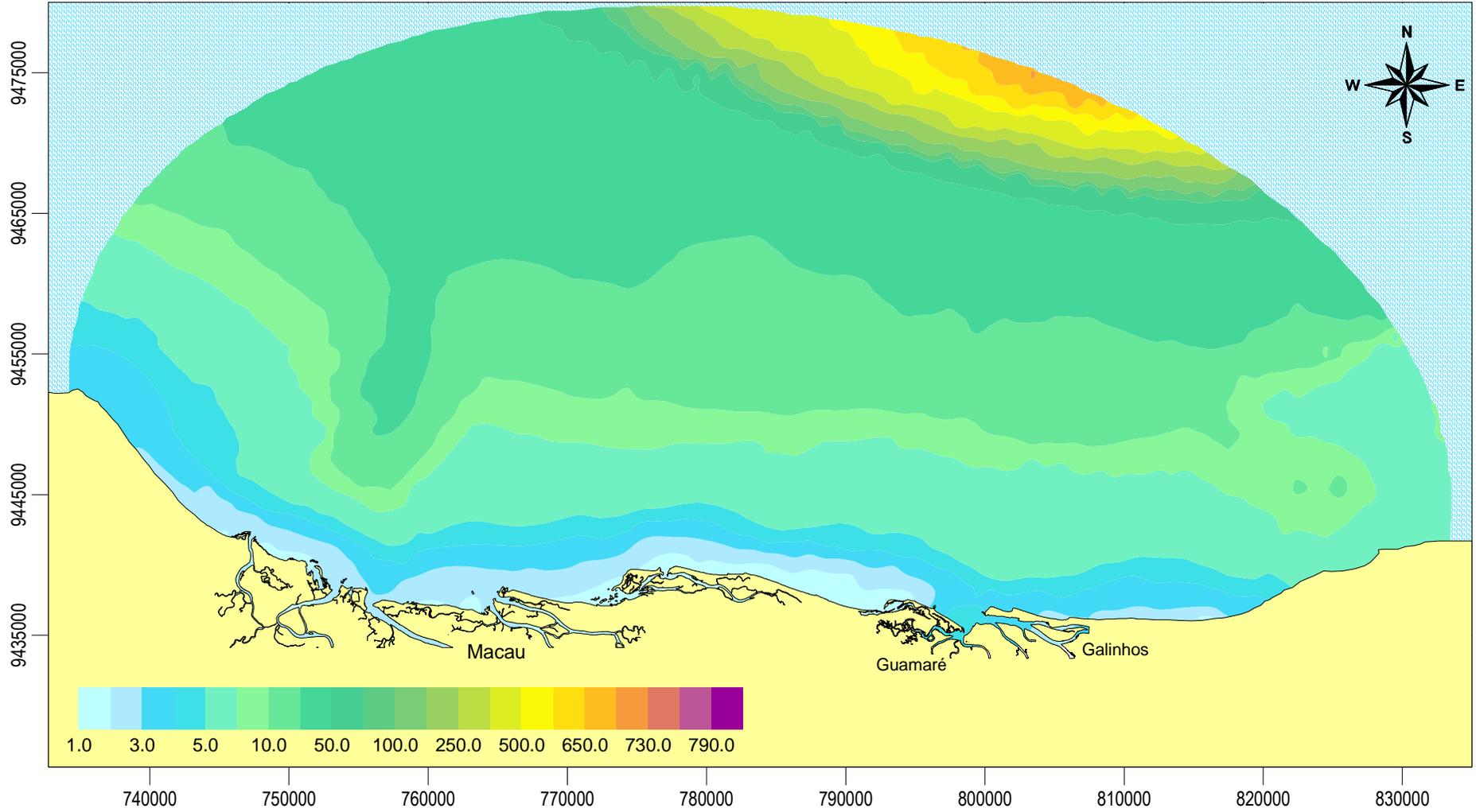


Figura 4.4: Batimetria do fundo do domínio de modelagem da região costeira de Macau e Guamaré como vista pelo modelo.

4.5 – TIPO DE FUNDO E RUGOSIDADE EQUIVALENTE

O conhecimento dos sedimentos presentes no leito do corpo d'água se faz necessário no que tange o cálculo da tensão de atrito no fundo. A amplitude da rugosidade equivalente do fundo (ϵ) (Tabela 4.1), que depende do tipo de material encontrado, é empregada no cálculo do coeficiente de Chézy, que, por sua vez, é utilizado na equação da tensão de atrito no fundo.

Tabela 4.1: Valores recomendados para a amplitude da rugosidade equivalente de fundo (ϵ).

Fundo sedimentar (areia, terra, vasa, etc.):	
Fundo com transporte de sedimentos	0.0070 m < ϵ < 0.0500 m
Fundo com vegetação	0.0500 m < ϵ < 0.1500 m
Fundo com obstáculos	0.1500 m < ϵ < 0.4000 m
Fundo de pedra ou rochoso:	
Fundo de alvenaria	0.0003 m < ϵ < 0.0010 m
Fundo de pedra lisa	0.0010 m < ϵ < 0.0030 m
Fundo de asfalto	0.0030 m < ϵ < 0.0070 m
Fundo com pedregulhos	0.0070 m < ϵ < 0.0150 m
Fundo com seixos rolados	0.0150 m < ϵ < 0.0400 m
Fundo com pedras	0.0400 m < ϵ < 0.1000 m
Fundo com rochas	0.1000 m < ϵ < 0.2000 m
Fundo de concreto:	
Fundo de concreto liso	0.0001 m < ϵ < 0.0005 m
Fundo de concreto inacabado	0.0005 m < ϵ < 0.0030 m
Fundo de concreto antigo	0.0030 m < ϵ < 0.0100 m

Fonte: Adaptado de ABBOT & BASCO (1989).

Sendo assim, o domínio de modelagem da zona costeira da Micro-região Macau possui sedimentos de fundo que variam de cascalho, passando por areia até lama e é apresentado na Figura 4.5, além de ter a presença de recifes. Há o predomínio da fração arenosa sobre toda a área estudada, com incidência de lama próximo a desembocadura dos rios e estuários e presença de cascalho a partir da quebra da plataforma continental.

Baseado nas informações da Tabela 4.1, os valores adotados para a amplitude da rugosidade do fundo serão mostrados na Tabela 4.2 a seguir.

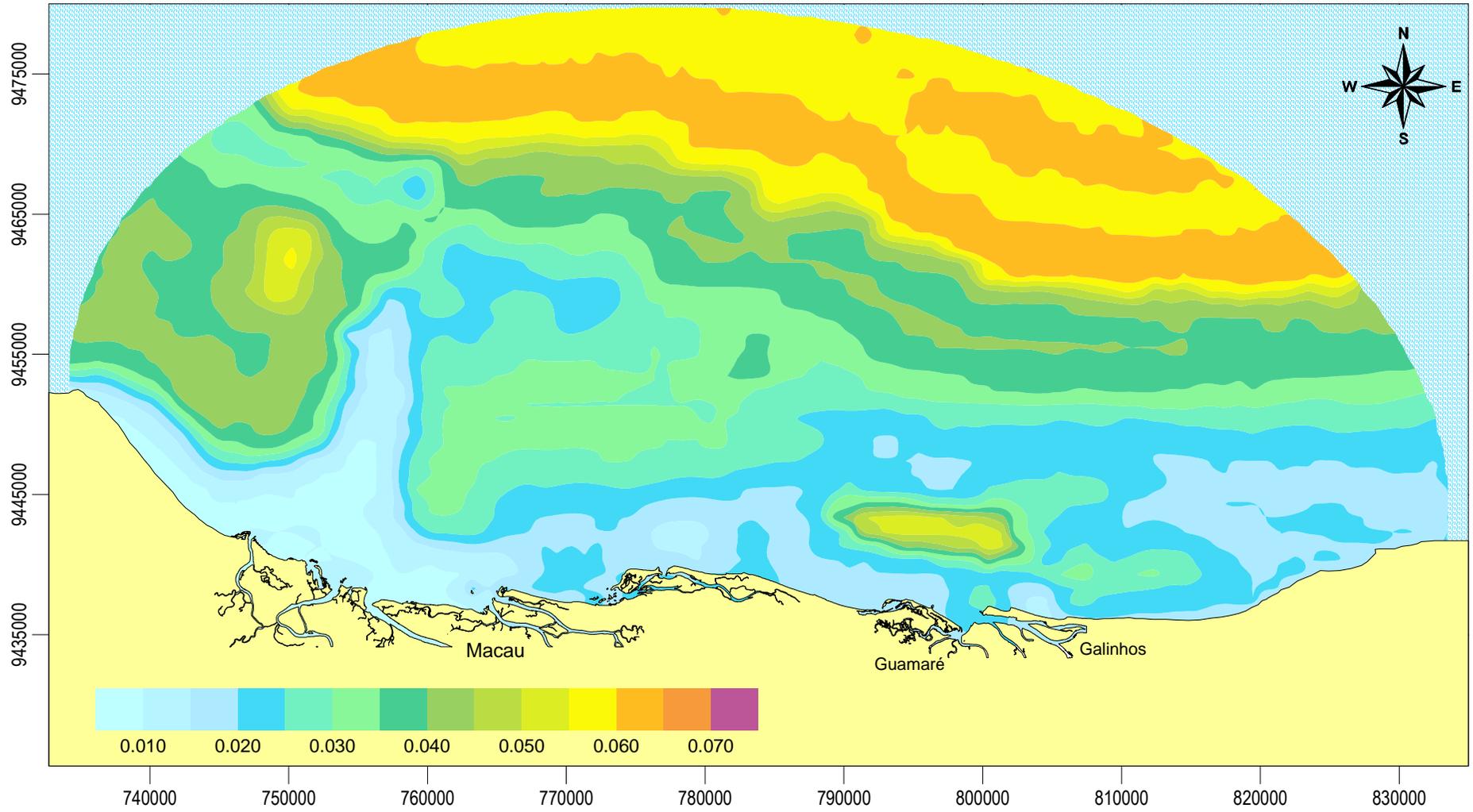


Figura 4.5: Amplitude da rugosidade relativa do fundo da região costeira de Macau e Guamaré a partir da interpolação realizada pelo modelo.

Tabela 4.2: Amplitude da rugosidade equivalente de fundo para a região em estudo.

Granulometria	Amplitude da Rugosidade
Lamas	0.010 m
Areia fina	0.020 m
Areia média	0.030 m
Areia Grossa	0.040 m
Cascalhos	0.060 m

4.6 – MASSA ESPECÍFICA DA ÁGUA E DO AR

A massa específica é considerada constante em todo o domínio de modelagem. Foram adotados os seguintes valores para a massa específica de referência da água e do ar.

$$\rho_{\text{água}} = 1025 \text{ kg/m}^3 \quad / \quad \rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

4.7 – MARÉS

A previsão das alturas de marés é, em geral, feita através de um modelo harmônico, baseado no conhecimento de que a maré observada é a soma de N componentes ou *marés parciais*. Cada uma destas marés apresenta um período característico universal. No entanto, cada uma dessas *marés parciais* tem uma amplitude e uma fase única para um determinado local.

As constantes harmônicas das principais constituintes da maré fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN são obtidas através dos dados retirados de uma estação maregráfica, dentro da região estudada.

Neste estudo, três estações maregráficas estão presentes dentro da região de Macau e Guamaré, porém todas elas estão localizadas dentro dos estuários da região, nenhuma delas na zona costeira. Logo os valores de cada constante harmônica determinada nas estações maregráficas devem ser adaptados para a linha de praia. Por apresentar a menor distância à linha de praia, no intuito de diminuir o erro da adaptação, a estação maregráfica de Guamaré foi a escolhida. Dadas as constantes harmônicas, internamente o modelo hidrodinâmico computa a maré sintética como:

$$\zeta = C_0 + \sum_{i=1}^N A_i \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi t}{T_i} + f_i \right) \quad (4.1)$$

Onde ζ é o nível da maré, C_0 corresponde à cota do nível médio do mar em relação ao nível de referência do modelo, e A_i , T_i e f_i são, respectivamente, a amplitude, o período e a fase de cada uma das N constantes harmônicas utilizadas, descritas na Tabela 4.3.

Considerou-se ainda, as duas estações maregráficas mais próximas e externas à área de estudo – Ponta de Caiçara a leste e Areia Branca a oeste – para se calcular a diferença de fase e definir o ângulo de entrada da onda na fronteira aberta do modelo, tendo em vista que as extremidades costeiras da área modelada estão a aproximadamente 100 km de distância entre elas. O valor encontrado para a defasagem foi de -112,94 segundos no sentido da corrente litorânea, de leste para oeste, ou seja, a onda passa pelo extremo oeste da área modelada 112,94 segundos depois de passar pela extremidade leste. O ângulo de entrada da onda é calculado, internamente pelo modelo, para cada ponto da fronteira aberta.

Tabela 4.3: Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Guamaré, adaptadas à linha de praia.

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
Mtm	789085.39	0.0140	0.1396
Mm	2380713.14	0.0140	0.1745
N2	45570.05	0.1430	2.2165
nu2	45453.62	0.0270	2.2515
M2	44714.16	0.8730	2.5133
M4	22357.08	0.0250	2.7576
T2	43259.28	0.0150	2.9845
S2	43200.00	0.2520	3.0019
K2	43082.04	0.0680	3.0369
O1	92949.63	0.0450	3.4906
MSN2	47258.16	0.0420	3.7699
P1	86637.20	0.0150	4.0492
K1	86164.09	0.0450	4.1015
MSf	1275721.39	0.0180	4.4680

Na Figura 4.6 mostra-se a curva de marés gerada como condição de contorno do modelo hidrodinâmico, a partir das constantes harmônicas da Tabela 4.3. Como pode ser observado, a cada ciclo de aproximadamente 24 horas, ocorrem duas marés de altas ou preamares e duas marés baixas ou baixa-mares, caracterizando uma maré do tipo semi-diurna com desigualdade diária e a amplitude é da ordem de 2,50m.

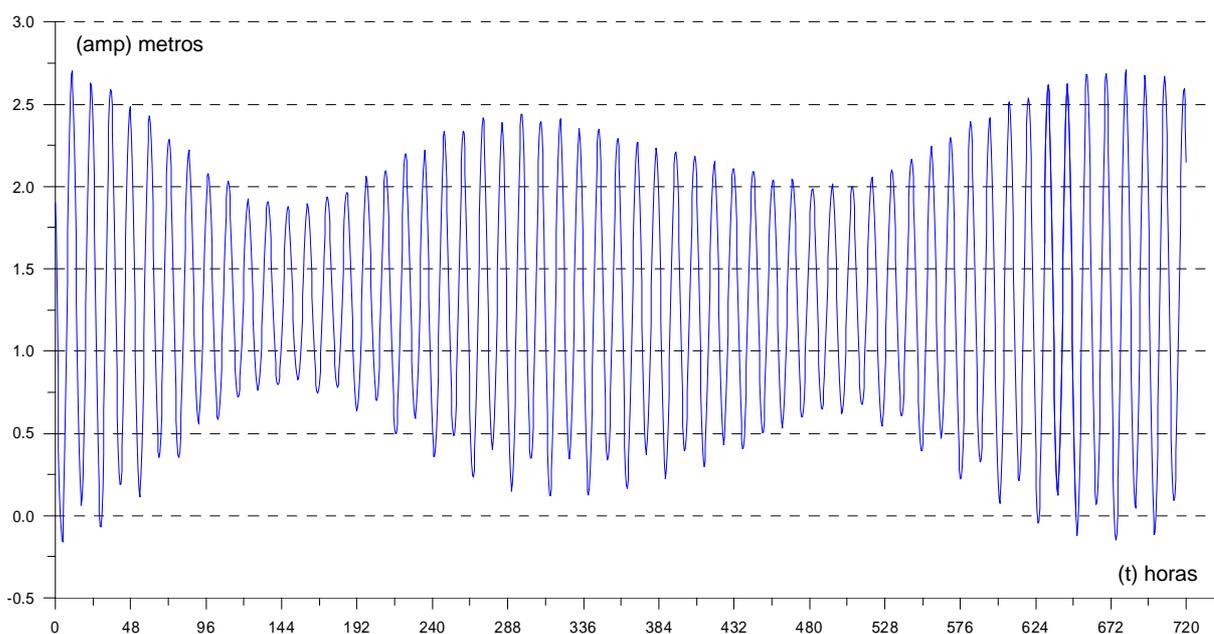


Figura 4.6: Curva de maré astronômica gerada a partir das constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Guimarães operada pela DHN, podendo observar as marés de sizígia e de quadratura para o período de um mês.

4.8 – VENTOS

Os dados de direção e intensidade do vento utilizados na modelagem da circulação hidrodinâmica da zona costeira de Macau e Guimarães foram coletados por uma estação experimental localizada na linha de praia em Macau a uma altura próxima de 6,0 m. Os dados utilizados compõem uma série temporal de medições de velocidade e direção horárias do vento dos anos de 2004 e 2005. A predominância dos ventos NE são mais frequentes no verão, mas ao longo do ano, também são encontrados ventos de SE e de E, não havendo grandes variações na distribuição sazonal das direções, ocorrendo apenas mudanças nas frequências.

O vento usual consiste naquele de maior frequência de ocorrência, enquanto que o vento dominante é o vento cujo produto entre a frequência de ocorrência e a

intensidade é maior. Após a análise dos dados coletados, obteve-se como usual o vento proveniente da direção sudeste com intensidade de 4,0 m/s, já o vento dominante provém da direção nordeste com velocidade de 9,0 m/s, chegando a atingir no período das tardes de janeiro a intensidade de 15,0 m/s.

Para a modelagem dos cenários, tendo como base os mapas de vento das Figuras 4.7 e 4.8, que apresentam em forma de gráfico os dados horários de direção (vetores) e intensidade (cores) dos ventos, foi utilizado para o verão (vento médio do mês de janeiro de 2005), velocidade média de 5,5 m/s, e duas direções de simulação, uma correspondente a situação de ventos dominantes (direção NE) e outra correspondente a situação de ventos mais freqüentes (direção SE). Para a época de inverno, como os ventos dominantes têm o mesmo sentido dos ventos mais freqüentes, foi considerada a velocidade de 3,3 m/s (vento médio do mês de junho de 2005) com direção SE.

4.9 – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para os estudos dos padrões de circulação hidrodinâmica para um modelo 3D, é necessário a definição das condições de contorno horizontais e verticais.

As condições de contorno horizontais se diferenciam em dois tipos: contornos aberto e fechado ou terrestre. Em corpos d'água naturais, o contorno aberto em geral representa um limite de conveniência para o modelo demarcando o domínio em água, mas que não é um limite físico do corpo d'água, e o contorno fechado é em geral associado com fronteiras de terra.

O contorno aberto, representando limites em água, se caracteriza pelo encontro de massas d'água, em geral impõe-se a elevação da superfície livre, que geralmente é o principal forçante, a qual é obtida a partir dos dados de maré. Por ser, a região em estudo, um contorno aberto de grande extensão, existe uma diferença de fase entre seus nós. Ambas vide seção 4.7.

No contorno terrestre, para corpos d'água rasos, como é o caso em estudo, a condição de contorno típica é a especificação da componente da velocidade (U_N) ou de vazão (Q_N) normal ao contorno. Nos trechos terrestres onde existem rios, canais ou pontos de captação/lançamentos, a vazão e/ou a velocidade devem ser forneci-

das para os nós posicionados em suas embocaduras. Nos demais nós de terra, usualmente, se impõe valor nulo.

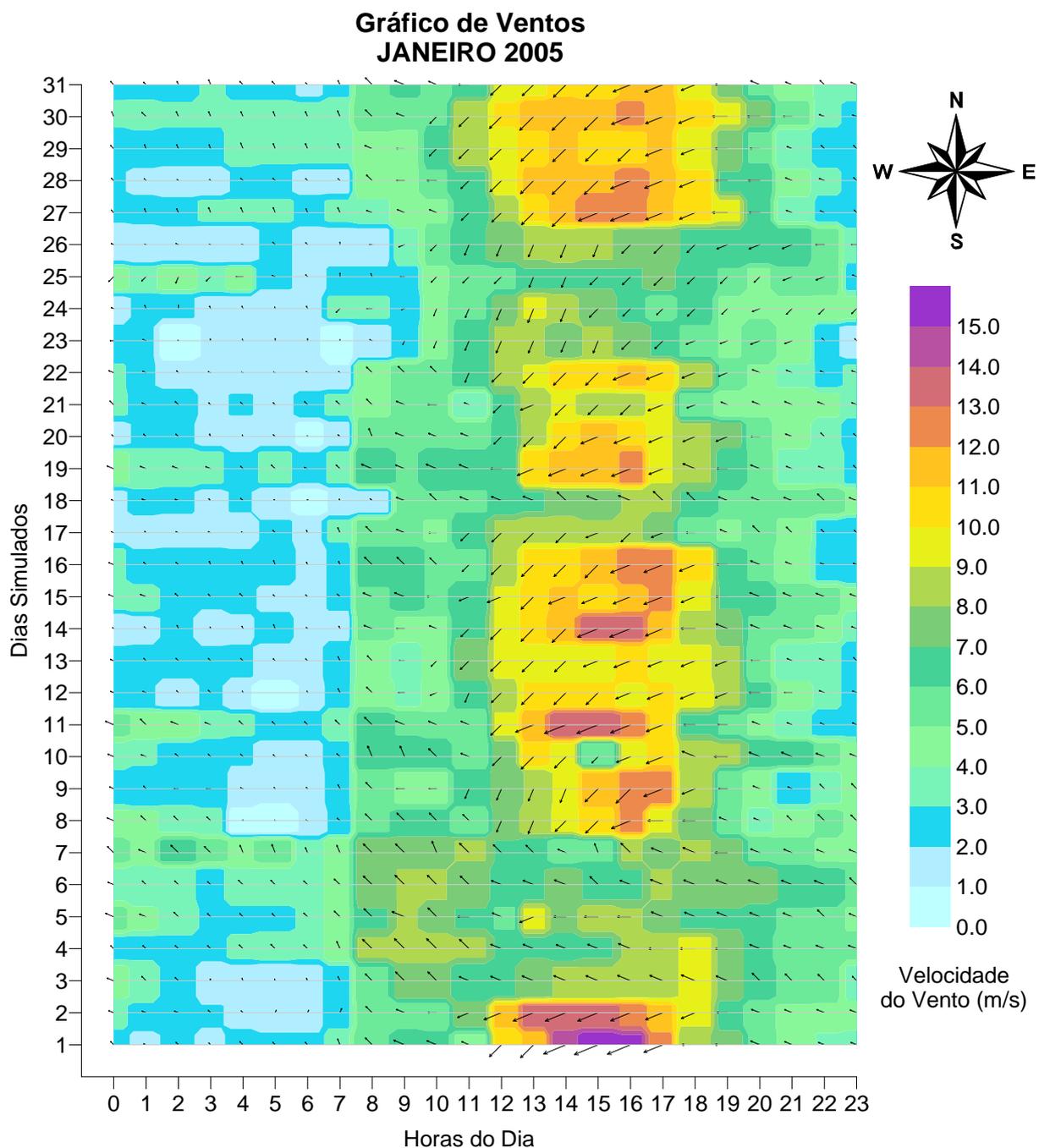


Figura 4.7: Direção e intensidade do vento no mês de janeiro de 2005, representando o vento de verão para a simulação, considerando vento dominante. Percebe-se que os ventos mais fortes ocorrem no horário da tarde na direção NE, com ventos de SE mais fracos no período da madrugada.

