



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

ADRIANO ALVES RIBEIRO

**SIMULAÇÕES DA AÇÃO DO VENTO E DA DISPERSÃO DE
CONTAMINANTES NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI/BRASIL**

Natal - RN
2012

Adriano Alves Ribeiro

**SIMULAÇÕES DA AÇÃO DO VENTO E DA DISPERSÃO DE
CONTAMINANTES NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI/BRASIL**

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-orientadora: Prof^a Dr^a. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha

Natal - RN

2012

ADRIANO ALVES RIBEIRO

**SIMULAÇÕES DA AÇÃO DO VENTO E DA DISPERSÃO DE
CONTAMINANTES NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI/BRASIL**

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

Dr^a. Ada Cristina Scudelari – Orientadora – UFRN

Dr^a. Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha – Co-orientadora – UFPR

Dr. Antonio Mazorri Righetto – Examinador Interno - UFRN

Dr. Moacyr Cunha de Araujo Filho – Examinador Externo – UFPE

Natal, 24 de Fevereiro de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família e em especial a minha mãe e ao meu padrasto, que pelos seus esforços possibilitaram a realização deste sonho; a minha avó e meu avô; ao meu irmão; aos meus padrinhos e a Sarah, minha companheira, que sempre me deu seu apoio e sua compreensão.

“Tudo posso naquele que me fortalece” (Fl 4,13)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que no dia-a-dia me deu saúde e força para que fosse possível superar todas as minhas limitações; a Nossa Senhora de Fátima, minha padroeira, que desde pequeno sempre rogou por mim.

Com carinho e amor à minha família. Minha mãe que sempre foi um exemplo de amor, coragem, força e persistência. Meu padrasto que foi um segundo pai para mim, sempre me apoiando e me aconselhando em todas as horas. Meu irmão exemplo de garra e bravura. Minha avó e meu avô exemplo de alicerce, companheirismo e dedicação. Meus padrinhos que em seu lar me forneceram abrigo, segurança e amor. Edileuza e Manoel, obrigado por estes dois anos de acolhimento, pois sem esta ajuda tudo seria mais complicado. Ao meu primo Cleudir e ao meu primo Kilber, pois me consideraram como mais um irmão. Sempre serei grato a vocês.

Com amor à minha companheira Sarah, que sempre esteve ao meu lado, me fazendo enxergar que eu sempre posso ser mais do que eu imagino. Por suportar pacientemente à distância. À minha vidinha todo meu amor, paixão, carinho e compreensão.

Ao LARHISA que me acolheu em um momento de dúvida e incerteza, em especial à minha orientadora Ada Cristina Scudelari que por vezes foi muito mais que uma professora, me aconselhando e me guiando nos momentos difíceis. Por sua competente orientação, paciência e confiança; especialmente por sua dedicação para me proporcionar a seqüência desta trajetória, o doutorado. Leonor que sempre esteve de portas e e-mails abertos, com um sorriso e um carinho enormes.

A minha co-orientadora Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha, pelo treinamento no SisBaHiA, pelas orientações, críticas, sugestões e por compartilhar seus conhecimentos com paciência e sabedoria. Por sua confiança e acolhimento frente à seleção de doutorado no PPGMNE, me dando a oportunidade de seguir em frente nesta caminhada.

Ao Professor Claudio Freitas Neves por seus ensinamentos em Engenharia Costeira.

Ao Professor Vicente Ângelo de Sousa por seu treinamento e auxílio na utilização do MATLAB.

Aos meus amigos de turma, Neuciano, Rafael, Raquel e Larisse, bem como, Raniere, Rodrigo, Anderson, Moisés e Wilson, os quais eu sempre poderei contar.

Agradeço especialmente a José Edson de Moura, um amigo especial que conheci ao longo desta jornada e que sempre pude contar em todos os momentos. Por seus auxílios na parte computacional e especialmente quanto ao Excel.

Aos demais professores, funcionários e colegas do PPgES, por todas as experiências, diversões, colaboração e suporte técnico recebidos.