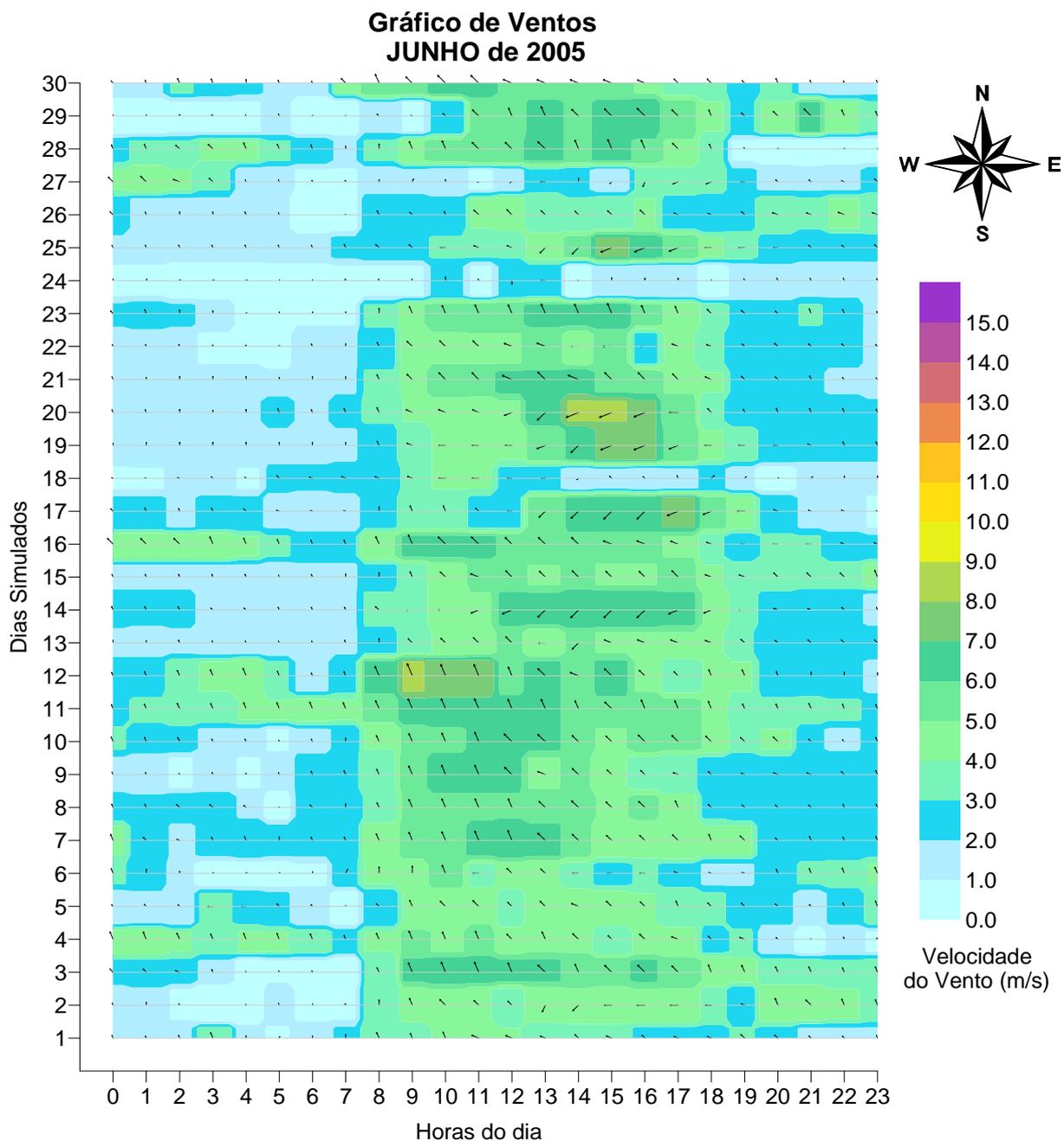


Figura 4.8: Direção e intensidade do vento no mês de junho de 2005, representando o vento de inverno para a simulação, considerando vento reinante. Percebe-se que os ventos da madrugada são quase inexistentes, e que os ventos da tarde não apresentam praticamente mudança de direção.

Para a modelagem da circulação hidrodinâmica da zona costeira de Macau e Guimarães as margens em terra são consideradas como impermeáveis, atribuindo-lhes valor de vazão nulo e não foi considerada a existência de rios afluentes uma vez que a região estudada tem aproximada 4.000 km² de área costeira e os diversos rios e córregos espalhados ao longo dos estuários contribuem com pequenas vazões, além de se comportarem, na maioria dos casos, de forma intermitente. Dessa forma os estuários ao longo da costa receberam, nos nós de suas embocaduras, valores de taludes variando entre 500 e 2.000m, que representam, para o modelo hidrodinâmico, o comportamento de canais de marés.

As condições de contorno para o módulo vertical no modelo 3D, referem-se à superfície livre e ao fundo. A condição de contorno no fundo é a imposição da velocidade nula. Na superfície livre, a condição é a prescrição da tensão do vento.

4.10 – CONDIÇÕES INICIAIS

Para a simulação 3D da circulação hidrodinâmica através do SisBAHIA[®] é necessário fornecer apenas as condições iniciais 2DH. Assim, para o instante inicial de simulação (t_0), os valores da elevação da superfície livre (ζ) e as componentes da velocidade 2DH (U e V), para todos os nós do domínio, necessitam ser fornecidas. A partir desses valores 2DH promediados na vertical, da velocidade do vento e da rugosidade equivalente do fundo, o modelo gera automaticamente as condições iniciais para o módulo 3D.

Buscando-se estabelecer condições iniciais para a simulação de 30 dias, foi realizada uma simulação prévia de 03 dias com ‘partida fria’. Tal termo refere-se a uma condição inicial com nível plano e velocidades nulas. Foi adotado um nível plano equivalente à preamar de uma maré de sizígia, com valor igual a 1,90m, a fim de evitar que o modelo apresentasse áreas secas. Esse tempo foi necessário para que o modelo entrasse em regime. Os resultados desta simulação prévia geraram as condições iniciais para uma ‘partida quente’, com ζ_0 , U_0 e V_0 variados no domínio.

5. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO

Neste capítulo estão apresentados os cenários modelados no estudo do espalhamento de nuvens de partículas e a caracterização da região fonte, necessários à aplicação do Modelo Lagrangeano do SisBAHIA[®].

5.1 – CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

De forma a se obter uma análise diferenciada pelo regime de ventos atuantes, assim como por produtos de características distintas que podem ser pequenos ou grandes vazamentos imediatos ou vazamentos críticos contínuos com a utilização de óleo leve e óleo pesado, foram definidos cenários de simulação dando continuidade a numeração dos cenários já apresentados.

Os cenários do 3 ao 8, do 23 ao 28 representam os derrames ocorridos numa *plataforma* distante *03 km* da praia no verão e no inverno respectivamente. Em seguida, os cenários do 9 ao 14, do 29 ao 34 representam os derrames ocorridos num *duto* distante *05 km* da praia, respectivamente para o verão e o inverno, bem como os cenários do 15 ao 18, do 35 ao 38 que representam os derrames ocorridos num *duto* distante *15 km* da praia para o verão e o inverno respectivamente. Por fim os cenários do 19 ao 22, do 39 ao 42 representam, respectivamente, os derrames de verão e de inverno numa *plataforma* distante *25 km* da praia. Esses quatro possíveis pontos de derramamento representam as plataformas mais próxima e mais distante da linha de praia, bem como os pontos de interseção de tubulações nos dutos que podem ser pontos potenciais de ocorrência de vazamentos.

A seguir será apresentada uma tabela mostrando todos os cenários de simulação descritos acima.

me. Partindo da região fonte, a mancha de óleo é transportada pelos forçantes hidrodinâmicos, pelo vento e pelo campo de correntes.

Após o derrame, o óleo começa a se espalhar, mesmo que o meio esteja em repouso. Chama-se esse espalhamento inicial de espalhamento mecânico e é o considerado para determinar a região fonte. Existe outro espalhamento que é acrescido quando o óleo é despejado em um corpo d'água em movimento, decorrente do transporte por advecção e difusão turbulenta no meio físico receptor. Esse processo advectivo-difusivo é tratado diretamente pelo modelo de transporte do SisBAHIA®.

Para a análise de espalhamento mecânico da curva de decaimento do óleo (Figura 5-1), foi utilizado o software: ADIOS2, desenvolvido pela NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – USA) que é bastante utilizado na modelagem devido sua simplicidade de descrição e aceitação comprovada.

Neste estudo, o lançamento do óleo foi realizado através de uma fonte circular de 200 m², de onde foram simulados três tipos de derrames distribuídos em quatro fontes dentro da região de maior probabilidade de ocorrência. Todos esses derrames foram simulados durante um período de 30 dias para que pudesse completar um ciclo de maré (~28 dias), de forma a obter-se uma análise probabilística no tempo do risco representado pela ocorrência da mancha de óleo na região, definidos na Tabela 5.2. Todos os derrames foram calculados para os ventos de verão e de inverno.

Tabela 5.2: Tipos de derrames e suas fontes. Vale observar que para cada fonte foram simulados ventos de verão e de inverno, com óleos leves e pesados.

Fonte	Local	Tipo - Porte	Volume óleo (m ³)	Tempo derrame (min)	Vazão (m ³ /s)
Aratum_3	Plataforma – 3 km	Instantâneo - Pequeno	8	20	0.00666
	Plataforma – 3 km	Instantâneo - Grande	200	20	0.16666
Ubarana_5	Plataforma – 3 km	Contínuo	200	3 dias	0.00077
	Coletor – 5 km	Instantâneo - Pequeno	8	20	0.00666
	Coletor – 5 km	Instantâneo - Grande	200	20	0.16666
Ubarana_15	Coletor – 5 km	Contínuo	200	3 dias	0.00077
	Coletor – 15 km	Instantâneo - Grande	200	20	0.16666
	Coletor – 15 km	Contínuo	200	3 dias	0.00077
Agulha_25	Plataforma – 25 km	Instantâneo - Grande	200	20	0.16666
	Plataforma – 25 km	Contínuo	200	3 dias	0.00077

5.4 – CURVA DE DECAIMENTO DO ÓLEO

Os óleos são definidos como leves e pesados através de sua viscosidade: quanto maior a viscosidade do óleo, mais pesado ele é. Os óleos são diferenciados pela sua densidade, através do parâmetro API, que serviu de base para a escolha dos óleos que foram utilizados para a simulação dos diferentes cenários de derramamentos. Quanto menor o valor API, mais características de óleo pesado o produto derramado possui e quanto mais pesado o óleo, menor é sua taxa de evaporação. Dessa forma, os óleos pesados apresentam uma condição desfavorável na razão de mobilidade água-óleo. Óleos pesados são aqueles com API entre 14 e 19.

A proporção é inversa para os óleos leves, aqueles que são menos viscosos e com elevados valores de API, que possuem uma taxa de evaporação maior e são mais favoráveis na razão mobilidade água-óleo. Os óleos determinados para as simulações serão mostrados em comparativo na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.3: Tipos de óleos utilizados para a simulação dos cenários.

Óleo	Tipo	API	Massa Específica (kg/m ³)	Viscosidade (CST)
Bachequeiro Heavy	Pesado	14.0	972	1676
Diesel Fuel Oil (USA)	Leve	37.6	826	27

Existe uma perda de massa do óleo, à medida que as manchas são transportadas pelas correntes ao longo do tempo. Essas perdas existem devido a dois fatores principais: a evaporação e a dispersão de gotículas na coluna d'água. Sob condições de ventos fortes e ondas, pode-se ainda ocorrer, eventualmente, um processo de emulsificação. As gotículas dispersas ocasionalmente agregam partículas sólidas existentes em suspensão no meio e quando ficam mais densas que a água tendem a depositar-se no fundo.

Com o passar do tempo a mancha de óleo se espalha e aumenta a sua área de exposição diminuindo assim a sua espessura e isso leva ao aumento da taxa de evaporação. Por outro lado, por se tratar de uma substância composta, na mesma proporção da diminuição da película de óleo, apenas os voláteis mais pesados continuam em contato com a água, o que tende a diminuir a taxa de evaporação. Assim sendo, as melhores estimativas levam em conta os aspectos físico-químicos do óleo e da água, além da intensidade dos ventos, correntes e agitação das ondas.

O programa ADIOS2 considera todos esses parâmetros definidos acima e suas estimativas de perda de massa são aceitas internacionalmente como confiáveis. Por considerar as complexidades dos óleos, as curvas definidas pelo ADIOS2 (frequentemente utilizadas para estes tipos de simulações) são bem testadas e representam um bom modelo de decaimento da massa do óleo.

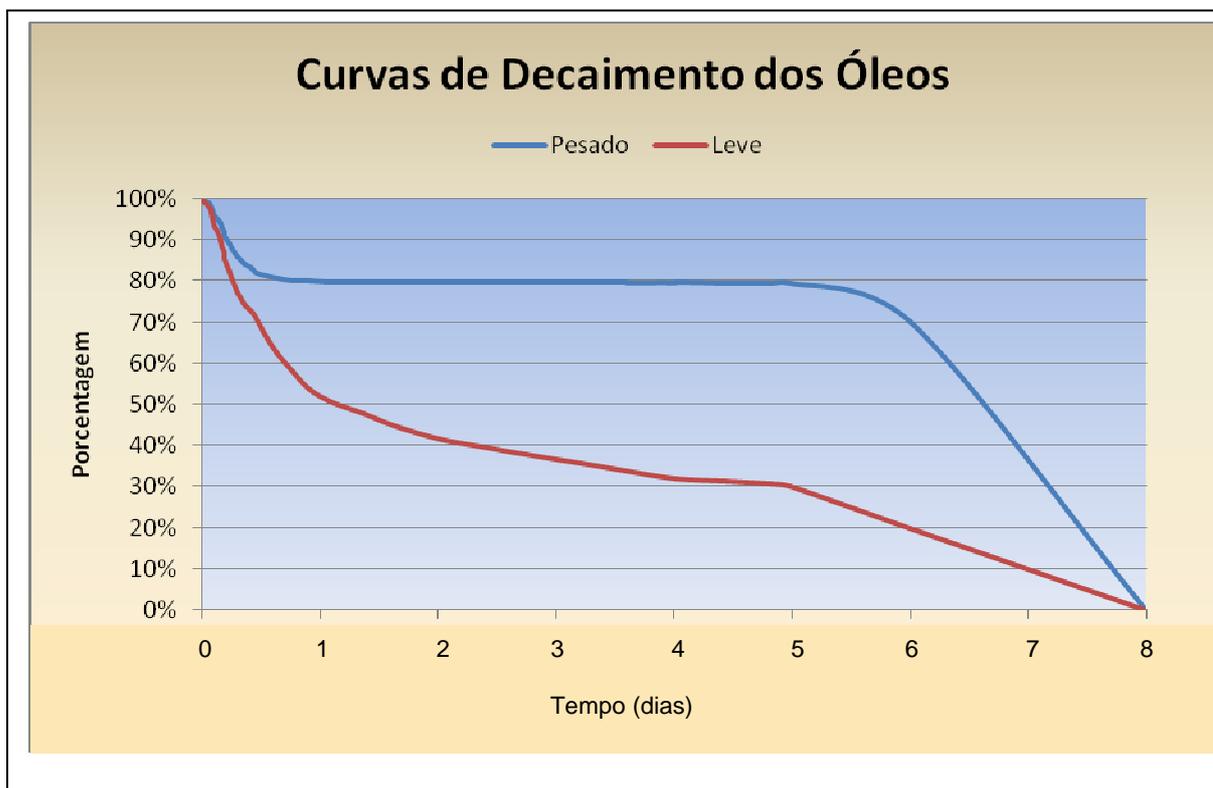


Figura 5-1: Curvas de decaimento dos óleos geradas pelo ADIOS2 e utilizados nas simulações.

As curvas geradas pelo programa ADIOS2 mostram uma tendência de estabilização do processo de decaimento do óleo após, aproximadamente, 5 dias decorridos do instante do derrame. Para que este processo possa ser reproduzido pela ferramenta de modelagem utilizada para o transporte de partículas, SisBAHIA[®], ambas as curvas devem ser digitalizadas de forma a se obter uma tabela de valores no formato de dados de entrada requerido pelo modelo. Além disso, deve-se estender estes valores até que a porcentagem de óleo remanescente na água seja nula, de forma que o modelo tenha fim, já que a quantidade de óleo remanescente após um determinado tempo, tomado aqui como 8 dias após o derrame, não será significativa.

6. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à modelagem proposta pelo SisBAHIA[®]. Para melhor entendimento desses resultados eles são apresentados em duas etapas: a primeira fará referência à modelagem dos padrões hidrodinâmicos (seção 6.1) na área estudada e a segunda etapa fará referência aos resultados do estudo das plumas contaminantes pelo óleo derramado (seção 6.2) em seus vários cenários simulados que serão descritos mais detalhadamente a seguir. Devido ao grande número de cenários de simulações de plumas contaminantes já descritas no Capítulo 5, serão apresentados e discutidos apenas os cenários que se mostraram mais importantes e mais críticos para os objetivos do trabalho. Em caso de alguma exceção, um detalhamento será apresentado para que possa ser discutido. O objetivo desta análise é mostrar alguns tipos de resultados que podem ser obtidos através do SisBAHIA[®] e que podem contribuir para um planejamento estratégico de gestão ambiental no combate ao derramamento de óleo na área estudada. Vale ressaltar que existem outras diferentes análises que podem ser feitas de acordo com o critério que se deseja analisar. Tais casos serão propostos ao final deste trabalho. Com a apresentação destes resultados espera-se contribuir para a definição de procedimentos operacionais de resposta para um caso de derrame acidental em três perspectivas de intensidade (pequeno, grande e crítico contínuo), tais como procedimentos para a contenção da mancha de óleo; proteção de áreas vulneráveis; limpeza das áreas atingidas; proteção da população que vive e trabalha na praia; etc.

6.1 – MODELO HIDRODINÂMICO

Para discernir sobre a modelagem hidrodinâmica, dois cenários foram determinados no Capítulo 4 e serão apresentados aqui em suas marés de sizígia e de quadratura nos momentos de preamar e baixamar. São eles:

Cenário 1) Padrões de correntes gerados pela maré astronômica com vento de verão;

Cenário 2) Padrões de correntes gerados pela maré astronômica com vento de inverno.

Neste estudo aplicou-se o modelo 2DH para a avaliação do comportamento médio das correntes e a previsão das elevações da superfície livre e adotou-se a solução analítico-numérica 3D (em 21 níveis) para a obtenção dos perfis de velocidade no escoamento horizontal.

Na proposta de apresentar duas situações distintas, utilizou-se o período de verão – que apresenta velocidade média do vento de 5,5 m/s – e o período de inverno – que apresenta ventos com velocidade média de 3,3 m/s. Para o verão existe a incidência de ventos dominantes (de maior intensidade) com direção NE e ventos usuais (mais freqüentes) com direção SE e para o inverno a incidência dos ventos dominantes e usuais são a mesma, a direção SE.

Os resultados referem-se a zona costeira frontal à micro-região Macau, situada entre as coordenadas de 4° 57,2' S e 36° 53,2' W a 5° 03,0' S e 36° 00,0' W. Considerando-se que as situações apresentadas são as mais críticas dentre as correntes geradas por maré com ventos usual e dominante para os períodos de sizígia e quadratura nos instantes de preamar e baixamar, os resultados apresentados neste trabalho correspondem ao campo de elevações (seção 6.1.1) e de velocidades (seção 6.1.2), farão referência aos cenários de:

- Verão com ventos dominantes de NE;
- Inverno com ventos de SE;
- Sizígia no instante de preamar; e
- Quadratura no instante de baixamar.

6.1.1 – ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Por estar dividido em 21 níveis no modelo 3D, a elevação do nível do mar será representativa apenas na camada da superfície. Esta sofrerá, além do forçante da corrente marítima, o forçante dos ventos. Para o modelo 2DH o resultado da elevação não será apresentado, pois também é dado na camada de superfície, logo se comparado ao resultado do modelo 3D, serão exatamente iguais.

Vale salientar que, tendo por objetivo permitir uma melhor visualização dos resultados, as escalas de elevações dadas em metros (m) das figuras são diferentes e fazem referência ao nível médio, de 1,90 m, atribuído durante a modelagem.

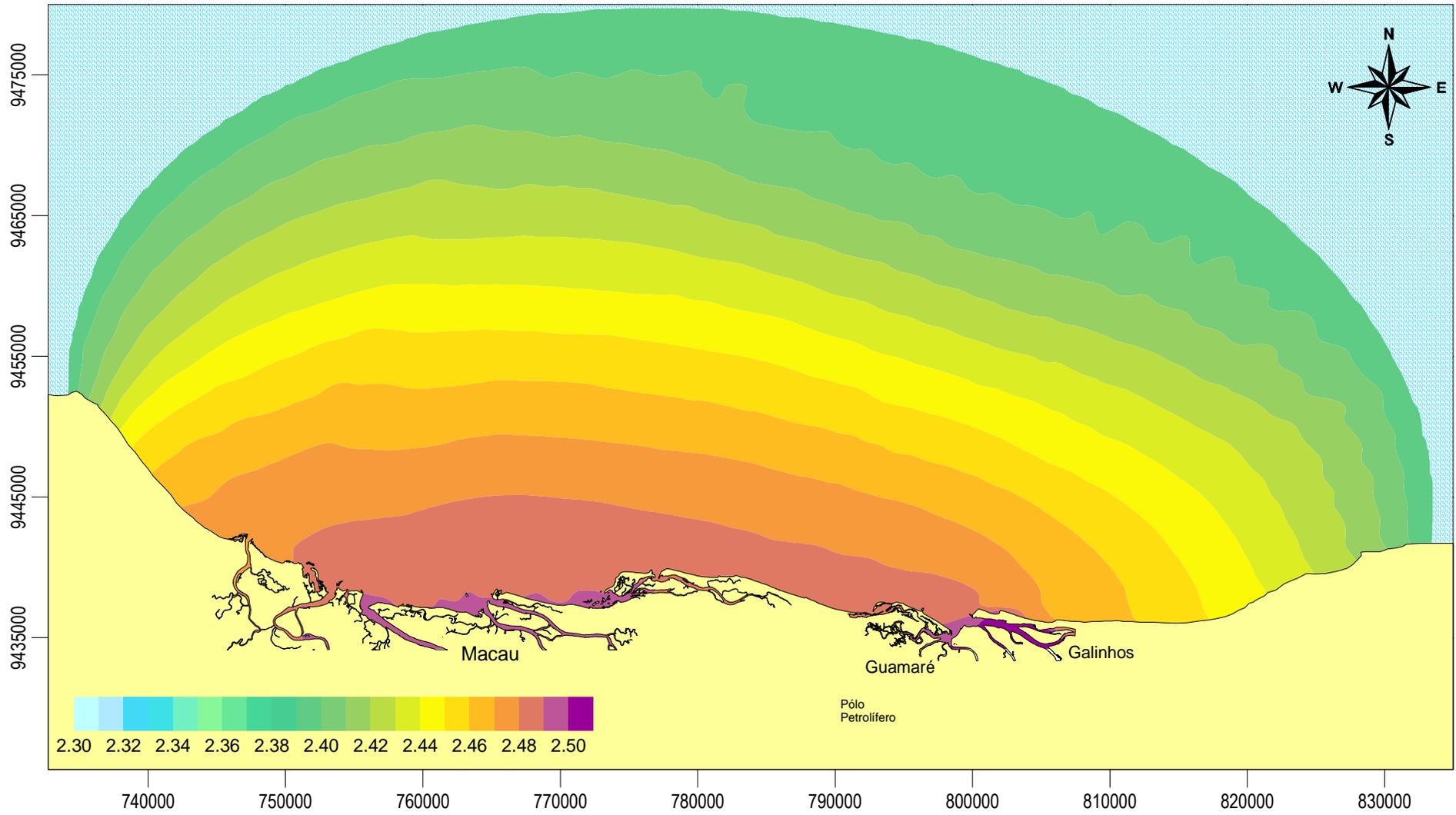


Figura 6-1: Cenário 1 – Elevação, na camada da superfície, da preamar de sizígia de verão 3D com vento dominante de NE.

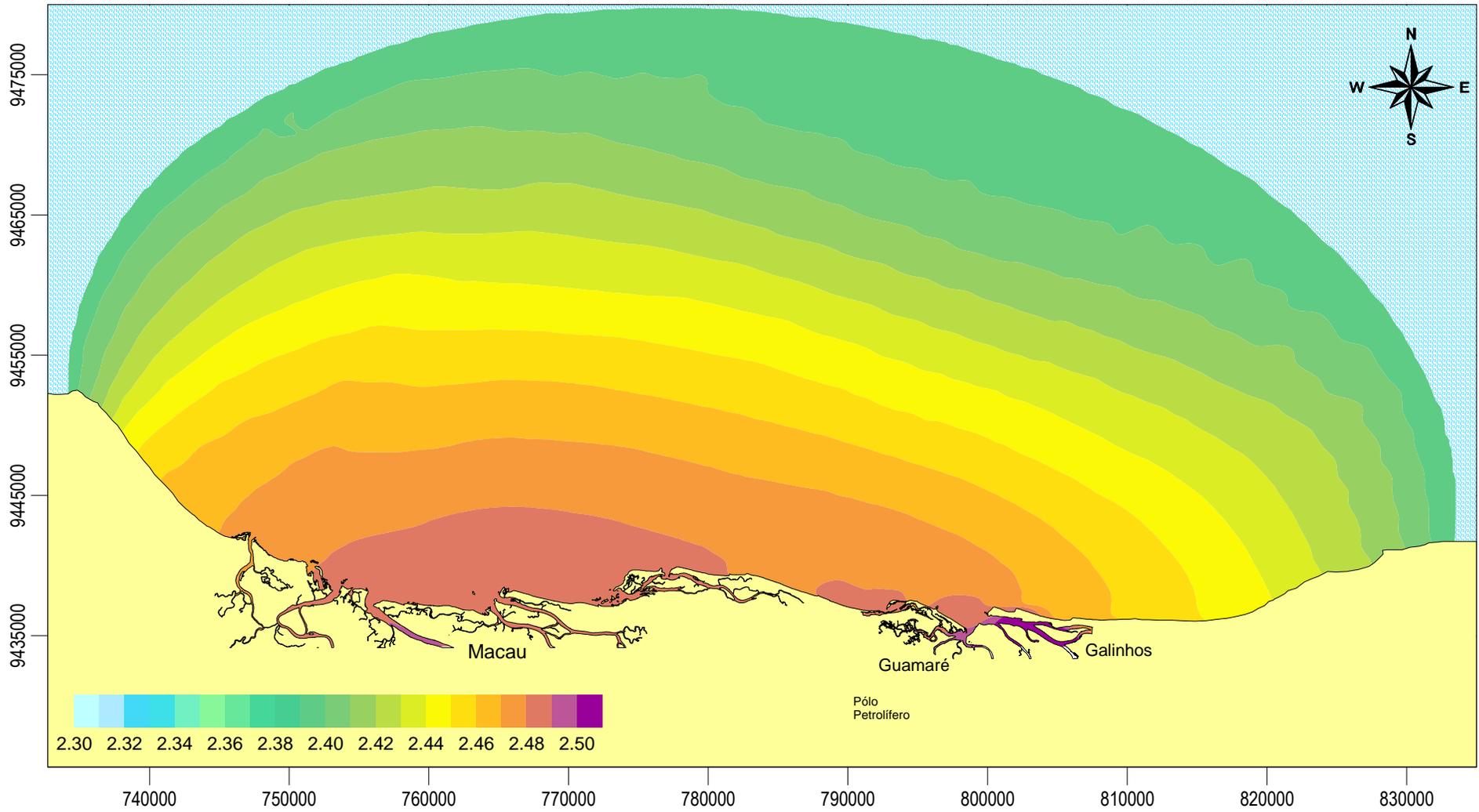


Figura 6-2: Cenário 2 – Elevação, na camada da superfície, da preamar de sizígia de inverno 3D com vento de SE.

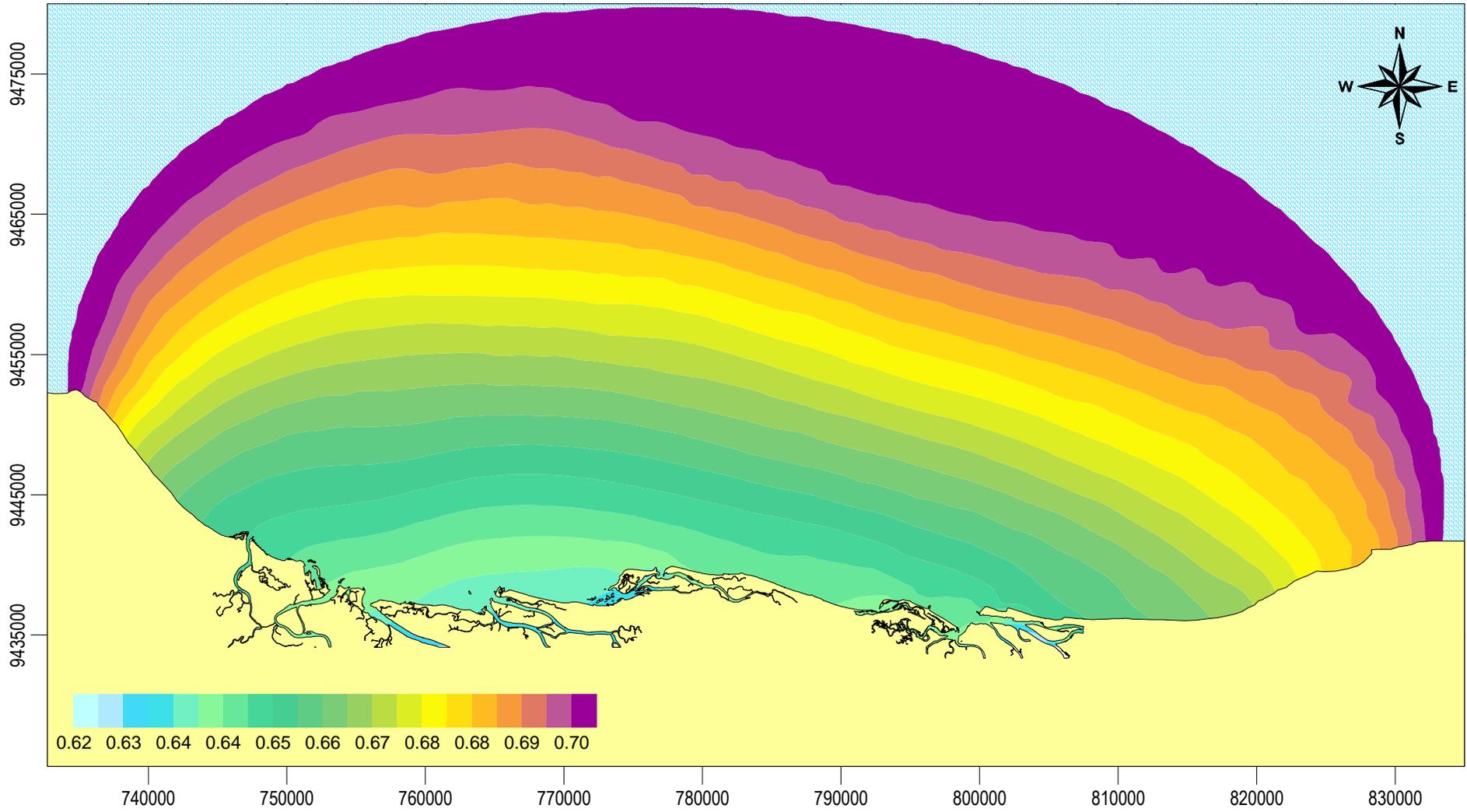


Figura 6-3: Cenário 1 – Elevação, na camada da superfície, da baixamar de quadratura de verão 3D com vento dominante de NE.

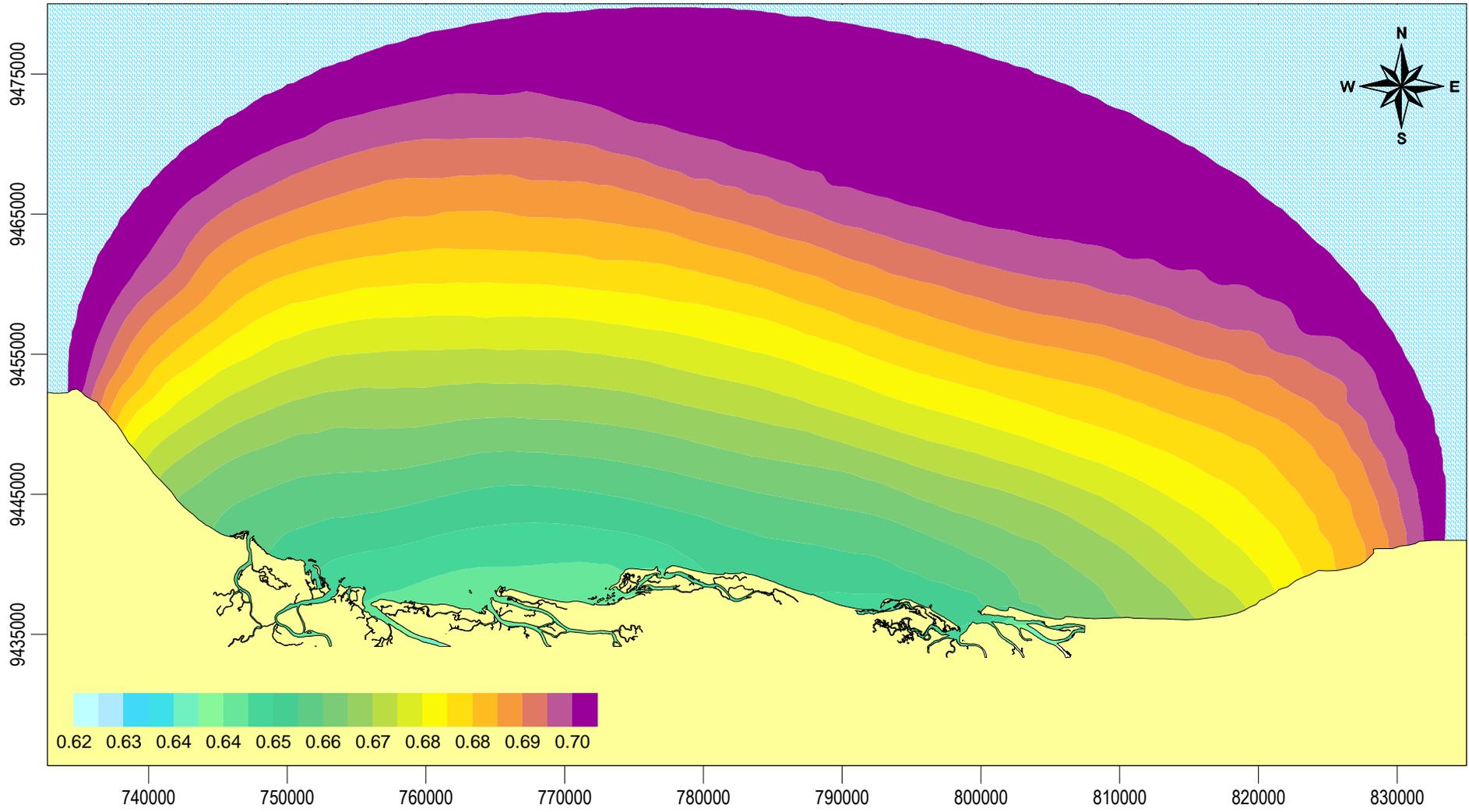


Figura 6-4: Cenário 2 – Elevação, na camada da superfície, da baixamar de quadratura de inverno 3D com vento de SE.

Observando as Figuras 6-1 e 6-2 que mostram as elevações da superfície para um mesmo instante de preamares de sizígia para o verão e para o inverno, respectivamente, percebe-se que nesse instante o forçante da maré de enchente, que direciona o fluxo da maré para a faixa de praia, determina os maiores níveis de elevação na linha de costa, próximo às entradas dos estuários. Essa elevação chega ao valor máximo (comparado ao nível médio de 1,90 m) de 2,50 m, enquanto que na fronteira de mar o modelo atinge 2,38 m de elevação. Percebe-se que ao longo de toda a extensão da profundidade essa elevação é muito sensível, tendo em vista que o modelo apresenta uma variação de apenas 0,12 m ao longo de aproximadamente 40 km.

A maior diferença entre essas duas figuras pode ser observada claramente próximo à linha de costa, onde a escala de cores da elevação se mostra mais acentuada no verão que atinge um valor de 2,50 m praticamente dentro de todos os estuários e numa faixa de praia que atinge aproximadamente 50 km, enquanto que no inverno a elevação máxima chega a 2,48 m em duas faixas de praia menores localizadas na linha frontal aos municípios de Macau e Guamaré. Isso se dá devido à existência dos ventos dominantes (mais intensos) de verão, que são os ventos de NE, que em determinado dia medido chega a atingir valores de 15,0 m/s, que promovem o empilhamento de um maior volume de água na costa da área em estudo, em contrapartidas aos ventos de inverno (de menor intensidade) que têm a direção SE.

As figuras que tratam dos instantes referentes as baixamares de quadratura de verão e de inverno, Figuras 6-3 e 6-4 respectivamente, mostram uma variação ainda menor que nas figuras de marés de sizígia. Neste caso, devido ao instante de maré vazante, percebe-se que o empilhamento da elevação ocorre agora em sentido contrário ao das figuras anteriores, ou seja, na linha de praia a elevação é menor que na fronteira de mar do domínio modelado. Os valores para a maré de quadratura de verão atingem um valor máximo de 0,70 m de elevação (quando comparado com o nível médio de 1,90 m) e um mínimo de 0,63 m dentro dos estuários. Enquanto que na maré de quadratura de inverno a variação da elevação foi menor, com mesmo valor máximo de 0,70 m e valor mínimo de 0,64 m. Essa diferença só é visível devido as cores apresentadas pelo modelo. Neste caso podemos afirmar que o maior forçante atuante neste cenário é a maré e não dos ventos, pois apesar de no ve-

rão os ventos dominantes serem de NE, os ventos mais freqüentes são os ventos de SE que podem atingir 8,0 m/s.

6.1.2 – CORRENTES

Para os padrões de correntes, as camadas mais representativas do modelo 3D são: a primeira camada logo abaixo da superfície, pois não sofrerá influência dos ventos; e a penúltima camada antes do fundo, pois no fundo a circulação tende ao valor zero e deve ser desprezada.

Como o trabalho trata da contaminação por óleo, essa substância fica sempre disposta entre a superfície e a primeira camada logo abaixo da superfície, portanto esta é a camada abordada nos resultados a seguir.

Os vetores em vermelho representam os resultados de verão, enquanto que os vetores em azul representam os resultados de inverno. Eles apontam a direção do fluxo das correntes no mesmo instante do cenário bem como a proporção do tamanho de cada vetor representa a variação da intensidade desse mesmo fluxo de corrente.

Os valores determinados pelo modelo 2DH são valores promediados na vertical com uma localização aproximada a 80,0% da altura da lâmina d'água. Portanto ao ser comparado ao modelo 3D de 21 camadas, sendo a 1ª camada representada pela superfície e a 21ª camada representada pelo fundo, o modelo 2DH apresentaria uma aproximação dos valores relativos à 3ª camada. Dessa forma os resultados apresentados pelos vetores 2DH aproximam-se bastante do resultado apresentado na primeira camada abaixo da superfície (2ª camada) do modelo 3D, em direção e intensidade. Estes resultados são apresentados nas Figuras 6-5 e 6-6.

No modelo 2DH (discutido aqui apenas em texto, não em figuras), verifica-se que na situação de baixamar (verão e inverno) acontece a formação de um grande vórtice na zona frontal a Macau cujos efeitos se refletem entre os limites do domínio modelado e a zona frontal de Galinhos. Verifica-se também que no inverno o vórtice se desloca para oeste da área.

Já na preamar de sizígia e quadratura (verão e inverno), acontece a formação de um vórtice frontal a Galinhos, o qual é mais pronunciado nos períodos de verão e se estendem a profundidades de 30 m na sizígia e 5 m na quadratura. Na zona frontal a Macau o vórtice formado na preamar não é verificado.

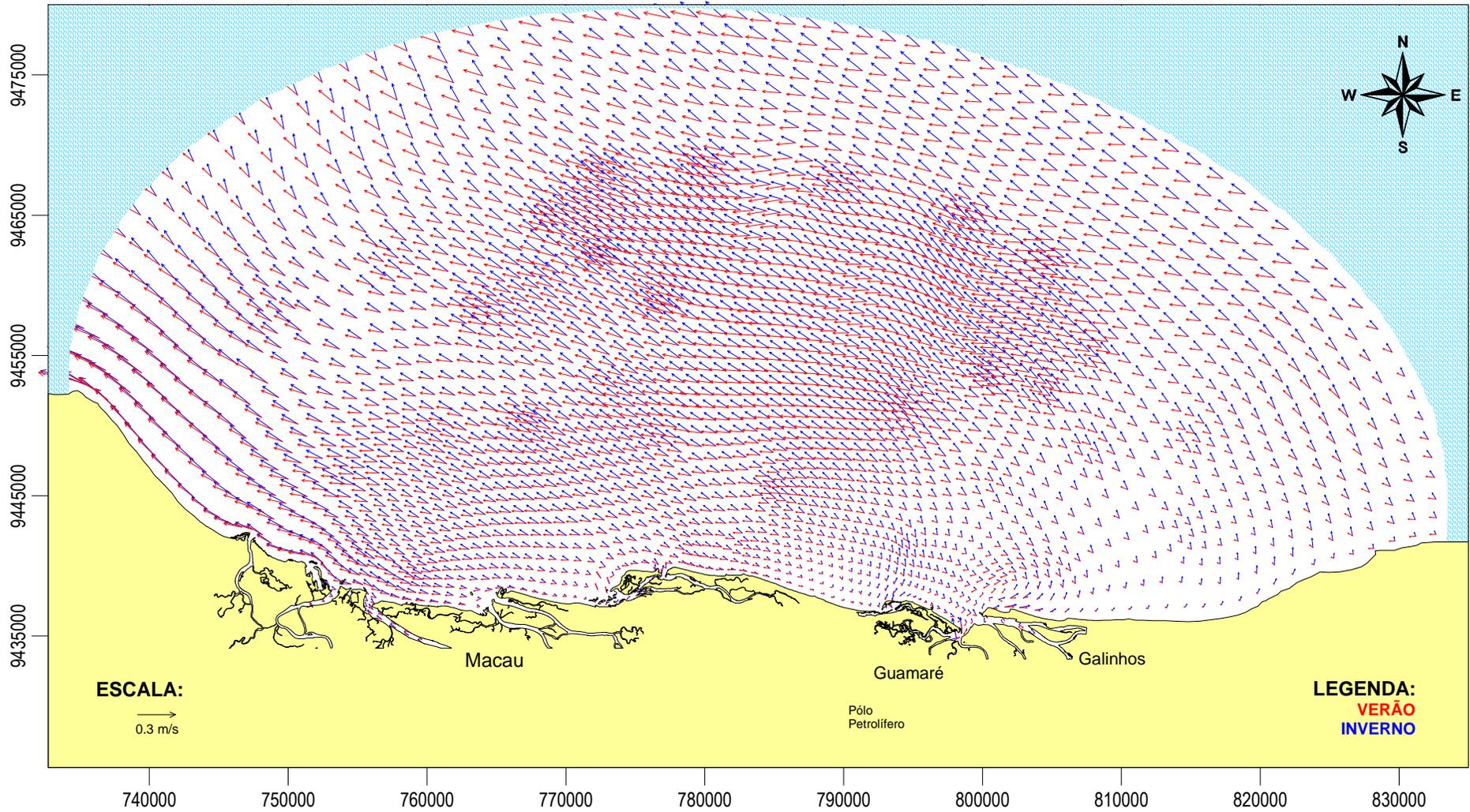


Figura 6-5: Vetores de velocidades das preamaras de sizígia de verão e de inverno na primeira camada abaixo da superfície.