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

RESUMO

O presente trabalho compreende um estudo ambiental do Estuário do Rio Potengi através do SisBaHiA[®]. Foram estudados aspectos referentes à circulação hidrodinâmica e a dispersão de partículas lançadas através de uma região fonte localizada no interior do Estuário. A abordagem sobre a circulação hidrodinâmica foi feita através do módulo 2DH do SisBaHiA[®]. Analisou-se a circulação hidrodinâmica com e sem a influência do vento, referente ao ano de 2010. No caso do estudo da dispersão de partículas, foi utilizado o módulo Lagrangeano do SisBaHiA[®], considerando-se um lançamento através de uma região fonte, localizada no interior do Estuário, com T_{90} constante. Os resultados do módulo hidrodinâmico foram analisados a partir dos campos de elevações e de velocidades, análises hodográficas e elevações e velocidades ao longo de um perfil longitudinal do Estuário. Os resultados da dispersão de partículas foram analisados por meio de regiões de isoconcentração. Também foram analisadas as velocidades residuais e o Tempo de Residência das partículas no interior do corpo d'água. As análises elencadas permitiram concluir que o mês de maior módulo de velocidade e conseqüentemente maior advecção para o ano de 2010 foi Julho; e o mês de menor módulo de velocidade foi o de Novembro, bem como, as maiores intensidades das correntes estão relacionadas aos instantes de meia maré vazante e meia maré enchente do ciclo de sizígia. Quanto ao Tempo de Residência, observa-se que o Estuário do Rio Potengi apresenta valores que variam de 38 a 343 dias; sendo os dendritos e reentrâncias as regiões de maior estagnação. Por fim, quanto ao lançamento de partículas, verifica-se que nas simulações efetuadas as partículas lançadas não atingiram a foz do Estuário, bem como, o parâmetro T_{90} exerce muita influência sobre as isolinhas de concentração.

PALAVRAS-CHAVE: Circulação hidrodinâmica, Estuário do Rio Potengi, Tempo de Residência, SisBaHiA[®].

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1: Uso, ocupação e principais lançamentos no Estuário do Potengi.

Capítulo 2

Figura 2.1: Mapa de localização do Estuário do Rio Potengi.

Figura 2.2: Precipitação e Temperatura ao longo dos anos de 1995, 2002 e 2010.

Figura 2.3: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 1995, 1997, 1998, 2000, 2001 e 2002, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

Figura 2.4: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

Figura 2.5: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 2009 e 2010, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

Figura 2.6: Padrão de vento na área de estudo - primeiro semestre de 2010, obtido através da Estação de Superfície Automática (ESA).

Figura 2.7: Padrão de vento na área de estudo - segundo semestre de 2010, obtido através da Estação de Superfície Automática (ESA).

Figura 2.8: Níveis médios das marés no Porto de Natal.

Figura 2.9: Componentes harmônicas do Porto de Natal.

Figura 2.10: Histograma alturas significativas das ondas – 1998 e 1999.

Figura 2.11: Textura de fundo estuário do rio Potengi.

Capítulo 3

Figura 3.1: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH).

Capítulo 4

Figura 4.1: Contorno da região de domínio da modelagem hidrodinâmica.

Figura 4.2: Malha de elementos quadrangulares Lagrangeanos.

Figura 4.3: Visualização da topografia de fundo do domínio de modelagem, obtida através das catas náuticas n°802 e 810.

Figura 4.4: Rugosidade equivalente do domínio de modelagem.

Figura 4.5: Curva de maré utilizada na modelagem para o período de 01/01/10 a 31/12/10, eixos verticais se referem aos instantes das 0:00 horas. (A) período de janeiro a abril; (B) período de maio a agosto e (C) período de setembro a dezembro.

Figura 4.6: Localização dos pontos de vazões afluentes ao domínio do Estuário do Rio Potengi.

Figura 4.7: Relação RI da velocidade do vento sobre a água U_w para a velocidade do vento sobre a terra U_l .

Figura 4.8: Direção e intensidade do vento no mês de janeiro de 2010.

Capítulo 5

Figura 5.1: Momentos de análise dos resultados do cenário 1 (Janeiro com vento).

Figura 5.2: Localização das nove estações do SisBaHiA[®] ao longo do Estuário do Rio Potengi, referentes a fatia IA.

Figura 5.3: Comparação entre os valores de elevação obtidos numericamente pelo SisBaHiA[®] e os valores previstos pela DHN, nos Cenários 1 e 2. Eixos verticais se referem aos instantes das 0:00 horas.