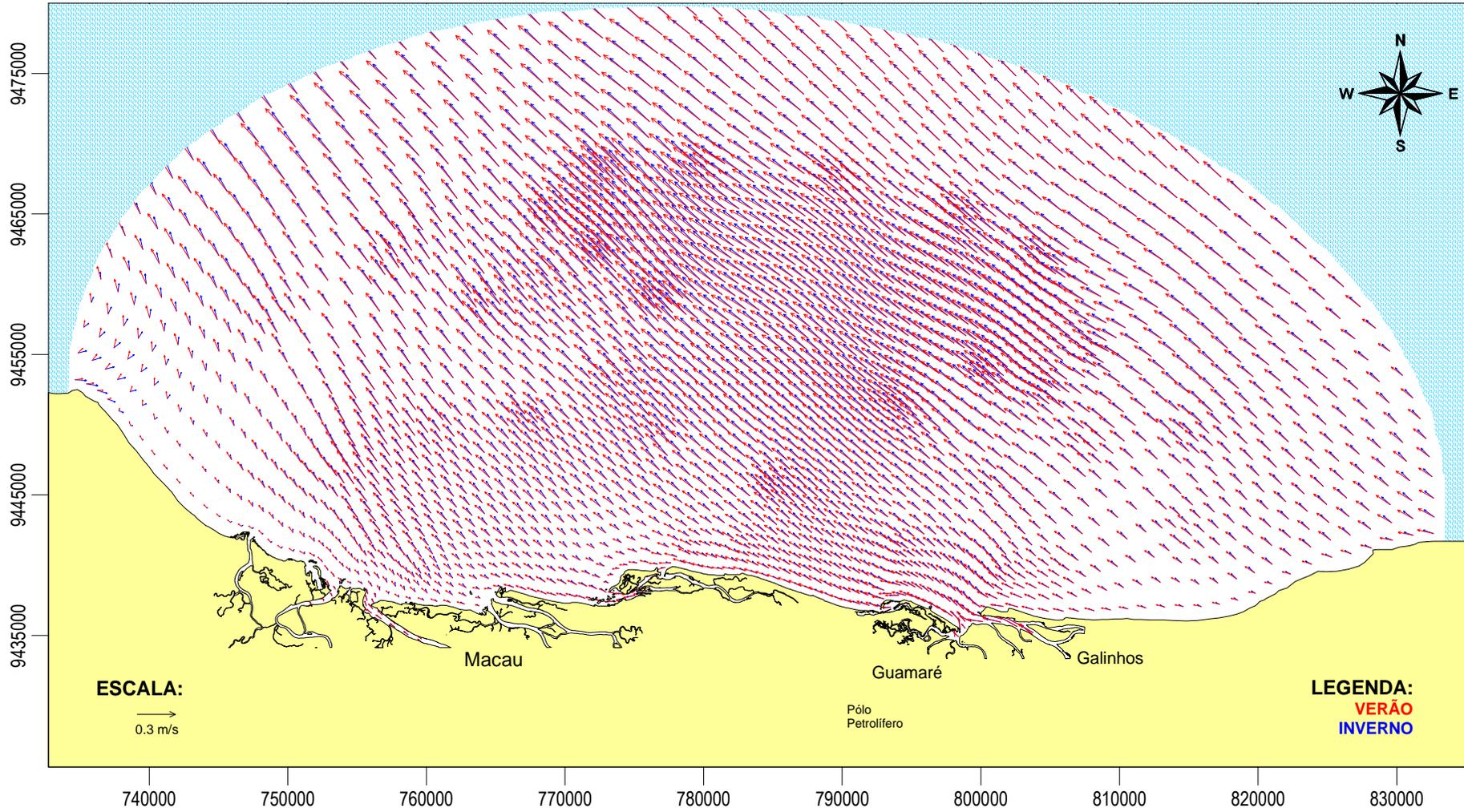


Figura 6-6: Vetores de velocidades das baixamores de quadratura de verão e de inverno na primeira camada abaixo da superfície.

Na Figura 6-5 que representa o comparativo entre os vetores de velocidade das preamares de sizígia de verão e de inverno demonstram que existe uma grande variação de direção entre eles. Os vetores de verão têm uma direção predominantemente E em toda a região, enquanto os vetores de inverno têm uma direção SE, em ambos surge um vórtice acentuado em frente a Galinhos. Essa diferença de direção pode ser determinada pela influência dos ventos nos períodos, uma vez que os ventos de inverno são dominantes e mais freqüentes na direção SE, enquanto os ventos de verão apresentam uma maior freqüência também de SE, mas possui uma dominância dos ventos de NE. Percebe-se ainda que a intensidade dos vetores é bastante proporcional entre os períodos, com valores muito baixos próximo a costa e crescentes em direção a região central e a fronteira aberta.

O comparativo entre os vetores de velocidade das baixamars de quadratura de verão e de inverno, apresentadas da Figura 6-6, demonstra que a direção e a intensidade dos vetores é praticamente a mesma, com uma leve diferença de direção a extremo oeste do modelo, diferentemente do observado no cenário de sizígia. Este resultado foi assim apresentado pelo fato de no instante do pico da baixamar de quadratura de verão, os ventos incidentes eram os ventos mais freqüentes e de menor intensidade de SE. Assim sendo, ambos os vetores (neste cenário) apresentam a mesma direção de SE em toda a sua área. Quanto a sua intensidade, podemos notar que os vetores de inverno apresentam um valor proporcional de 80% dos vetores de verão, fato esse definido pela intensidade dos ventos de inverno ser menor que a intensidade dos ventos de verão.

6.2 – MODELO DE TRANSPORTE DE PLUMAS CONTAMINANTES

Os cenários do modelo de transporte de contaminantes aqui apresentados mostrarão os resultados da modelagem probabilística, que caracterizam bem o provável comportamento e destino do óleo derramado nos vários cenários simulados.

Em seguida é feita uma análise dos resultados finais quanto à extensão de praia que pode ser atingida pelo vazamento das várias fontes possíveis.

Por fim são apresentadas as seqüências de evolução da mancha de óleo para o caso do derramamento acidental mais crítico, adotando como critério de criticidade

o tempo até o toque na costa. Tendo em vista a determinação das orientações para a definição dos procedimentos operacionais de resposta para esse derrame.

Nesse estudo foram propostos quatro (04) possíveis pontos de derramamento localizados na plataforma de petróleo distantes 03 km e 25 km da costa e dois pontos localizados em dutos que transportam o óleo retirado das plataformas para o pólo petrolífero de Guamaré, no continente, distantes 05 km e 15 km da costa. Esses pontos foram escolhidos para representar as plataformas mais próxima e mais distante da linha de praia e os pontos dos dutos escolhidos foram pontos de interseção de tubulações e que podem ser pontos potenciais de ocorrência de vazamentos.

Para cada ponto de possível ocorrência de vazamento de óleo (descrito acima) foi aplicado três tipos de derrames: **a)** um derrame de pequeno porte, representado por um vazamento de 08 m³ de óleo num intervalo de tempo de 20 minutos; **b)** um derrame de grande porte, representado por um vazamento de 200 m³ de óleo num intervalo também de 20 minutos; e, **c)** um derrame crítico, representado por um vazamento de 200 m³ de óleo num intervalo de 03 dias. Esses três tipos de derrames foram escolhidos para que pudessem representar as várias possibilidades de gravidade do derramamento de óleo e também o quanto cada um deles pode interferir, poluir e afetar o meio ambiente em estudo.

Outra variável foi colocada em estudo: o tipo de óleo. Determinado em duas possibilidades: **a)** um óleo leve, e **b)** um óleo pesado, para que fosse comparada qual a influência que a viscosidade do óleo extraído das plataformas têm sobre os resultados.

Por fim, os resultados são determinados para as preamares de sizígia e quadratura assim como para as baixamars de sizígia e quadratura, ambas nos meses de verão e de inverno com seus respectivos dados de vento.

No intuito de caracterizar um possível derramamento de óleo em qualquer instante no tempo, para os pontos localizados a 3 km e a 5 km da costa, foi gerada uma planilha (randômica) com 50 fontes distribuídas aleatoriamente no tempo entre o instante inicial zero e final de 20 dias. Já para os pontos localizados a 15 km e a 25 km da costa, a planilha (randômica) gerada apresentava 100 fontes distribuídas aleatoriamente também entre o instante inicial zero e final de 20 dias. Ambos os cenários são simulados para um intervalo de 30 dias.

Os resultados do modelo de transporte de óleo foram distribuídos em 40 cenários (cenário 3 ao 42), explanados no Capítulo 5. Por motivos de grandes possibilidades de resultados e inúmeras comparações, apenas os resultados mais expressivos e representativos serão mostrados e discutidos nessa seção. Logo abaixo seguem algumas observações importantes:

- Todos os cenários que utilizaram o óleo do tipo leve (*cenários ímpares*) não serão mostrados nem discutidos neste trabalho pelo fato de nenhum deles atingir a costa e contaminar a praia, pois por apresentar uma densidade muito baixa (decaimento rápido), com a deriva litorânea e os ventos tanto de verão como de inverno todo o óleo é levado para alto mar no sentido contrário a linha de praia e nenhuma fonte contaminante permanece por mais de 03 dias no modelo.
- Para os pontos localizados a 15 km e 25 km da costa, que rodaram os óleos pesados (decaimento lento) com os ventos de inverno (*cenários 36, 38, 40 e 42*) também não serão apresentados tendo em vista que a faixa de toque no litoral acontece em uma escala desprezível para o modelo e somente atinge a praia numa extensão muito pequena localizada a extremo oeste, distante das áreas mais frágeis e vulneráveis que são os mangues, estuários e rios.
- As fontes localizadas a 3 km e 5 km da costa que rodaram nas mesmas condições descritas acima (*cenários 24, 26, 28, 30, 32 e 34*) não são mostrados, mas são discutidos logo após seus respectivos cenários de verão.
- Os resultados apresentados são discutidos considerando 10 cenários para os ventos de verão (*cenários 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 e 22*), que representam os cenários mais críticos para este trabalho.

6.2.1 – CRITÉRIOS DE LIMITES PARA A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para entender melhor os resultados é conveniente apresentar uma breve explanação a cerca dos critérios utilizados para definir os limites de apresentação de resultados de modelos de óleo.

Dentre os muitos critérios existentes, dois deles têm sido mais utilizados:

- a) Representar a mancha através de isolinhas de concentração de óleo até um valor limite ' C_o ' (mg/l), onde este valor considera toda a massa de óleo não evaporada; e,

- b) Representar as partes da mancha que formam um filme flutuante com espessura maior que um valor limite 'e' (mm), supondo que toda a massa não evaporada esteja contida no filme superficial.

Para facilitar a interpretação e comparação de resultados de diferentes modelos de transporte de manchas de óleo, neste trabalho é utilizado um critério uniforme dos limites de apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo proposto por ROSMAN (2000).

Por existir uma inconsistência dos critérios acima citados ao se tentar obter valores de concentração a partir de resultados apresentados em função da espessura do filme de óleo, se faz necessário arbitrar um coeficiente de proporcionalidade para o cálculo da espessura de mistura do filme de óleo que será usada no cálculo da concentração. A arbitrariedade deste coeficiente é a fonte da inconsistência da apresentação dos resultados, podendo-se obter valores bem diferentes de concentração, dependendo do coeficiente escolhido, o que implicaria em diferentes avaliações de risco ambiental.

Assim, o critério proposto por ROSMAN (2000) sugere que se adote uma nova forma de determinação da espessura de mistura (E_M), determinado pela equação 6.1, onde este parâmetro corresponde ao valor em metros da densidade do óleo derramado em relação à densidade da água pura a 4°C:

$$E_M = \frac{\rho_o(\text{kg/m}^3)}{1000(\text{kg/m}^3)}(\text{m}) \quad (6.1)$$

Isso resulta em valores de ' E_M ' próximos de um metro, o que não se distancia da realidade em muitos casos práticos. Assim, o valor da concentração ' C_o ' (em kg/m^3) torna-se igual numericamente ao da espessura 'e' (em mm) do filme de óleo.

$$C_o(\text{kg/m}^3) = 1000 \times e[\text{m}](\text{kg/m}^3) \equiv e[\text{mm}](\text{kg/m}^3) \quad (6.2)$$

Dessa forma, pela equação 6.2, as inconsistências entre os critérios desaparecem, pois independente do tipo de óleo derramado força-se a igualdade de valores. Pelo proposto, ao se definir como critério um valor limite de ' C_o ', automaticamente se define a espessura limite 'e' a ser considerada e vice-versa.

Considerando agora a equivalência entre a espessura e a concentração, os resultados devem apresentar todas as partes de mancha de óleo com concentração

'C_o' maior ou igual a 1mg/l (10^{-3} kg/m³), ou espessura equivalente 'e' maior ou igual a 0,001mm.

Neste trabalho os derrames simulados apresentam um óleo com massa específica igual a 900 kg/m³. Logo a espessura de mistura da pluma contaminante, para o cálculo da concentração, é igual a 900 mm. Serão apresentados resultados com uma concentração mínima detectável pelo modelo de 0,0001 kg/m³, o que representa uma espessura mínima detectável de 0,0001 mm.

6.2.2 – RESULTADOS DA MODELAGEM PROBABILÍSTICA

Os resultados da modelagem probabilística serão apresentados primeiramente pelo cenário que representa as isolinhas de probabilidade de passagem da mancha de contaminante com uma espessura do filme de óleo maior que 0,0001mm, em seguida os cenários que representam todos os possíveis toques na costa com sua extensão total. E por fim, as isolinhas de probabilidade de passagem da mancha de óleo até 1, 12, 24, 36, 60, 96 e 132 horas após o início do derramamento determinado como mais crítico pelo critério de tempo para acontecer o toque na costa.

- **Cenário 4:** 03 km vazamento instantâneo de pequeno porte;
- **Cenário 6:** 03 km vazamento instantâneo de grande porte;
- **Cenário 8:** 03 km vazamento crítico contínuo;

- **Cenário 10:** 05 km vazamento instantâneo de pequeno porte;
- **Cenário 12:** 05 km vazamento instantâneo de grande porte;
- **Cenário 14:** 05 km vazamento crítico contínuo;

- **Cenário 16:** 15 km vazamento instantâneo de grande porte;
- **Cenário 18:** 15 km vazamento crítico contínuo;

- **Cenário 20:** 25 km vazamento instantâneo de grande porte;
- **Cenário 22:** 25 km vazamento crítico contínuo.

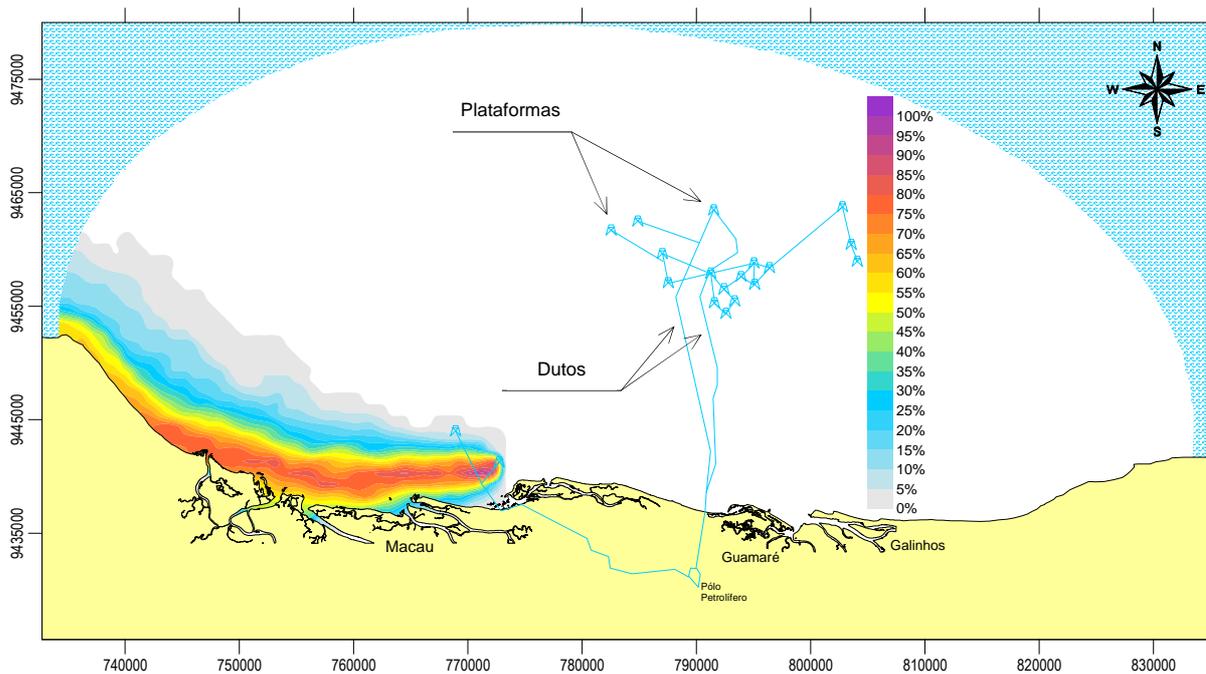


Figura 6-7: Cenário 4 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **8m³** (20 minutos) na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

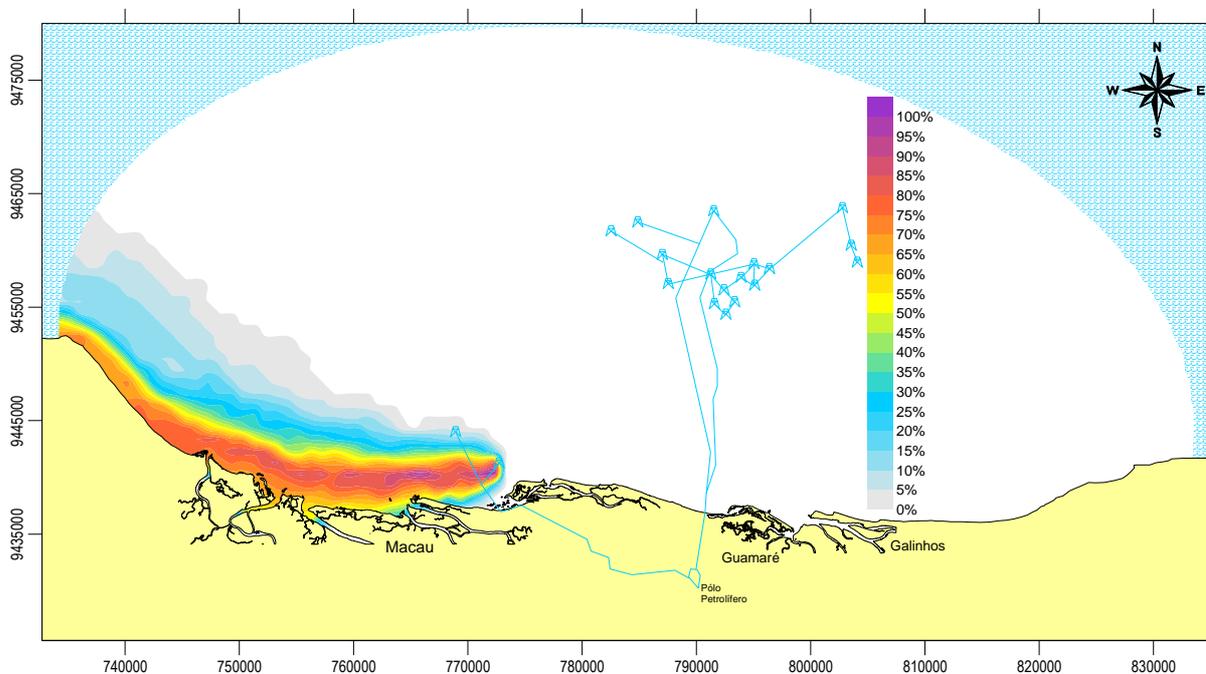


Figura 6-8: Cenário 6 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

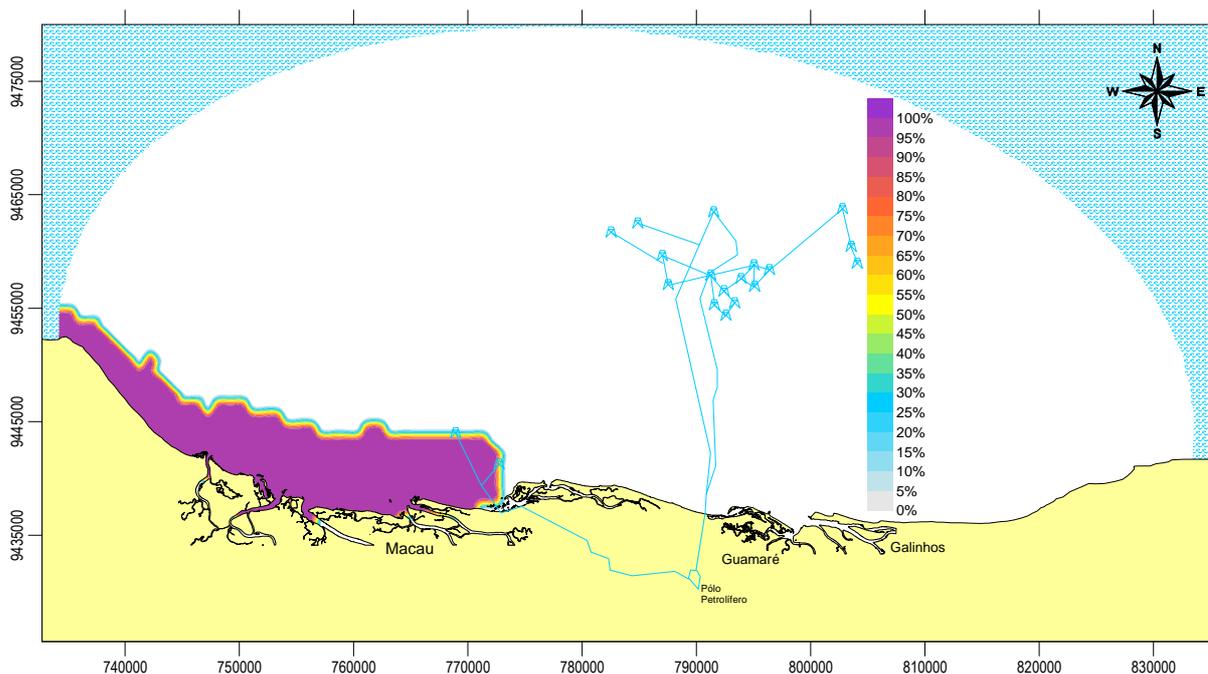


Figura 6-9: Cenário 8 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos na plataforma a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

Nesses resultados acima (Figuras 6-7 a 6-9), bem como os próximos a seguir (Figuras 6-10 a 6-16) representam a probabilidade (em porcentagem) da passagem da mancha de óleo pela área em estudo a partir das fontes que foram determinadas e geradas de forma aleatória para compor as mais diversas possibilidades de marés, ventos e demais forçantes.