Figura 5.4: Média dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de quadratura.

Figura 5.5: Média dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de sizígia.

Figura 5.6: Somatório das Médias dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de quadratura e sizígia.

Figura 5.7: Visualização da classificação das diferenças do vetor velocidade para os meses de Julho e Novembro. A) Escolhe o instante da maré a ser analisado conforme tabela 5.1. B) Escolhe o valor a partir do qual será analisada a diferença em graus (positivas ou negativas). C) Delimita a região de plotagem a partir da seleção de latitudes e longitudes máximas e mínimas. D) Potagem das diferenças, a esquerda mês de Julho (Cenários 7 e 19) e a direita mês de Novembro (Cenários 11 e 23).

Figura 5.8: Classificação da rotação do vetor velocidade no instante de preamar e meia maré enchente para pontos localizados no canal principal do estuário. A) Sentido de rotação anti-horário do vetor referência (com vento). B) Sentido de rotação horário do vetor referência (com vento) em relação ao sem vento.

Figura 5.9: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré enchente de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.10: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de preamar de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.11: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré vazante de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.12: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de baixa-mar de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.13: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré enchente de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.14: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de preamar de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.15: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré vazante de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Figura 5.16: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de baixa-mar de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro). A) Campo de correntes no domínio selecionado 2DH para o instante de baixa-mar de sizígia mês de Julho. Os vetores em vermelho indicam o Cenário 7 (vetor referência – com vento) e os vetores em preto o Cenário 19 (sem vento).

Figura 5.17: Perfil longitudinal do módulo de velocidade 2DH gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia MA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 19 e 23, Julho e Novembro sem a influência do vento.

Figura 5.18: Perfil longitudinal do módulo de velocidade 2DH gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia MA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 7 e 11, Julho e Novembro com a influência do vento.

Figura 5.19: Perfil da elevação gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia MA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 19 e 23, Julho e Novembro sem vento.

Figura 5.20: Elevações geradas pelo SisBaHiA[®] na Estação A (Fronteira Aberta), Estação B (Entrada do Estuário), Estação H (Estreito do Rio Jundiá) e Estação I (Montante do Jundiá).

Figura 5.21: Perfil da elevação gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia MA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 7 e 11, Julho e Novembro com vento.

Figura 5.22: Campo de correntes no domínio do modelo velocidades médias na vertical obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de sizígia. Quadro acima em situação de baixa-mar e quadro abaixo em meia maré enchente. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

Figura 5.23: Campo de correntes no domínio do modelo velocidades médias na vertical obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de sizígia. Quadro acima em situação de preamar e quadro abaixo em meia maré vazante. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

Figura 5.24: Campo de correntes no domínio do modelo velocidades médias na vertical obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de quadratura. Quadro acima em situação de baixa-mar e quadro abaixo em meia maré enchente. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

Figura 5.25: Campo de correntes no domínio do modelo velocidades médias na vertical obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de quadratura. Quadro acima em situação de preamar e quadro abaixo em meia maré vazante. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

Figura 5.26: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 7 (Julho com vento) e 19 (Julho sem vento), para a Estação E ao longo dos 31 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

Figura 5.27: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 11 (Novembro com vento) e 23 (Novembro sem vento), para a Estação E ao longo dos 30 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

Figura 5.28: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 7 (Julho com vento) e 19 (Julho sem vento), para a Estação H ao longo dos 31 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

Figura 5.29: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 11 (Novembro com vento) e 23 (Novembro sem vento), para a Estação H ao longo dos 30 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

Figura 5.30: Campo de correntes residuais no domínio modelado, considerando 31 dias, do Cenário 7 (Julho com vento). A) Proximidades do estreito do Rio Jundiá. B) Embocadura do Estuário do Rio Potengi.

Figura 5.31: Campo de correntes residuais no domínio modelado, considerando 30 dias, do Cenário 11 (Novembro com vento). A) Proximidades do estreito do Rio Jundiá. B) Embocadura do Estuário do Rio Potengi.

Capítulo 6

Figura 6.1: Localização da região fonte utilizada no lançamento de partículas do modelo Lagrangeano do SisBaHiA[®].