Nas Figuras 6-7 e 6-8 pode-se perceber que existe uma proximidade de área de probabilidade de dispersão da mancha de óleo muito grande, isso se deve ao fato de ser o derramamento mais próximo da linha de costa. O que se pode observar de diferença está relacionado a uma maior concentração (escala de cores) do derramamento de grande porte, 200m³ (Figura 6-8) pelo simples fato deste modelo ter um volume maior de óleo derramado, frente ao modelo de derramamento de pequeno porte, 8m³ (Figura 6-7).

Um fato marcante que também valerá para todos os cenários é o de só haver perspectiva de toque no litoral a esquerda do ponto de derrame, fato esse diretamente associado a deriva litorânea, sentido E–O, e os ventos, sentidos NE e/ou SE.

Por se tratar de um derrame contínuo de uma única fonte com derramamento de 3 dias de duração ao invés de fontes aleatórias, a probabilidade de passagem da mancha de óleo é de 100% como apresentado na Figura 6-9.

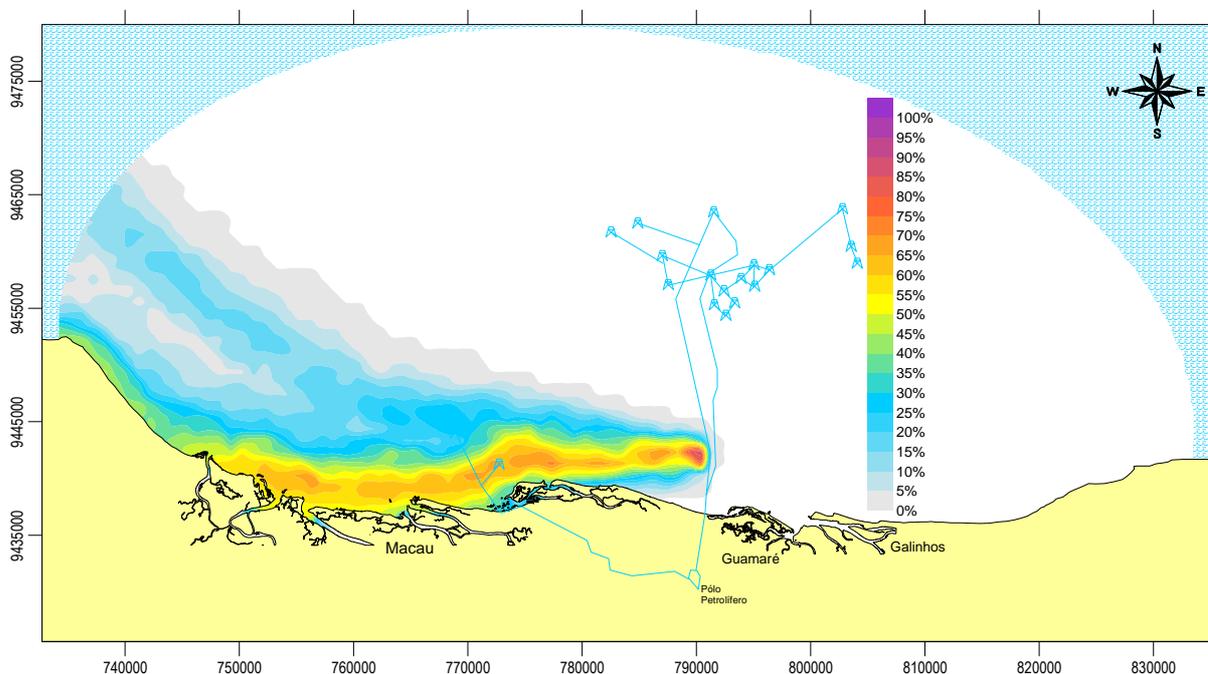


Figura 6-10: Cenário 10 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **8m³** (20 minutos) em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

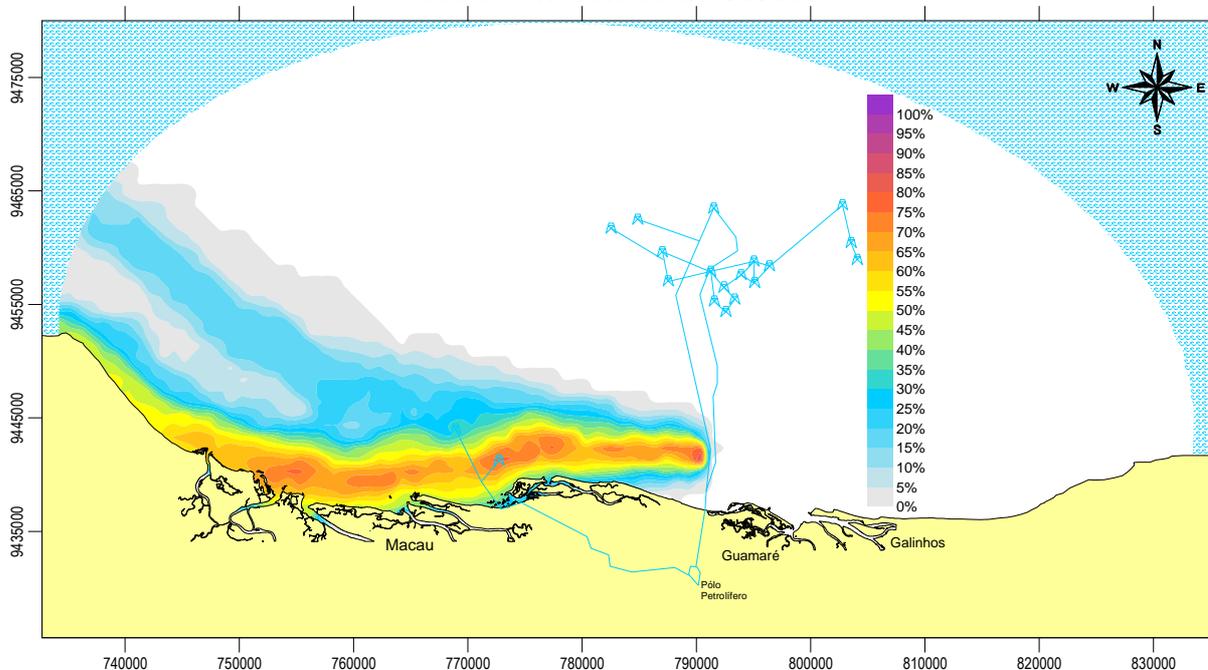


Figura 6-11: Cenário 12 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

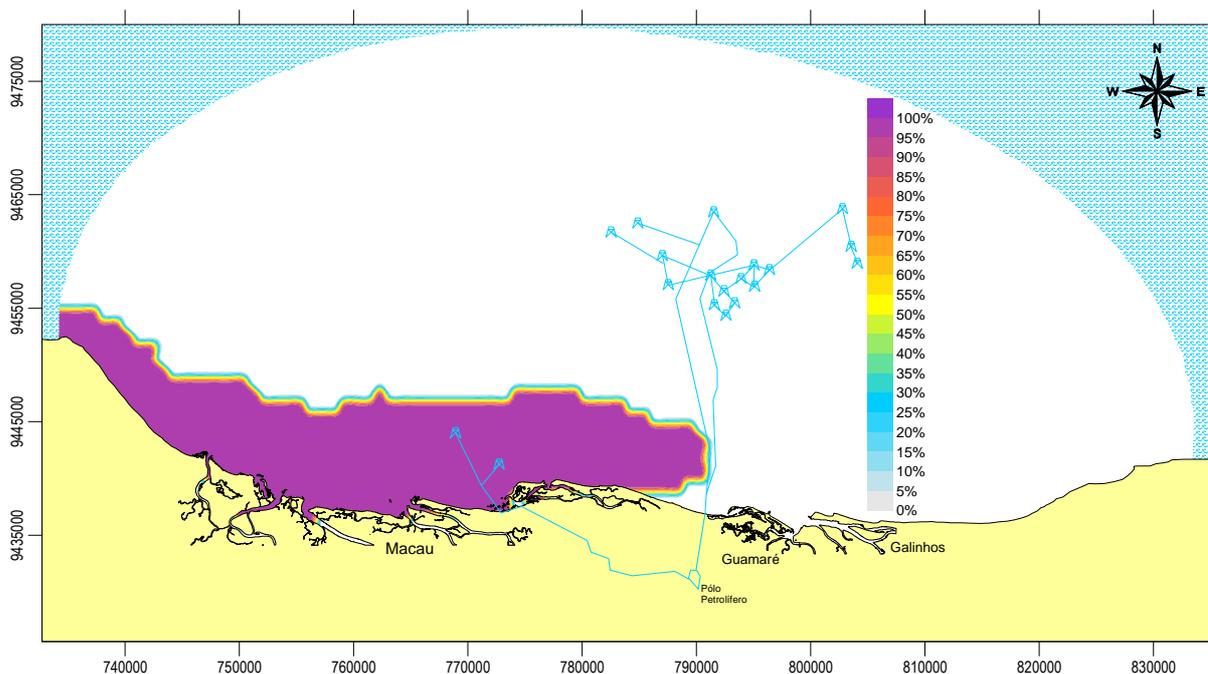


Figura 6-12: Cenário 14 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos em um duto a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

Assim como nos cenários do derrame ocorrido a 03 km da costa, as Figuras 6-10 e 6-11 representam, respectivamente, um derrame pontual, instantâneo e aleatório de 8m³ e 200m³. Ambos seguem o mesmo raciocínio das Figuras 6-7 e 6-8 quanto a sua forma de dispersão e concentração, porém por estar geograficamente localizado mais a esquerda, os derrames ocorridos a 05 km abrangem uma maior área de dispersão como também atingem uma maior área de toque do óleo no litoral.

Como no primeiro caso, nestes cenários percebe-se a gravidade da situação uma vez que todos os estuários localizados a esquerda dos derrames são totalmente atingidos, de tal forma que pode comprometer toda a biota existente no local tendo em vista de tratar-se de uma região altamente fragilizada. Em todos os cenários, do 04 ao 14 pode-se afirmar, através dos resultados da modelagem, que existe uma probabilidade, não nula, maior ou igual de que 50% das partículas derramadas nas mais diversas fontes podem atingir os estuários.

Para a Figura 6-12, valem as mesmas observações descritas para a Figura 6-9 por se tratar de um derrame contínuo que por sua vez é o mais crítico e destrutivo ambientalmente para a área em estudo.

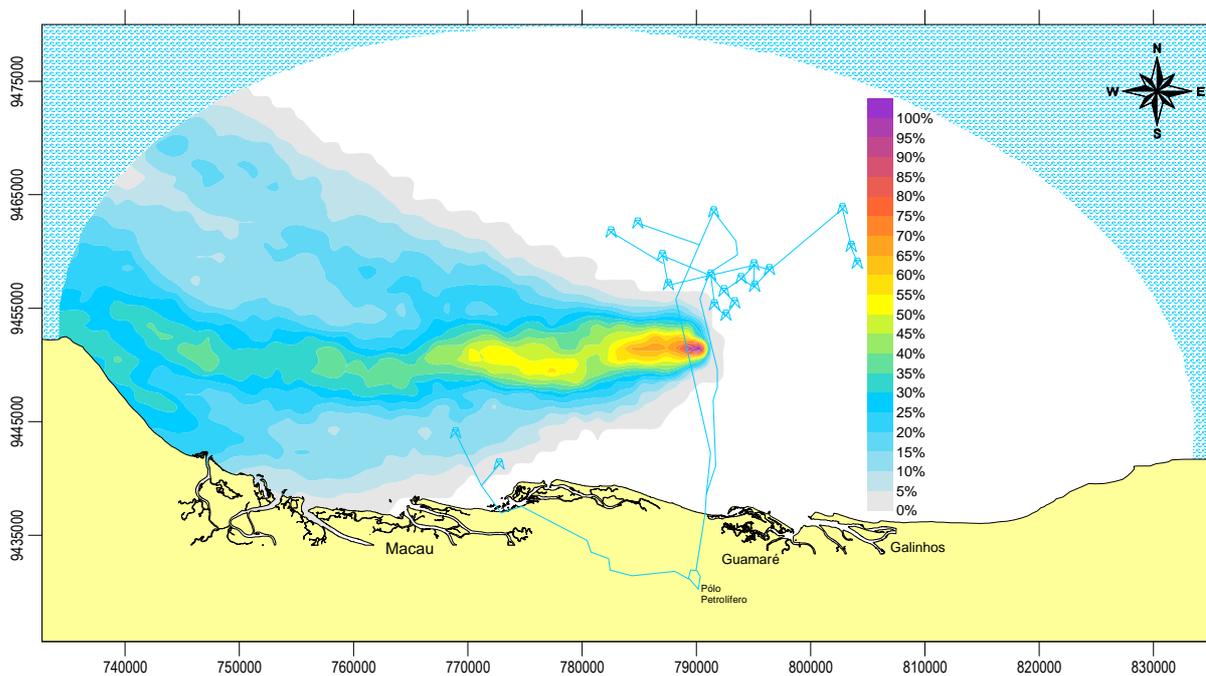


Figura 6-13: Cenário 16 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) em um duto a **15 km** da costa com ventos de **verão**.

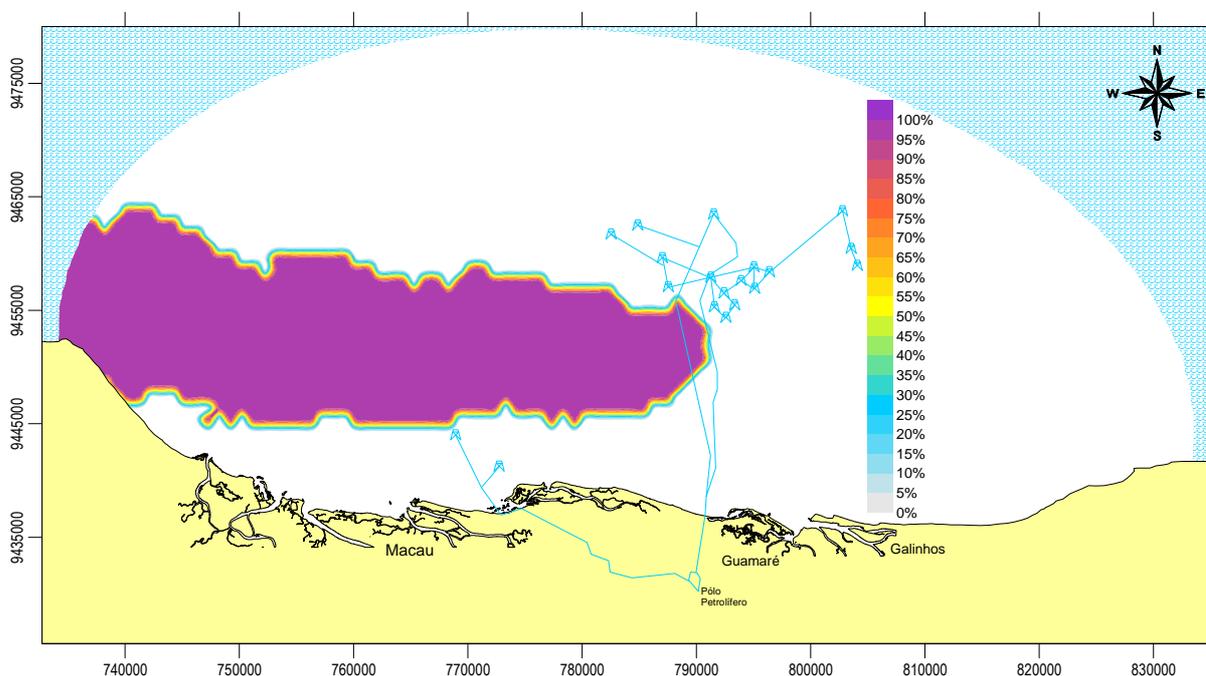


Figura 6-14: Cenário 18 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos em um duto a **15 km** da costa com ventos de **verão**.

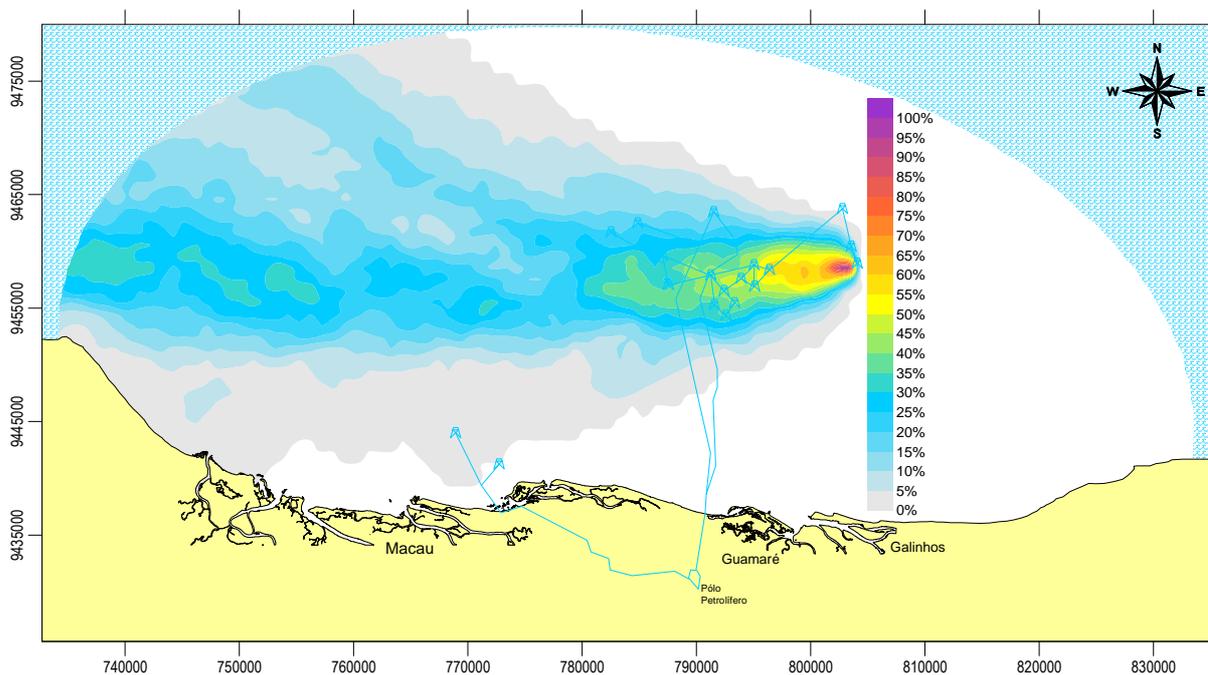


Figura 6-15: Cenário 20 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame pontual **instantâneo** de **200m³** (20 minutos) na plataforma a **25 km** da costa com ventos de **verão**.