Capítulo 7

Figura 7.1: Isolinhas da função Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBAHIA[®]. Quadro a esquerda para a situação de julho (Cenário TR 1) e quadro a direita para a situação de novembro (Cenário TR 2).

Figura 7.2: Posição das partículas obtida numericamente pelo SisBAHiA[®] no estuário do rio Potengi. A) quadros que correspondem ao instante de tempo do primeiro dia de simulação, B) quadros que correspondem ao décimo quinto dia de simulação e C) quadros que correspondem ao trigésimo primeiro e trigésimo dia de simulação, da esquerda para a direita respectivamente.

Figura 7.3: Isolinhas da função Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para a situação do Cenário TR 3, durante os 365 dias do ano de 2010. Setas em vermelho indicam os principais lançamentos de efluentes e as áreas em amarelo indicam os locais de carcinicultura. Retas tracejadas demarcam três regiões distintas, (A) que vai da embocadura do Estuário a proximidade do Porto, (B) da proximidade do Porto a Felipe Camarão e (C) de Felipe camarão a parte mais interna do Estuário.

Figura 7.4: Posição das partículas e isolinhas de concentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 1. Quadro (A) se refere ao instante das 04:00 hs do dia 06/11/2010 (6 horas após o início lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 06/11/2010 (12 horas após o início lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 04:00 hs do dia 07/11/2010 (30 horas após o início lançamento).

Figura 7.5: Posição das partículas e isolinhas de concentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 2. Quadro (A) se refere ao instante das 04:00 hs do dia 06/11/2010 (6 horas após o início lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 06/11/2010 (12 horas após o início lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 04:00 hs do dia 07/11/2010 (30 horas após o início lançamento).

Figura 7.6: Posição das partículas e isolinhas de concentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 3. Quadro (A) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 08/11/2010 (60 horas após o início do primeiro lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 11/11/2010 (132 horas após o início do primeiro lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 14:00 hs do dia 11/11/2010 (04 horas após o fim do último lançamento).

Figura 7.7: Posição das partículas e isolinhas de concentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 4. Quadro (A) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 08/11/2010 (60 horas após o início do primeiro lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 11/11/2010 (132 horas após o início do primeiro lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 02:00 hs do dia 12/11/2010 (04 horas após o fim do último lançamento).

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1: Dados demográficos.

Tabela 2.2: Dados demográficos da bacia Potengi.

Tabela 2.3: Saneamento básico no estado do Rio Grande do Norte.

Capítulo 3

Tabela 3.1: Valores de rugosidade equivalente para vários tipos de fundo

Capítulo 4

Tabela 4.1: Correção das componentes 1 e 2 das constantes harmônicas.

Tabela 4.2: Vazões afluentes ao domínio do Estuário do Rio Potengi.

Tabela 4.3: Diferença de fase da maré no contorno aberto do domínio.

Capítulo 5

Tabela 5.1: Tempos do SisBaHiA[®] utilizados na análise estatística dos cenários.

Tabela 5.2: Estatística dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente e preamar de quadratura.

Tabela 5.3: Estatística dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré vazante e baixa-mar de quadratura.

Tabela 5.4: Estatística dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente e preamar de sizígia.

Tabela 5.5: Estatística dos resultados do SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré vazante e baixa-mar de sizígia.

Tabela 5.6: Localização das estações no Estuário do Rio Potengi.

Capítulo 6

Tabela 6.1: Cenários adotados para a análise do lançamento de efluente através de uma região fonte.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
SUMÁRIO.....	xvii
CAPÍTULO 1	19
CAPÍTULO 2	24
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E PRINCIPAIS CONTRIBUINTES	24
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-AMBIENTAL	25
2.2.1 Clima	25
2.2.2 Agentes Costeiros	26
2.2.3 Textura de fundo.....	35
2.2.4 Batimetria	37
2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÔMICOS.....	37
2.3.1 Sociais	37
2.3.2 Econômicos	39
CAPÍTULO 3	41
3.1 O SisBaHiA®	41
3.1.1 Modelo Hidrodinâmico	42
3.1.2 Modelo de transporte Lagrangeano.....	48
CAPÍTULO 4	51
4.2 CENÁRIOS DO MODELO HIDRODINÂMICO.....	51
4.3 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO	51
4.4 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	52
4.5 PARÂMETROS AMBIENTAIS.....	53
4.5.1 Batimetria	53
4.5.2 Tipo de fundo e rugosidade equivalente.....	55
4.5.3 Marés.....	56
4.5.4 Vazões afluentes	57
4.5.5 Ventos	58
4.5.6 Diferença de fase.....	60
4.5.7 Massa específica da água e do ar.....	61

4.5.8 Condições de contorno	61
4.5.9 Condições iniciais	62
CAPÍTULO 5	63
5.1 ANÁLISE DOS DADOS	63
5.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE MARÉ	66
5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA	67
5.4 CLASSIFICAÇÃO DAS DIFERENÇAS DO VETOR VELOCIDADE	72
5.5 ANÁLISE LONGITUDINAL ATRAVÉS DA FATIA IA	85
5.5.1 Módulo da velocidade	85
5.5.2 Elevação	89
5.6 ANÁLISE DO PADRÃO ESPACIAL DAS CORRENTES	93
5.7 ANÁLISE HODOGRÁFICA	98
5.8 ANÁLISE DO ESCOAMENTO RESIDUAL	101
CAPÍTULO 6	104
6.1 ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA	104
6.1.1 Cenários para análise do TR	105
6.2 LANÇAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO ATRAVÉS DE UMA REGIÃO FONTE	106
6.2.1 Cenários para a análise do lançamento através de uma região fonte	109
CAPÍTULO 7	110
7.1 RESULTADOS DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS	110
7.2 RESULTADOS DO LANÇAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO ATRAVÉS DE UMA REGIÃO FONTE	116
CAPÍTULO 8	123
8.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os ambientes costeiros e especialmente os estuários tem se modificado ao longo de toda a trajetória da ocupação humana. Historicamente, observa-se que diversas civilizações habitaram terras de relevo vertical baixo, a margem de corpos d'água para se beneficiar de seus potenciais hídricos e/ou pesqueiros. Atualmente, estas áreas ainda são bastante atrativas para a ocupação humana, que de diversas maneiras se beneficiam das condições muito favoráveis proporcionadas por esses ambientes, instalando seus núcleos industriais, urbanos, e/ou portuários.

Os estuários são áreas sujeitas a intensas ações antropogênicas, que são capazes de modificar a distribuição e a variabilidade de propriedades físicas, concentrações de substâncias naturais e organismos biológicos, alterando o estado trófico e comprometendo todo o ecossistema (CUCCO e UMGIESSER, 2005).

Além disto, os estuários são ambientes sujeitos à influência de vários agentes dinamizadores, tais como: marés, agitação marítima, ventos, vazões fluviais e outros. Estes agentes são responsáveis pela geração de correntes, fazendo destes ambientes sistemas altamente dinâmicos (WRIGHT e SHORT, 1984).

Dentre os estuários existentes na costa brasileira, destaca-se neste estudo o Estuário do Rio Potengi. Maior e mais importante complexo estuarino-fluvial do estado do Rio Grande do Norte, comporta em suas margens 1.318,107 milhões de habitantes (IBGE, 2011), o que representa quase metade da população estadual. Berço da capital Natal, o Estuário do Rio Potengi concentra em seu interior fortes atividades econômicas para o estado, dentre as quais se destacam a carcinicultura e as atividades portuárias; figurando ainda como corpo receptor final dos efluentes lançados pelos Distritos Industriais e pelos núcleos urbanos da Grande Natal.

Do ponto de vista geoambiental o Estuário do Rio Potengi vem sendo estudado por diversos autores, dentre os quais se destacam os trabalhos de Frazão (2003), Cunha (2004), Araújo (2005), Figueiredo (2007), Correa (2008), Costa (2008), Dantas (2009), Medeiros (2009), Nicodemo (2010), Souza e Silva (2011), Cunha et al. (2011) e Ribeiro et al. (2011). Também é possível mencionar os trabalhos

técnicos patrocinados pelo governo do RN, que tiveram como executores os principais órgãos competentes do estado.