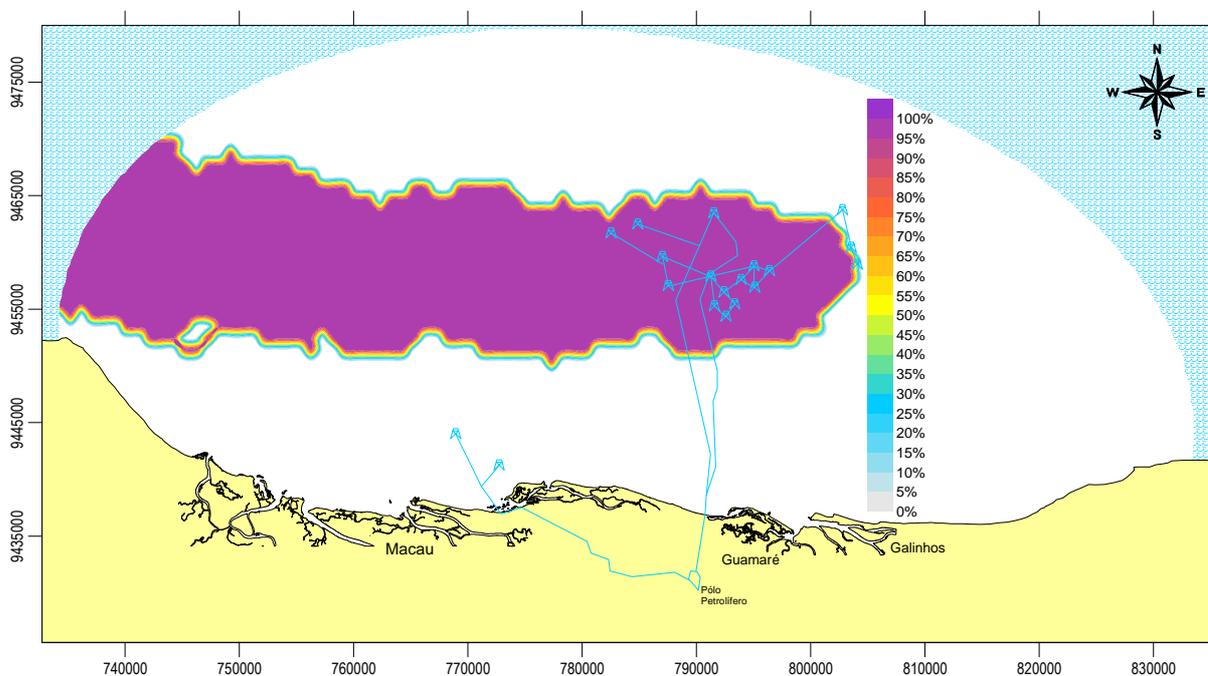


Figura 6-16: Cenário 22 – Probabilidade da passagem da mancha de óleo pesado de um derrame **contínuo** de **200m³** durante **03 dias** seguidos na plataforma a **25 km** da costa com ventos de **verão**.

Para os pontos localizados a 15 km e 25 km de distância da costa não foram mostrados os derrames de 8m³ pois os mesmos se deslocam para o alto mar com os forçantes de vento e maré, devido ao seu pequeno volume derramado e pela grande distância das fontes à praia.

Na Figura 6-13 que representa o cenário 16 podemos observar que, devido a distância do ponto fonte a costa e pela circulação local, a propagação da dispersão abrange uma área maior que as dos derrames de 03 km e 05 km, porém por apresentar essa maior dispersão, existem também uma diminuição na concentração dessa mancha. Percebe-se ainda que ela só vá atingir o litoral depois do município de Macau e com um índice próximo a 30% das partículas lançadas.

O cenário 18 (Figura 6-14) mostra que, mesmo a 15 km da costa, o derramamento contínuo apresenta uma dispersão geográfica pequena, e que devido a deriva litorânea, certamente ela atingirá a costa, porém a uma distância bastante considerável do ponto de origem e num local que não compromete os estuários.

As Figuras 6-15 e 6-16 representam os possíveis derramamentos localizados a 25 km da costa (o ponto mais distante modelado) e que pelos cenários das fontes aleatórias, apesar da mancha se dispersar por quase 60% da área de mar, menos de 05% das partículas lançadas poderão alcançar a praia dentro do domínio modelado. E para o derrame crítico podemos ver que, mesmo mantendo-se a concentração ao longo de sua trajetória, ele não toca a costa. Portanto, trata-se do cenário que apresenta o menor risco dentre os casos analisados.

Uma observação importante relacionando todos os cenários aqui discutidos é que os derrames localizados a 03 km da linha de praia levam em média de 1,2 dias a 07 dias para atingirem a costa. Os derrames localizados a 05 km de distância levam em média de 2,5 dias a 09 dias para tocar o litoral. Os derrames formados a 15 km de distância podem alcançar a costa entre 05 e 10 dias. Por fim, os derrames localizados a 25 km de distância podem tocar a praia em um tempo próximo a 25 dias.

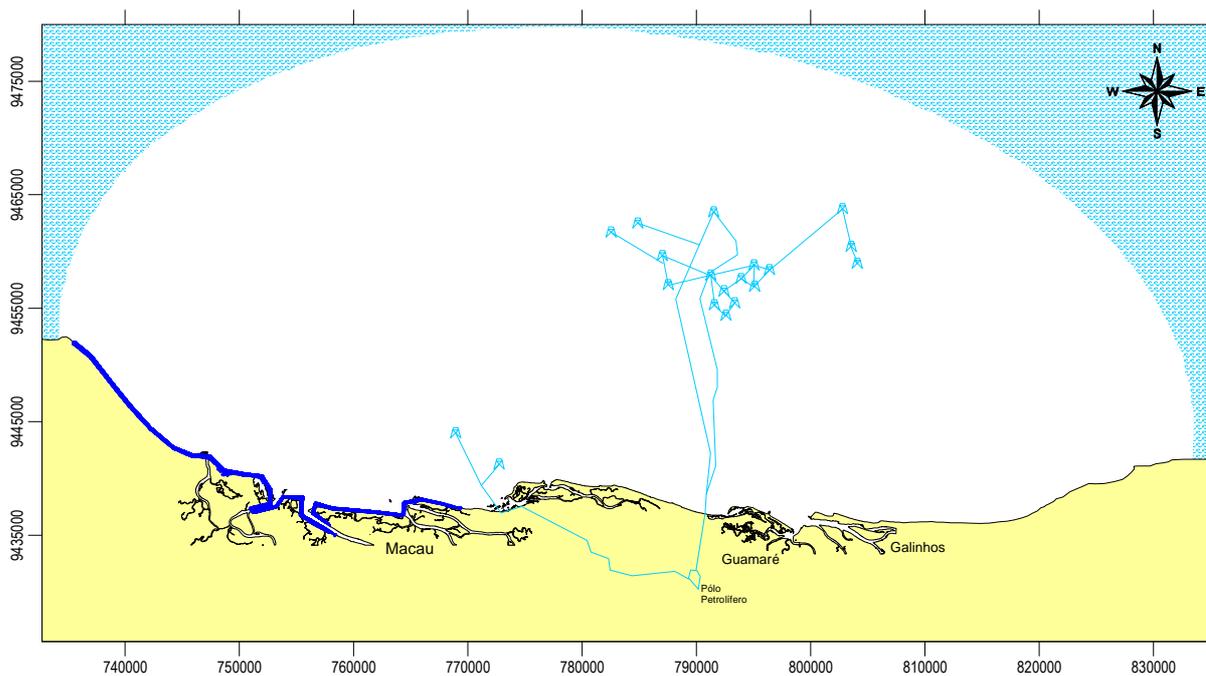


Figura 6-17: Cenário 4 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **8m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

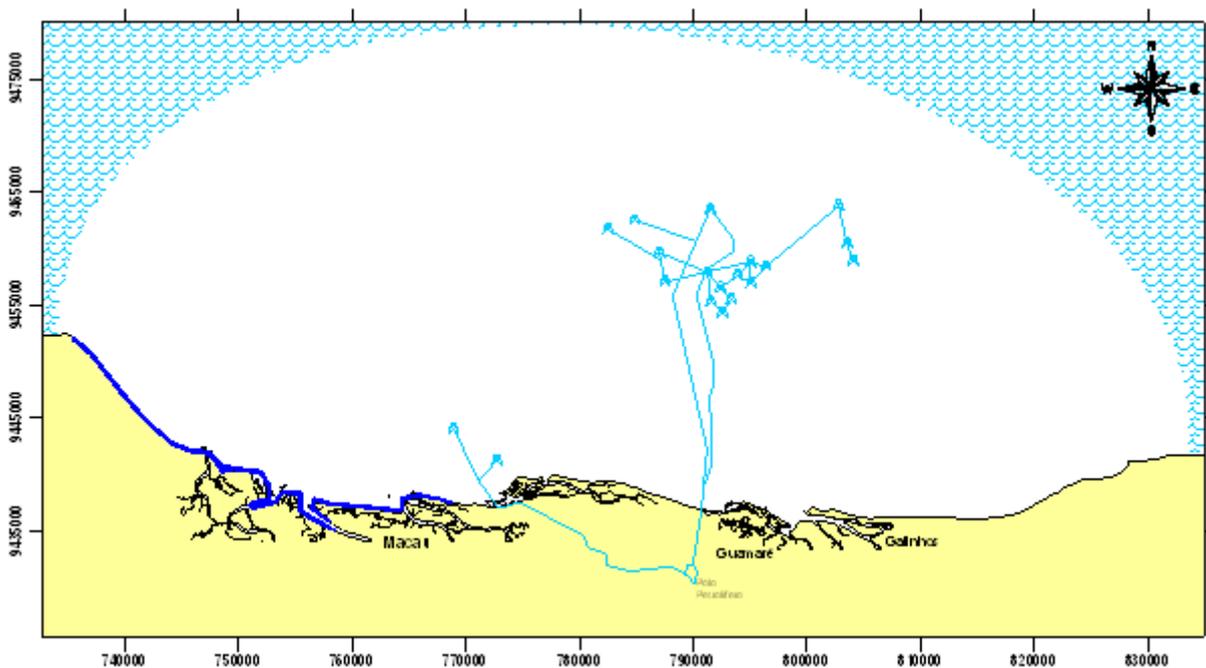


Figura 6-18: Cenário 6 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

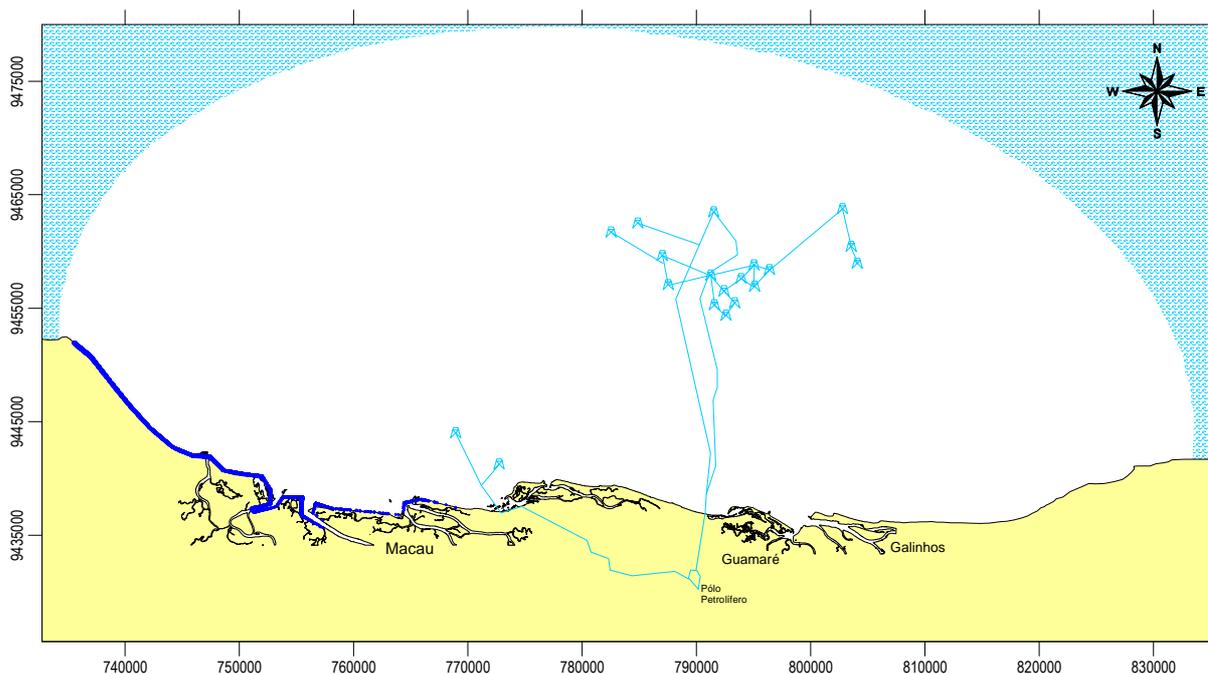


Figura 6-19: Cenário 8 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **contínuo** de **200m³** a **03 km** da costa com ventos de **verão**.

As Figuras 6-17 a 6-25 mostram as possibilidades de qualquer uma das fontes distribuídas pelo modelo toquem a costa. Nesse momento foi determinado que 20% do volume de óleo, derramado pela fonte, seria absorvido na costa. O restante permaneceria dentro da hidrodinâmica, podendo uma mesma fonte atingir o litoral em mais de um momento em diferentes posições de tempo e espaço. Assim, os mapas aqui mostrados determinam toda a faixa de praia, marcada em azul, que torna-se vulnerável ao toque do óleo uma vez que ocorra um vazamento dentro dos critérios determinados neste estudo.

Por estarem tão próximos a costa, os vazamentos de pequeno e grande porte atingem exatamente a mesma área de abrangência o que determina que em caso de ocorrência de um vazamento a 03 ou 05 km de distância da costa, toda essa região deverá ser observada, protegida e monitorada.

Uma pequena diferença pode ser percebida no derramamento crítico na área de toque localizada mais próxima à fonte, por outro lado por se tratar de uma única fonte pode-se dizer que está é a que apresenta a maior preocupação tendo em vista que a sua duração contínua de 03 dias possibilita que praticamente toda a faixa de praia, inclusive os estuários sejam atingidos por ela e cause os maiores danos.

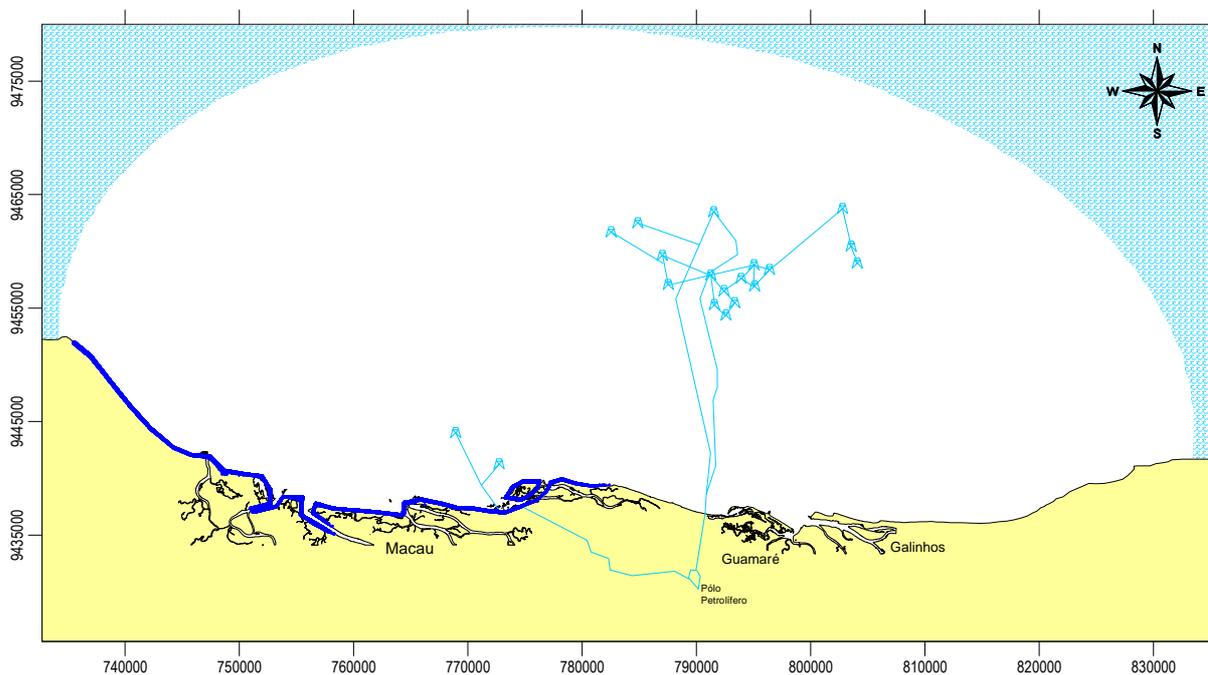


Figura 6-20: Cenário 10 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **8m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

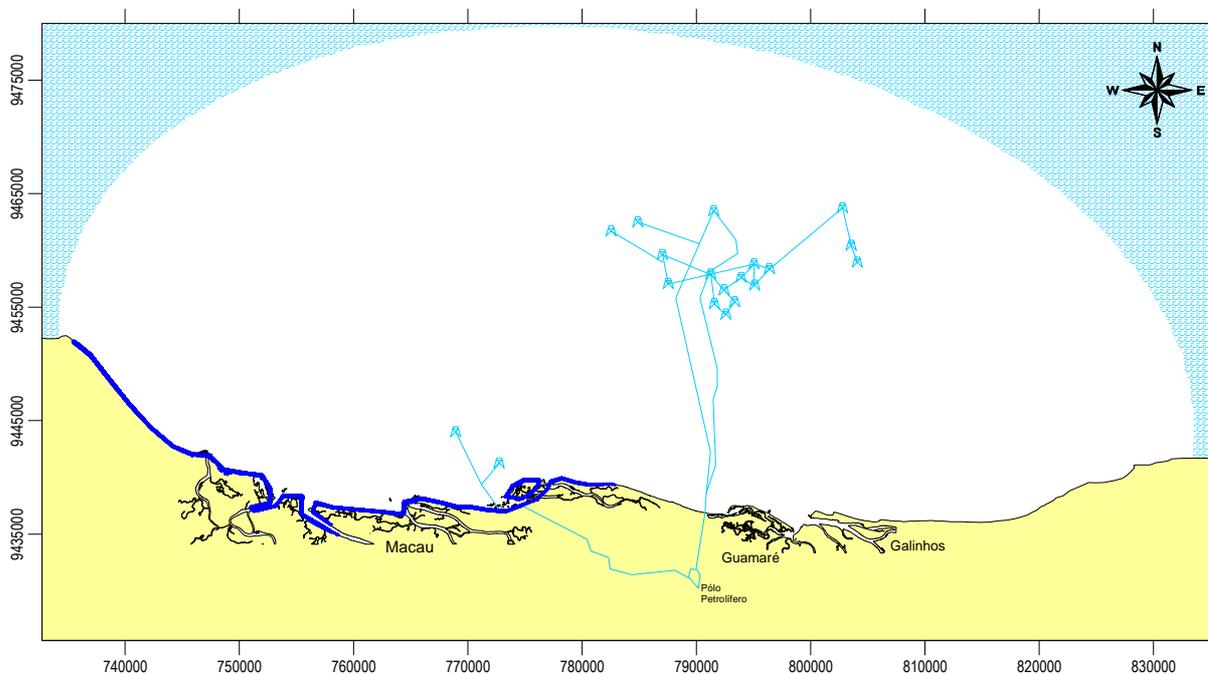


Figura 6-21: Cenário 12 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

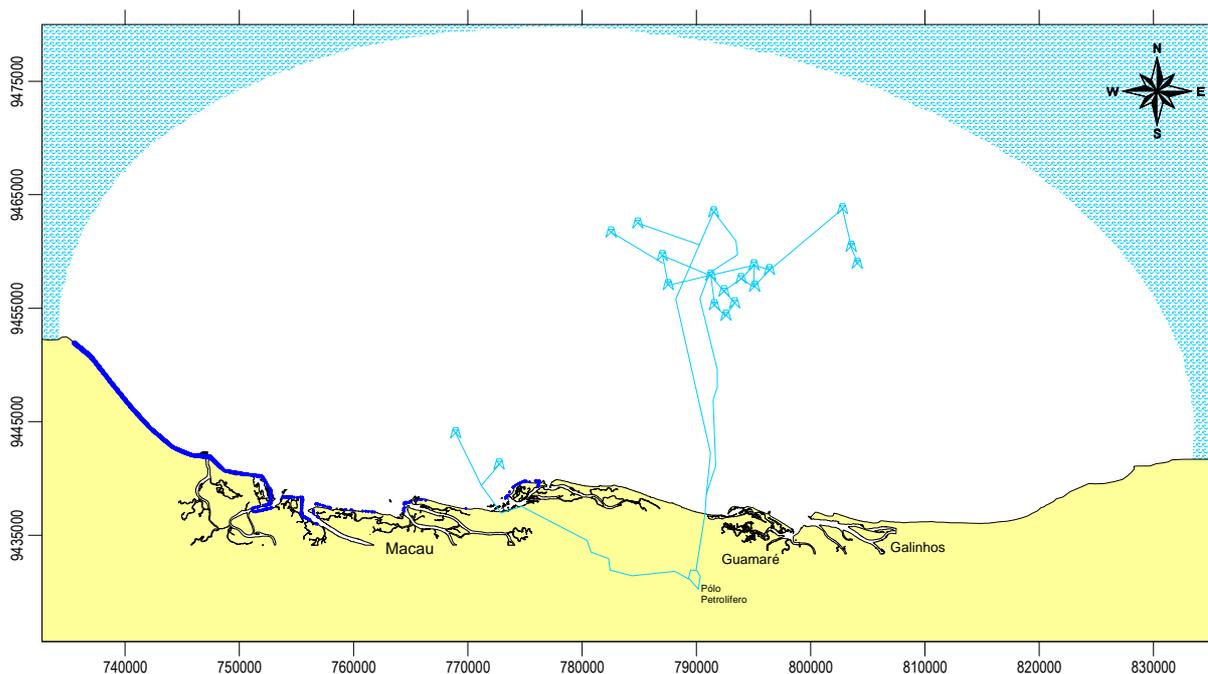


Figura 6-22: Cenário 14 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **contínuo** de **200m³** a **05 km** da costa com ventos de **verão**.

Mesmas observações podem ser determinadas para os cenários 10 e 12, pois estando o vazamento a 05 km da costa, praticamente toda a área localizada a esquerda da fonte pode ser atingida por uma das 50 fontes, o que determina a gravidade de um vazamento nessa região, pois essa área chega a aproximadamente 50 km de faixa de praia que podem ser atingidos.