Em grande parte dos trabalhos anteriormente citados, destaca-se a relevância de se conhecer a circulação hidrodinâmica do Estuário como base para estudos de transporte de escalares ativos e/ou passivos, e de qualidade da água do mesmo. É possível ainda citar, que alguns destes fazem menção da importância de se conhecer a influência do cisalhamento eólico na alteração dos padrões de circulação, como bem dito em Leite (2007). Segundo a autora, a atuação dos ventos é um fator potencialmente importante na estruturação do transporte de massa e de energia no ambiente marinho, principalmente em regiões de alto potencial eólico, como no caso do Rio Grande do Norte, e onde se insere o Estuário do Rio Potengi.

Devido à falta de planejamento no uso e a ocupação do solo no entorno do Estuário do Rio Potengi, atualmente este corpo hídrico sofre pressões advindas dos núcleos urbanos, do Distrito Industrial de Macaíba (DIM), do Centro Industrial Avançado (CIA), das empresas de carcinicultura e do Porto de Natal.

Atualmente há um grande aporte de efluentes domésticos lançados sem tratamento nos rios que deságuam no Estuário; além disto, o Distrito Industrial da região metropolitana de Natal chega a lançar, em horário de pico, 350 metros cúbicos de dejetos por hora, dentre os quais se estima que 30% sejam tratados pelas próprias empresas (ARAÚJO, 2005).

A partir da Figura 1.1 adaptada de Medeiros (2009), é possível verificar as principais classes de uso e ocupação do solo no entorno do estuário, bem como, os principais pontos de lançamentos de esgoto doméstico e industrial.

Frente a todas estas considerações, torna-se indispensável a utilização de ferramentas com capacidade previsiva, muitas vezes chamadas de modelos ambientais, que visem contribuir para uma adequada gestão do corpo d'água por parte dos órgãos públicos responsáveis.

Modelos que simulam as distribuições espaciais e temporais de parâmetros não-conservativos de qualidade de água têm sido utilizados nos últimos anos como ferramenta científica e gerencial (CUNHA et al., 2006).

A aplicação de modelos para a estimativa de circulação e transporte fluido em corpos d'água é de importância fundamental, tanto no que se refere a sua valiosa contribuição na avaliação de impactos ambientais como na identificação e definição

de estratégias para operacionalização e gerenciamento de programas de monitoramento ambiental (ROSSO e ROSMAN, 1995).

Os modelos ambientais são ferramentas indispensáveis para integrar informações espacialmente dispersas, interpolando e extrapolando, espacial e temporalmente, as informações obtidas em poucos pontos para toda a área de interesse (ROSMAN, 2010).

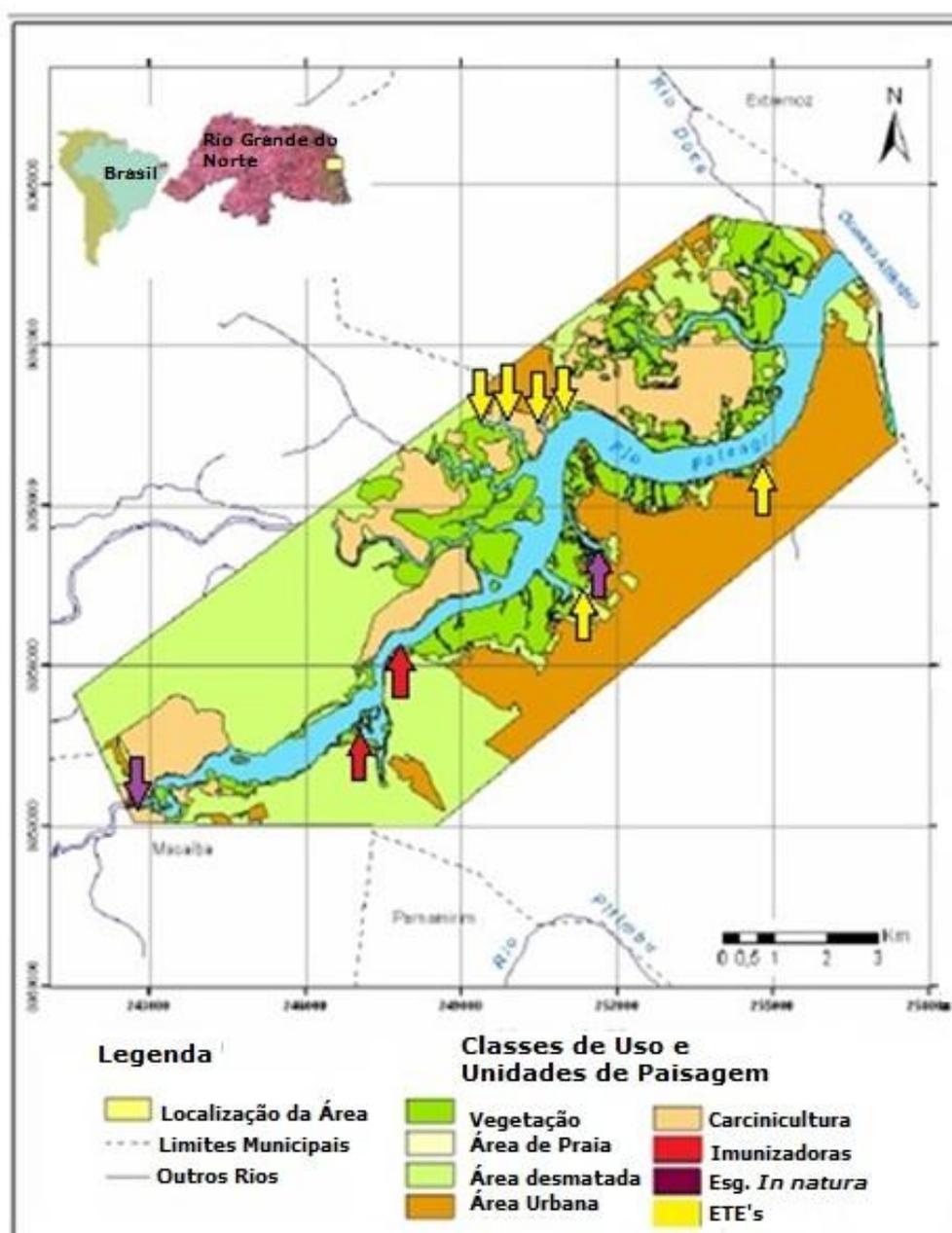


Figura 1.1: Uso, ocupação e principais lançamentos no Estuário do Potengi
Fonte: Adaptado, Medeiros (2009).

Dentre os diversos modelos disponíveis para caracterização hidrodinâmica e ambiental de um corpo d'água, o presente estudo lançou mão do SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), devido a sua larga aplicação em teses e dissertações, que comprovam a sua acurácia frente a corpos d'águas rasos e com pouca estratificação, tendo sido utilizado na região costeira do Rio Grande do Norte nos recentes trabalhos de Moura (2010), Góis (2008), Figueiredo (2007) e Leite (2007). O uso deste software amplia a integralização de conhecimentos entre a UFRN, a UFRJ e a UFPR.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo estudar a circulação hidrodinâmica ao longo do ano de 2010 através da determinação dos campos de velocidades e elevações, justificando os meses de maior e menor hidrodinâmica, bem como, avaliar a influência dos ventos sobre a mesma. Também é realizado um estudo do Tempo de Residência, bem como, a análise da dispersão de partículas representativas a um lançamento de efluente de uma ETE localizada no interior do Estuário.

Para a melhor compreensão do trabalho, o desenvolvimento da dissertação pode ser descrito num conjunto de oito capítulos distintos, sendo este o capítulo introdutório e os demais descritos a seguir:

Capítulo 2: contempla a caracterização físico-ambiental da área de estudo, i.e. localização, clima e agentes costeiros, tais como, vento, marés, ondas, correntes e transporte litorâneo, bem como, breves considerações a cerca da textura de fundo, da batimetria e dos aspectos sócio-econômicos da mesma.

Capítulo 3: contém a descrição do modelo computacional SisBAHiA[®] - com ênfase para os módulos hidrodinâmico e de transporte lagrangeano.

Capítulo 4: apresenta os cenários modelados no hidrodinâmico, bem como, o domínio de modelagem, a discretização da malha de elementos finitos, bem como, toda a parametrização necessária para que fosse possível implementar o modelo hidrodinâmico do SisBAHiA[®].

Capítulo 5: neste capítulo estão apresentados os resultados referentes à modelagem dos padrões hidrodinâmicos do Estuário do Rio Potengi.

Capítulo 6: trata da implementação do modelo de transporte lagrangeano do SisbaHiA[®], sendo apresentados os cenários de simulação do Tempo de Residência das partículas, bem como, as considerações sobre o lançamento de efluente sanitário através de uma região, com sua localização e os cenários adotados.