Assim como na dispersão da probabilidade de passagem da mancha de óleo, a faixa de praia possível de ser tocada por uma partícula de óleo será maior que a área dos possíveis vazamentos a 03 km da costa pelo fato do ponto está localizado mais a esquerda que o primeiro.

Uma ressalva destinada ao derrame crítico é de que ele apresenta uma menor possibilidade de extensão de toques na costa, porém pelo mesmo princípio descrito para a derrame crítico a 03 km ele será o de maior preocupação pois certamente a sua mancha de óleo atingirá mais de um ponto na costa, chegando a adentrar os estuários e comprometer todos esses locais ambientalmente fragilizados.

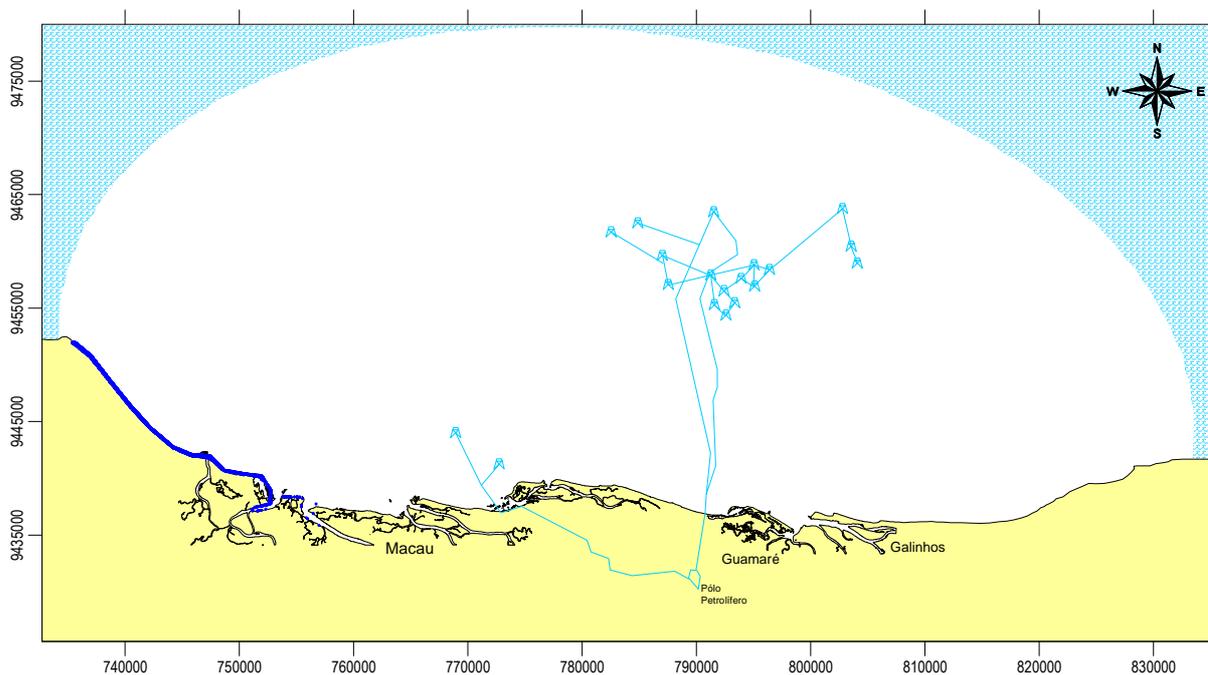


Figura 6-23: Cenário 16 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **15 km** da costa com ventos de **verão**.

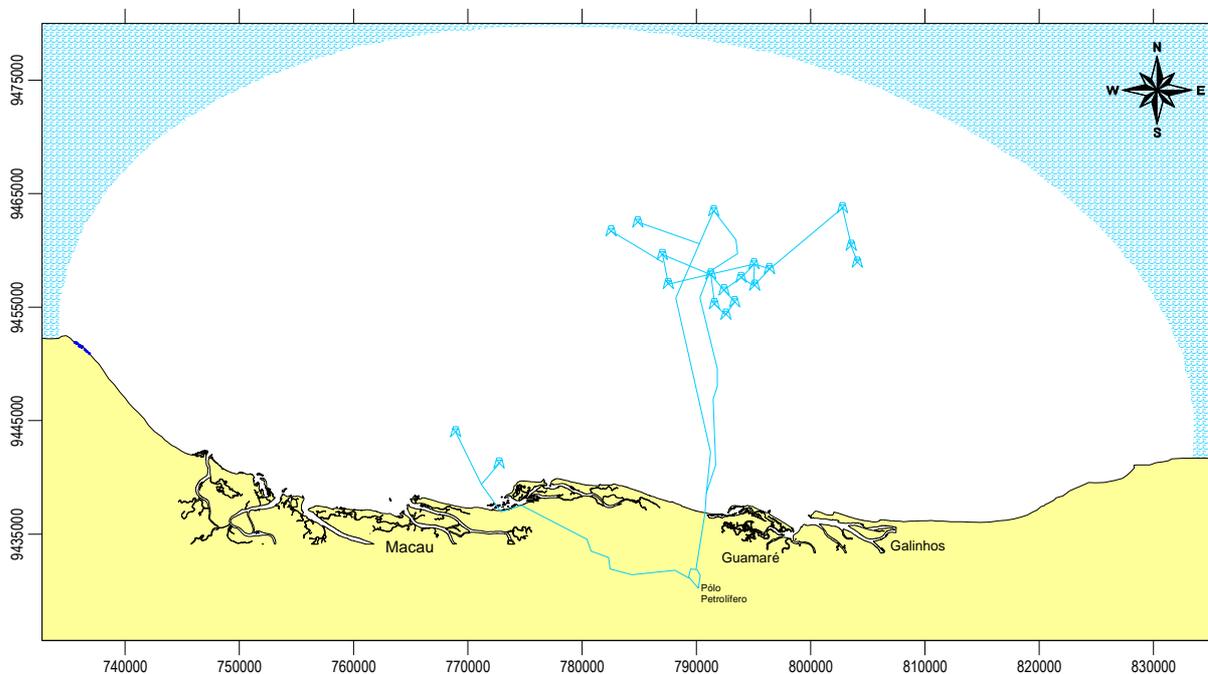


Figura 6-24: Cenário 18 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **contínuo** de **200m³** a **15 km** da costa com ventos de **verão**.

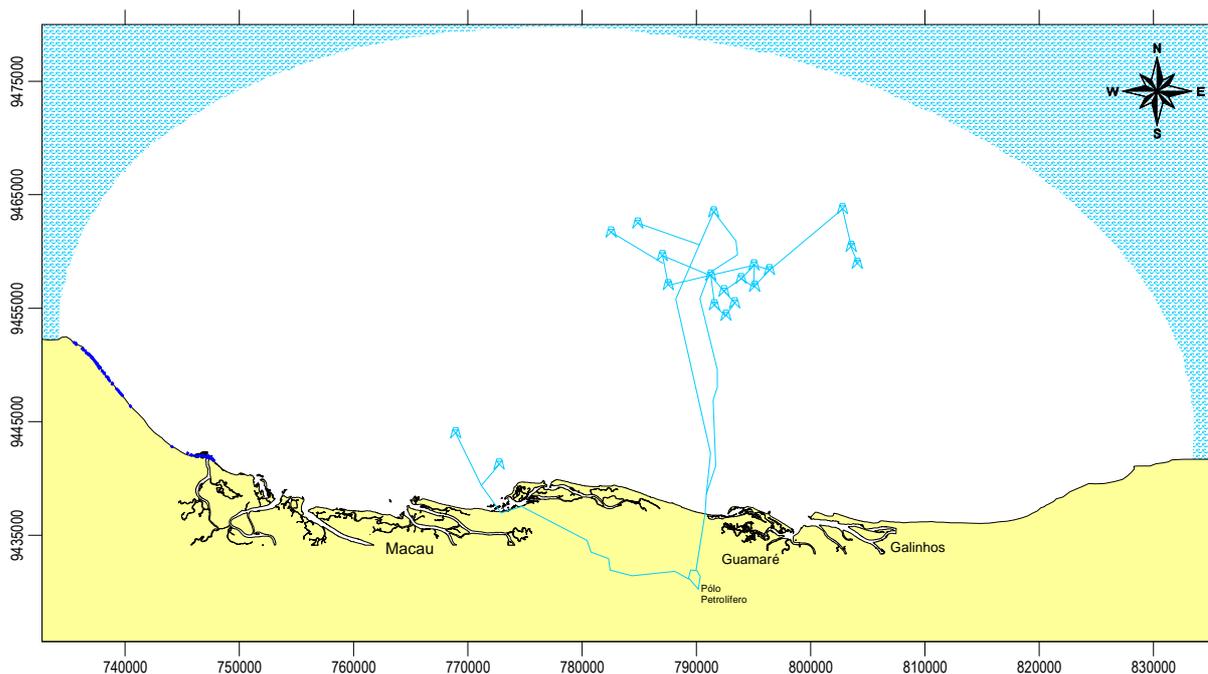


Figura 6-25: Cenário 20 – Extensão máxima possível de toque do óleo ao longo na faixa de praia do derrame **instantâneo** de **200m³** a **25 km** da costa com ventos de **verão**.

Para esse três últimos cenários podemos perceber que a probabilidade de toque no litoral compreende uma faixa de praia muito menor que os derrames localizados mais próximos à costa. Porém, por estarem dentro da área de estudos, eles devem ser levados em consideração.

Dentre os três, o que apresentaria o maior risco seria o derrame instantâneo de grande porte (Figura 6-23), pois o mesmo ainda pode atingir, mesmo que em pequena quantidade, os estuários localizados mais a esquerda da área. A Figura 6-24, que retrata o derrame crítico a 15 km, demonstra que apenas uma área localizada a extremo oeste da área em estudo poderá sofrer um toque e que está distante o bastante resguardar a segurança dos estuários.

Apesar de apresentar toques discretos e menores no litoral, o cenário 20 mostra que mesmo um derrame a 25 km da costa poderá contaminar o último estuário localizado a esquerda da área e comprometer assim as espécies que lá vivem. Portanto, este também deverá receber um olhar cauteloso.

Por fim, não foi apresentado o cenário referente ao derramamento crítico localizado a 25 km da costa pois o mesmo não tocou a praia em nenhum momento.

Para exemplificar e melhorar o entendimento de como se propaga uma mancha de óleo dentro de um modelo hidrodinâmico, será retratado agora uma seqüência de evolução da mancha de óleo do derramamento mais crítico, levando em consideração o tempo em que a primeira partícula toca a costa. Nesse caso será o derrame contínuo de 200m³ localizado a 03 km da faixa de praia que leva apenas 1,2 dias, aproximadamente 28 horas apenas, para tocar a praia, sendo esse momento determinado no instante de baixa-mar de quadratura tendendo para a maré enchente de sizígia.

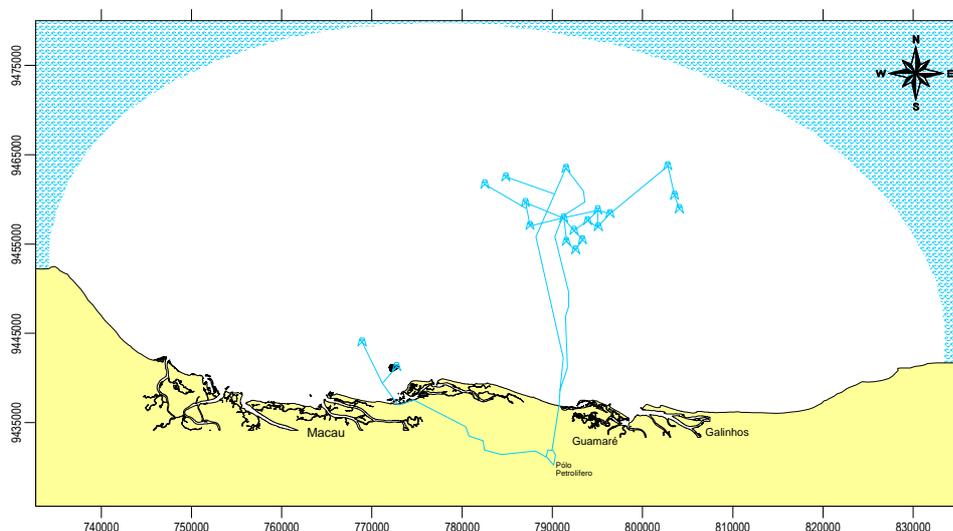


Figura 6-26: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após **01 hora**.

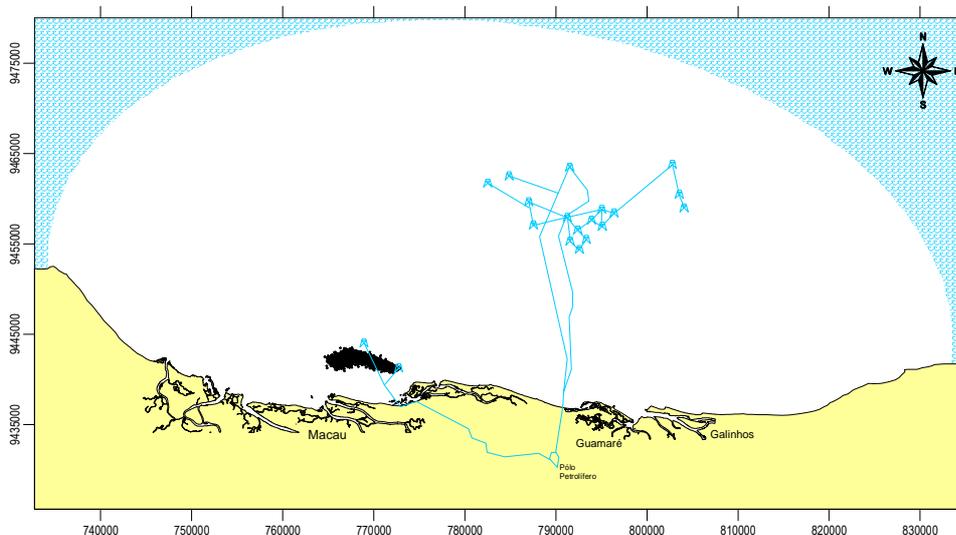


Figura 6-27: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após **12 horas**.

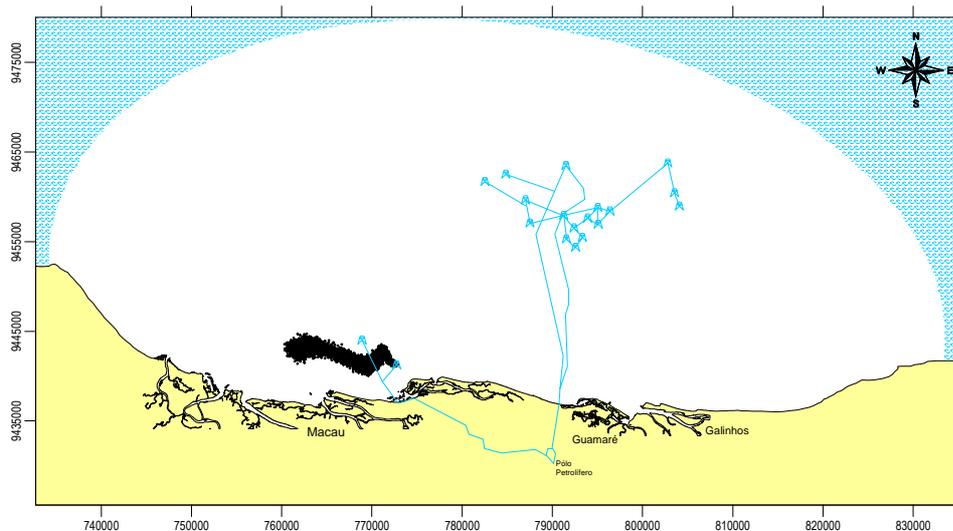


Figura 6-28: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 24 horas.

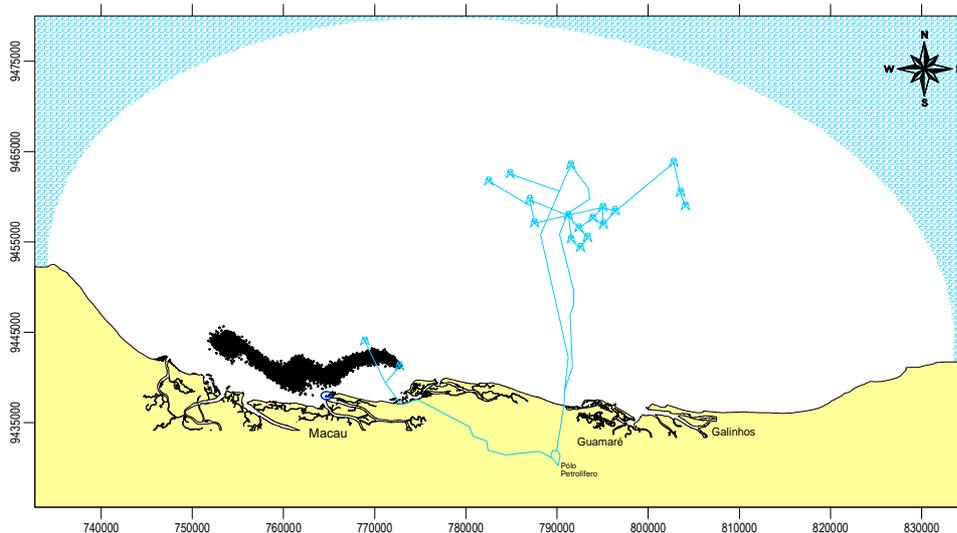


Figura 6-29: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 36 horas.

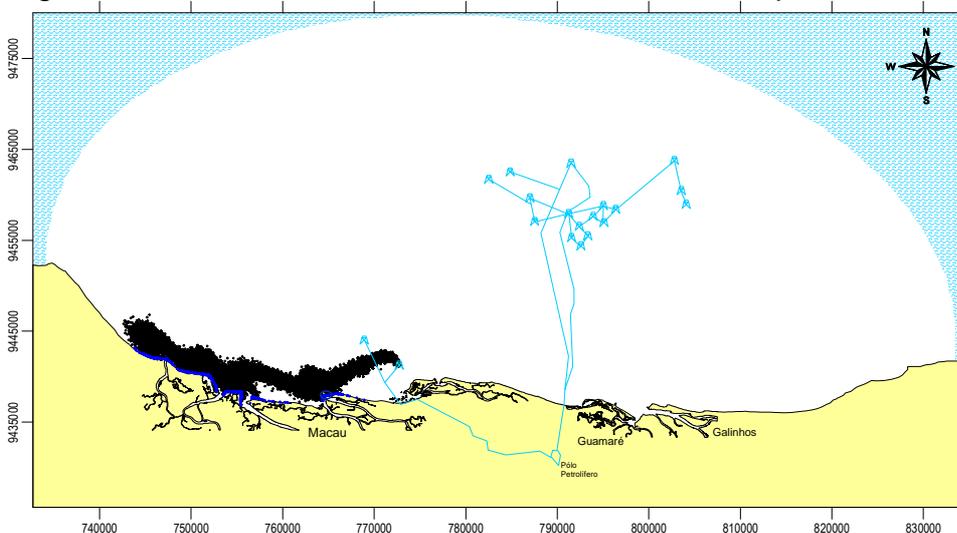


Figura 6-30: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após 60 horas.

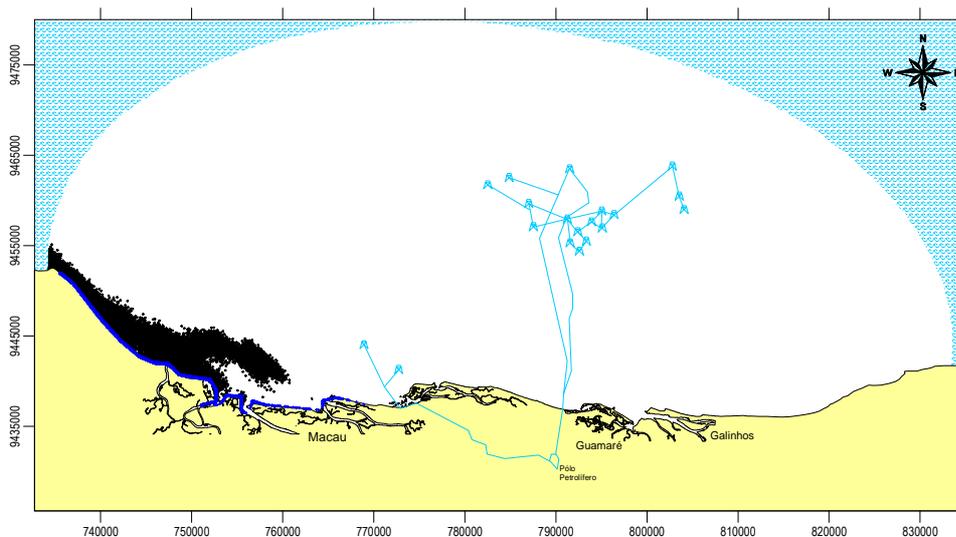


Figura 6-31: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após **96 horas**.

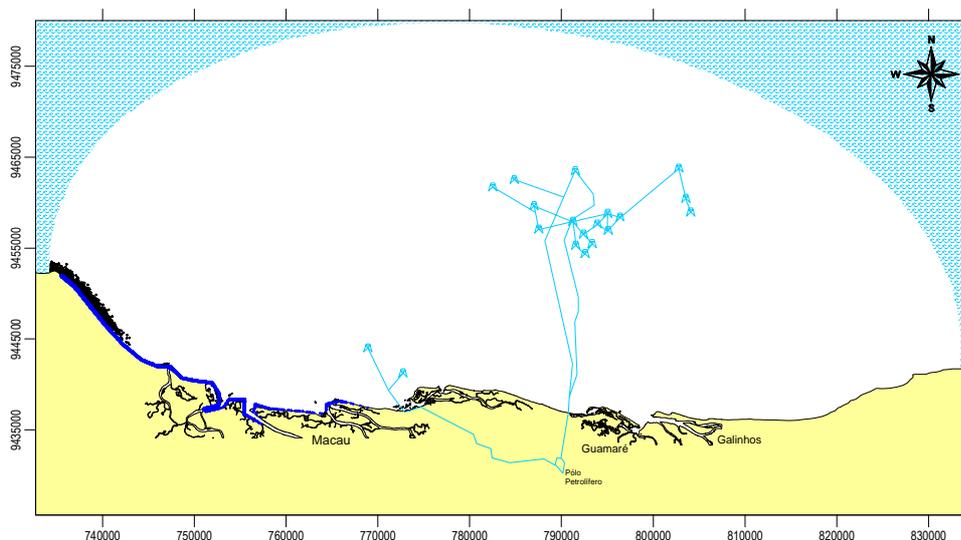


Figura 6-32: Cenário 8 – Derrame contínuo a 03 km após **132 horas** (5.5 dias).

Neste contexto de seqüência da evolução da mancha de óleo para o pior caso estudado vemos que com 36 horas já aparecem os primeiros toques na costa (sabe-se que o primeiro toque ocorreu a aproximadamente 28 horas); com 60 horas (2,5 dias) percebe-se que a mancha já tocou uma área bastante grande dentro do domínio e que já atingiu alguns estuários. A 96 horas (4 dias) a mancha de óleo já está se retirando da área em estudo e apresentou praticamente a sua totalidade de toques no litoral, acabando-se e decretando uma possível catástrofe ambiental em menos de 6 dias.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são destacadas as conclusões relativas aos resultados das modelagens hidrodinâmica e de transporte de contaminantes obtidas com o SisBA-HIA[®], acompanhadas de recomendações que possam vir a complementar e/ou dar continuidade a este estudo em etapas de pesquisa posteriores.

7.1 – CONCLUSÕES

A análise dos resultados permite prever o movimento da mancha de óleo derramado, utilizando-se da modelagem computacional para a construção de diferentes cenários. Deste modo, foi possível conhecer os efeitos de acidentes hipotéticos com o derramamento de óleo com características variadas e bem distintas: (a) em situações de verão e inverno; (b) óleo leve e pesado; (c) ventos dominantes e mais frequentes; (d) derrames de pequeno e grande porte; (e) além de um derrame crítico e vazamentos em quatro diferentes pontos.

A aplicação deste modelo mostrou para os diferentes cenários hidrodinâmicos modelados e as condições de contorno consideradas que:

- Nos cenários de verão, a determinação do tipo de vento, seja ele dominante (NE) ou o mais freqüente (SE) interfere na hidrodinâmica da área, uma vez que influenciam na direção das velocidades das correntes de maré em alguns pontos da área;
- Quanto ao empilhamento, é notório que o vento apresenta pouca influência em direção a costa, uma vez que as alterações encontradas nas correspondentes situações de verão e inverno são pequenas;
- Como esperado, os valores encontrados para as elevações correspondentes aos períodos de sizígia (valor mínimo de elevação no domínio modelado igual a 0,00 m e máximo igual a 2,57 m) são mais acentuados que os de quadratura (valor mínimo de elevação no domínio modelado igual a 0,62 m e máximo a 2,05 m), acompanhando a curva de maré da região;

- O modelo 2DH também confirmou que, independente da época do ano (verão ou inverno), as velocidades máximas nos períodos de sizígia são maiores que as velocidades máximas encontradas nos períodos de quadratura, apresentando, porém, diferenças irrelevantes entre as sizíguas de verão e de inverno e as quadraturas de verão e de inverno;
- Na situação de baixamar (verão e inverno) forma-se um grande vórtice na zona frontal a Macau, cujos efeitos atingem uma enorme área do domínio modelado refletindo até à zona frontal de Galinhos. No inverno, verifica-se o deslocamento deste vórtice para oeste;
- Na situação de preamar (verão e inverno), a formação de um vórtice acontece em frente a Galinhos, e é mais acentuado no verão. Já na zona frontal a Macau não se verifica a formação de nenhum vórtice.

Para os diferentes cenários de transporte de contaminantes modelados e as condições de derramamento consideradas, a aplicação deste modelo mostrou ainda que:

- O óleo leve não atinge nem contamina a costa, pois devido a sua baixa densidade associada a dinâmica das marés, à deriva litorânea e aos ventos modelados, todo o óleo é levado para alto mar (fora do domínio modelado) no sentido contrário à linha de praia e nenhuma fonte contaminante permanece por mais de 03 dias no modelo;
- Só há perspectiva de toque no litoral a esquerda dos pontos de derrames, fato esse diretamente associado à deriva litorânea, sentido E–O, e aos ventos, sentidos NE e/ou SE;
- Com os ventos de inverno, os derrames a 15 km e a 25 km são menos preocupantes por apresentarem uma porcentagem desprezível de toque no litoral numa faixa muito pequena e distante das áreas mais frágeis do domínio estudado;
- Os derrames de 8 m³ e 200 m³ realizados próximos a praia, apresentam praticamente a mesma probabilidade de dispersão da mancha de óleo, di-

ferenciando-se apenas pela extensão das suas áreas nos pontos de 03 km e 05 km;

- Para todos os derrames a 03 km e 05 km existe uma probabilidade maior ou igual a 50,0% de todos os estuários localizados a esquerda dos derrames serem atingidos pelo contaminante a ponto de comprometer toda a biota existente no local;
- Para os cenários de 15 km e 25 km a propagação da dispersão do óleo abrange uma área cada vez maior (podendo chegar a 60% da área modelada), em contrapartida há uma diminuição na concentração do contaminante. Mesmo assim existe a probabilidade não nula dos estuários serem atingidos;
- O derrame contínuo é o mais crítico e destrutivo ambientalmente para a área em estudo, com exceção do derrame a 25 km que não atinge a linha de praia;
- Os derrames localizados a 03 km da linha de praia levam em média de 1,2 dias a 07 dias para atingirem a costa. Os derrames a 05 km, de 2,5 dias a 09 dias. Os derrames a 15 km, entre 05 e 10 dias. E os derrames a 25 km em um tempo próximo a 25 dias;
- Nos derrames próximos à costa – 03 km e 05 km – a área a ser atingida pelo contaminante pode chegar a uma extensão aproximada de 50 km de faixa de praia;
- Mesmo um derrame a 25 km da costa poderá contaminar o último estuário localizado a esquerda da área e comprometer as espécies que lá vivem.

Os resultados confirmaram a influência dos forçantes externos sobre a hidrodinâmica local e certamente sobre o destino dos derrames no corpo d'água modelado, mostrando de forma probabilística as condições críticas em que um derrame acidental pode causar à praia e aos estuários existentes na região. Este fato foi demonstrado através da probabilidade da propagação das manchas de óleo por toda a superfície marinha da região modelada, as possíveis áreas impactadas e contami-

nadas e, por fim as condições mais desfavoráveis para os derramamentos estudados.

Com base nos vários cenários estabelecidos e simulados, a criação de um plano emergencial pode assumir estruturas e estratégias específicas para cada situação de vazamento. Isso determina a importância do conhecimento prévio das conseqüências que os acidentes que venham a ocorrer possam causar em cada cenário determinado.

A modelagem em tempo real pode ser feita usufruindo-se dos dados operacionais, meteorológicos e oceanográficos, podendo determinar de antemão o movimento da mancha de óleo. Conseqüentemente, o controle da mancha e as ações mitigadoras do impacto ambiental no corpo marinho tornam-se rápidos e práticos, aumentando a eficiência de um plano emergencial de combate ao contaminante.

Para tanto esse plano emergencial deve estabelecer medidas preventivas e corretivas claras, seguras e eficientes relacionando o controle e remoção do poluente, a proteção dos ambientes costeiros que possam sofrer degradações severas a partir dos resultados propostos pela modelagem dos cenários estudados visando sempre minimizar os possíveis impactos ambientais.

Os resultados determinados pelo modelo, para os derrames com óleos leves, levam a uma menor preocupação pelo fato da hidrodinâmica favorecer o rápido espalhamento e afastamento da mancha de óleo. Por outro lado, constatou-se que existe uma possibilidade não nula de que as manchas formadas até 2 dias após o vazamento atinjam o litoral nos cenários modelados a 3 km e 5 km. Esse fato deve ser levado em conta ao se estabelecer o tempo de ação das medidas previstas no plano emergencial a ser criado.

O SisBAHIA[®] permite ainda uma grande facilidade de entendimento e clareza na visualização dos resultados do movimento temporal e espacial das manchas de óleo. Desta forma, a modelagem pode ser utilizada como um instrumento do plano emergencial para combate a derrames de óleo, para avaliar as hipóteses acidentais, além de auxiliar no monitoramento da propagação da mancha contaminante, servindo tanto para a elaboração quanto para uma execução deste plano.

Assim, demonstra-se que apresentando apenas alguns tipos de resultados que podem ser obtidos através da modelagem computacional pelo SisBAHIA[®], foram

alcançados os objetivos propostos neste estudo de analisar os padrões típicos de circulação hidrodinâmica e estudar as plumas de contaminantes por óleo.

7.2 – RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que, uma vez calibrados e validados os modelos, as técnicas de modelamento aqui apresentadas sejam utilizadas como ferramenta de gestão ambiental da micro-região Macau e de outras áreas semelhantes.

Recomenda-se ainda que:

- Assim que possível, seja realizado levantamento de novos dados de campo, com séries temporais mais longas, a fim de validar e atualizar os modelos apresentados neste trabalho;
- Sejam inseridos outros forçantes hidrodinâmicos a fim de complementar a precisão dos resultados apresentados;
- Se estudem os efeitos das plumas contaminantes para outros cenários possíveis, determinando novos pontos de derrames, novas fontes e novas condições de vazamento;
- Sejam analisadas as situações atribuindo-se diferentes índices de absorção ao longo de toda a costa modelada, tendo em vista que existem diferentes formações ambientais em torno da área estudada;
- Se mantenha um programa de monitoramento e controle de todo litoral que apresente regiões de extração petrolífera que possam atingir as praias, o meio ambiente e toda a biota envolvida nesse ecossistema;
- Sejam estudados os efluentes lançados pelo emissário submarino do pólo petrolífero existente, considerando-se que são eliminadas partículas contaminantes de óleo nesse efluente e que o mesmo está localizado próximo a linha de praia.

REFERÊNCIAS

1. ABBOT, M. B. & BASCO, R. *Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering*. Longman Group – UK Limited. 1989.
2. CASTRO, A.F. *Modelagem e Desenvolvimento de um Banco de Dados Geográficos: Aplicação à Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo na Área Costeira entre Galinhos e São Bento do Norte – RN*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2002.
3. CASTRO, A. F. ; ARAUJO, A. B. ; SOUTO, M. S. S. ; AMARO, V. E. *Modeling and development of a geographic database: application to the elaboration of oil-spill environmental sensitivity maps in coastal areas on the Rio Grande do Norte State*. Journal of Coastal Research, Estados Unidos, v. 39, p. 1437-1441, 2006.
4. COSTA NETO, L.X. *Evolução Geológica–Geomorfológica Recente da Plataforma Continental Interna ao Largo do Delta do Rio Açu, Macau-RN*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, RJ. 1997.
5. CUNHA, M.C.S., SOUZA, H.A.T. *Utilização da Modelagem como Ferramenta em um Plano de Emergência*. Projeto de Fim de Curso. Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2003.
6. DINERSTEIN, E., OLSON, D.M., GRAHAM, D., WEBSTER, A., PRIMM, S., BOOKBINDER, M. & LEDEC, G. *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. The World Bank in association with The World Wildlife Fund, Washington, D.C., USA. 1995.
7. DYER, K.R. *Estuaries: a physical introduction*. 1ª ed. John Wiley & Sons Ltda. 1997.
8. FEMAR – Fundação de Estudos do Mar. *101 - PORTO DE MACAU*. In: *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*. Disponível em <www.femar.com.br>. Acessado em 01/12/2006.
9. FEMAR – Fundação de Estudos do Mar. *102 - GUAMARÉ*. In: *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*. Disponível em <www.femar.com.br>. Acessado em 01/12/2006.
10. FIGUEIREDO, L.R.R. *Estudo da Circulação Hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi, Natal/RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2007.
11. FORTES. *Mapa Geológico da Bacia Potiguar (1:100.000)*. PETROBRAS/DEBAR/DINTER/SEBAT, Relatório Interno. 1987.
12. GOIS, D. M. M. de; SCUDELARI, A. C.; ROSMAN, P. C. C. *Estudo Preliminar da Circulação Hidrodinâmica da Zona costeira de Galinhos e Guararé*. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2007, São Paulo. ABRH, 2007. v. 1. p. 1-19.
13. GRIGIO, A.M. *Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na Determinação da Vulnerabilidade Natural e Ambiental do Município de Guararé (RN): Simulação de Risco às Atividades da Indústria Petrolífera*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2003.

14. GRIGIO, A. M. ; AMARO, V. E. ; VITAL, H.; DIODATO, M. A. *A method for coastline evolution analysis using GIS and Remote Sensing - A case study from guarare city, northeast Brazil*. Journal of Coastal Research, v. 42, p. 412-421, 2005.
15. GRIGIO, A.M.; CASTRO, A.F. de; SOUTO, M.V.S.; AMARO,V.E.; VITAL,H. and DIODATO, M.A.; *Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the municipal district of Guararé - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil*,Journal of Coastal Research, SI39, proc. ICS2004, 2004.
16. GRIGIO, A. M. ; SOUTO, M. V. da S. ; CASTRO, A. F. de ; AMARO, V. E. ; VITAL, H. *Use of remoting sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of guararé - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil*-Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), Journal Of Coastal Research, v. 39, p. 293-298, 2006.
17. GUEDES, I.M.G. *Mapeamento da Área de Influência dos Dutos de Gás e Óleo do Pólo de Guararé (RN)*. Relatório de Graduação. Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2002.
18. HORITA, C.O., ROSMAN, P.C.C. *Um Modelo Lagrangeano para Transporte de Contaminantes em Corpos de Água Rasos*. Anais do XII Simpósio Brasil. Recursos Hídricos. Vitória, ES. 1997.
19. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *In: Pesquisa de Informações Básicas Municipais: Macau, Guararé, Galinhos, São Bento do Norte*. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acessado em 20/12/2006.
20. IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do RN. *In: Perfil do Seu Município: Macau, Guararé, Galinhos, São Bento do Norte*. Disponível em <http://www.rn.gov.br/secretarias/idema/perfil_municipio.asp>. Acesso em 15/12/2006.
21. LEITE, A.E.B. *Simulação do lançamento de esgotos domésticos em rios usando um modelo de qualidade d'água, SisBAHIA®* . Dissertação de Mestrado, Escola Nacional de Saúde Pública, FIOCRUZ. Rio de Janeiro, RJ. 2004.
22. LIMA, F.B. *Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto como Ferramentas para a Caracterização da Geomorfologia em Áreas Submersas no Litoral Setentrional do RN (Bacia Potiguar)*. Relatório de Graduação. Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2005.
23. LIMA, Z.M.C. *Caracterização da Dinâmica Ambiental da Região Costeira do Município de Galinhos, Litoral Setentrional do Rio Grande do Norte*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2004.
24. LIMA, Z.M.C., AMARO, V.E., VITAL, H. *Monitoramento da Variação da Linha de Costa de Galinhos/RN Utilizando Fotografias Aéreas e Imagens Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM*. In: Congresso da Abequa, VIII. Imbé, Anais. Resumos. Imbé, RS. v. 1, p. 551-552. 2001.
25. MAFRA, L.C.A. *Estudo da Dinâmica Costeira da Região da Foz do Rio Piranhas–Açu Para Geração de Mapas de Sensibilidade do Litoral ao Derramamento de Óleo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2005.
26. MINISTÉRIO DA MARINHA – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. *Carta Náutica da DHN nº 700 – DE FORTALEZA A PONTA DOS TRÊS IRMÃOS*, escala 1:316.200, 2ª Edição. 1981.

27. MINISTÉRIO DA MARINHA – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. *Carta Náutica da DHN nº 702 – PORTO DE MACAU*, escala 1:23.000, 2ª Edição. 1973.
28. MINISTÉRIO DA MARINHA – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. *Carta Náutica da DHN nº 720 – DE AREIA BRANCA A GUAMARÉ*, escala 1:100.000, 3ª Edição. 2003.
29. MONTEZUMA, P.N. *Modelagem de cenários de derramamento de óleo na Baía de Ilha Grande para elaboração do Plano de Emergência*. Projeto de Fim de Curso. Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2004.
30. NATRONTEC/ECOPLAN *Estudo de Impacto Ambiental da Fábrica de Barrilha da ALCANORTE e Implantação de Emissário Submarino no Município de Macaú-RN*. Diagnóstico, Análise de Impactos e Programa de Gestão Ambiental, Relatório Final. Rio de Janeiro/Natal. 186 pp. 1995.
31. OLIVEIRA, V.N. *Impacto da estabilização do canal da barra na hidrodinâmica e na qualidade da água do sistema lagunar de saquarema - RJ*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2001.
32. ROSMAN, P.C.C. *Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques*. Ph.D. Thesis - Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics. Civil Engineering Department, Massachusetts, USA - Institute of Technology. 1987.
33. ROSMAN, P.C.C. *Modelos de Circulação em Corpos d'Água Rasos In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol 1)*. Org. por Rosman, P.C.C., Wrobel, L.C., Tucci, C.E.M., Cirillo, J.A., Cabral, J.P., Eiger, S. 1ª ed., capítulo 3, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1989.
34. ROSMAN, P.C.C. *Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol 3)*. Org. por Rosman, P.C.C., Mascarenhas, F.C.B., Miguez, M.G., Campos, R.O.G., Eiger, S. 1ª ed., capítulo 3, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1997.
35. ROSMAN, P.C.C. *Um critério para uniformizar os limites de apresentação de resultados de modelos de derrame de óleo*. – PENO – Programa de Engenharia Costeira e Oceanográfica. 2000.
36. ROSMAN, P.C.C. *Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos (Vol 5)*. Org. por Rosman, P.C.C., Mascarenhas, F.C.B., Miguez, et al. 1ª ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.
37. ROSMAN, P.C.C. *Referência Técnica do SisBAHIA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Programa de Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2006.
38. SAMPAIO, M. *Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'Água da Baía de Guanabara – RJ*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2003.
39. SCUDELARI, A.C. *Desenvolvimento de um Método de Elemento Móvel Aplicado às Equações de Águas Rasas*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 1997.
40. SILVEIRA, I. M. ; VITAL, H. ; AMARO, V. E. *The evolutionary study of environmental conditions of the coastal area of the Municipal District of Guamaré - RN*- Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC). Journal of Coastal Rese, Estados Unidos, v. 39, p. 237-241, 2006.

41. SILVEIRA, I.M. *Monitoramento Geoambiental da Região Costeira do Município de Guamaré-RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2002.
42. SOUTO, M. ; GRIGIO, A. M.; CASTRO, A. F. ; AMARO, V. E. *Multitemporal analysis of geoenvironmental elements of the coastal dynamics of the region of the Ponta do Tubarão, City of Macau/RN, on the basis of remote sensing products and integration* In: GIS.Journal of Coastal Research, EUA.. Journal of Coastal Research, Special Issue 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC - Brazil), Estados Unidos, v. 39, p. 1618-1621, 2006.
43. SOUTO, M.V.S. *Análise Multitemporal dos Elementos Geoambientais da Região da Ponta do Tubarão, Área de Influência dos Campos Petrolíferos de Macau e Serra, Município de Macau/RN*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2004.
44. SOUZA, C. F. *Sistema Integrado para Tomada de Decisão Espacial em Situações de Derramamento de Óleo no Litoral Norte do Estado do RN*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2006.
45. STATTEGGER, K.; CALDAS, L. H. de O. and VITAL,H. *Holocene coastal evolution of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil*. Journal of Coastal Research, SI39, proc. ICS2004, 2004.
46. TABOSA, W.F. *Dinâmica Costeira da Região de São Bento do Norte e Caiçara do Norte–RN*. Relatório de Graduação. Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2000.
47. TABOSA, W.F. *Monitoramento Costeiro das Praias de São Bento do Norte e Caiçara do Norte-RN: Implicações Para o Pólo Petrolífero de Guamaré*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN. 2002.
48. TABOSA, W.F. *Morfologia e Sedimentologia da Plataforma Continental Brasileira Adjacente a São Bento do Norte e Caiçara do Norte – RN/NE-Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2006.
49. TUCCI. C.E.M., BELTRAME, L.F.S. *Evaporação e Evapotranspiração In: Hidrologia: Ciência e Aplicação (Vol 4)*. Org por Tucci, C.E.M. 2ª ed., capítulo 7, Ed. da Universidade/UFRGS, Ed usp, São Carlos, SP, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1993.
50. VITAL, H., *Erosão e Progradação Costeira no Estado do Rio Grande do Norte, NE Brasil*. II Cong. sobre Plan. e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Exp. Portuguesa, IX Cong. da Assoc. Brasileira de Est. do Quaternário, II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas, Recife, Brasil, 2005.
51. VITAL, H.; AMARO, V.E. and SILVEIRA, I.M. *Coastal Erosion on the Rio Grande do Norte State (Northeastern Brazil): Causes And Factors Versus Effects And Associated Processes*. Journal of Coastal Research, SI39, proc. ICS2004, 2004.
52. VITAL, H.; SILVEIRA, I. M. ; AMARO, V. E. *Carta Sedimentológica da Plataforma Continental Brasileira - Área Guamaré a Macau (NE BRASIL), Utilizando Integração de dados Geológicos e Sensoriamento Remoto*. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 233-241, 2005.
53. SERHID – Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do RN. *Mapa das Bacias hidrográficas do RN*. In: *Bacias Hidrográficas*. Disponível em <<http://www.serhid.rn.gov.br/consulta/cBacia.asp>>. Acessado em 15/12/2006.

54.SETUR – Secretaria de Estado de Turismo do RN. Disponível em <http://www.setur.rn.gov.br/dest_macau.html>. Acessado em 20/12/2006.