Capítulo 7: traz os resultados obtidos da implementação do modelo Lagrangeano. Inicialmente é analisado o resultado do Tempo de Residência das partículas para o cenário de maior e menor média do módulo de velocidade 2DH, e posteriormente são analisados os resultados das modelagens do lançamento de efluente através de uma região fonte localizada no interior do Estuário do Rio Potengi.

Capítulo 8: As conclusões e recomendações do trabalho são apresentadas nesse capítulo.

CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo contempla a caracterização físico-ambiental da área de estudo, i.e., localização, clima, vento, marés, ondas, correntes, transporte litorâneo, textura de fundo e batimetria, bem como, considerações a cerca dos aspectos sócio-econômicos da mesma.

2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E PRINCIPAIS CONTRIBUINTES

O Estuário do Rio Potengi está inserido na bacia do rio Potengi, que possui uma área aproximada de 4.307 km² (equivalendo a 7,7% do território estadual), comportando um volume de água de $3,4 \times 10^7$ m³, sendo a principal unidade hidrográfica do estado do Rio Grande do Norte (SERHID, 2010). Localiza-se entre as coordenadas 232500 UTM e 260000 UTM de longitude leste e 9352000 UTM e 9367500 UTM de latitude sul, tendo a sua margem direita a cidade de Natal, capital do estado, conforme Figura 2.1.

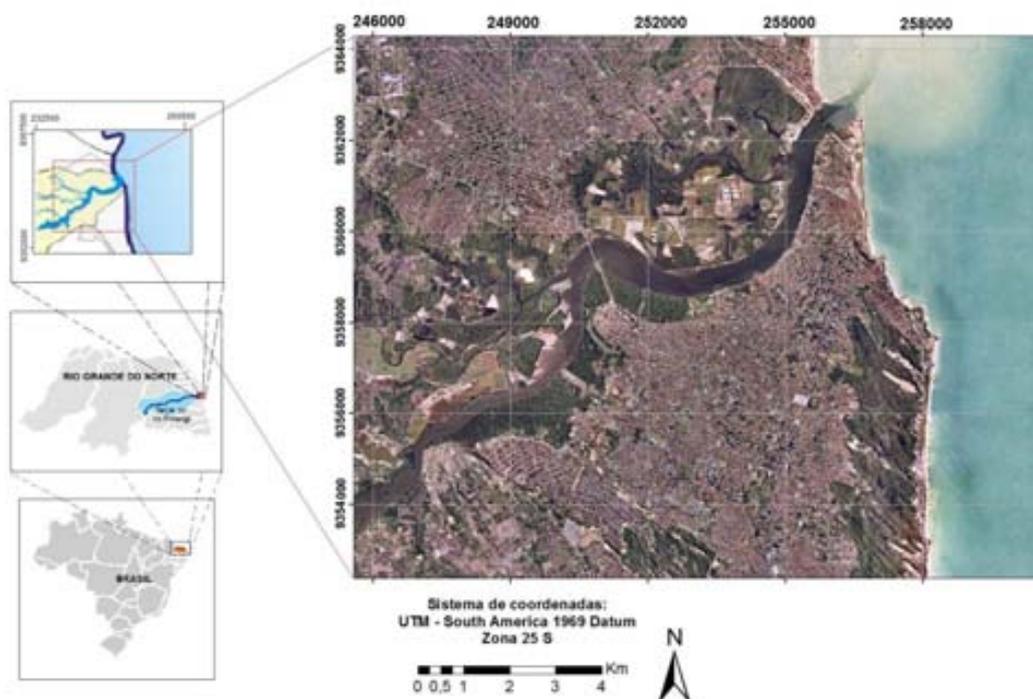


Figura 2.1: Mapa de localização do Estuário do Rio Potengi.

Os principais contribuintes de aporte fluvial são os rios, Doce, Jundiá e o Potengi, tendo como aporte marinho o Oceano Atlântico. O Estuário do Rio Potengi recebe ainda contribuição do riacho das Quintas, que possui uma extensão total menor que 500 m, e do Baldo que drena uma área de aproximadamente 4,7 km² (SERHID, 2010).

De acordo com os trabalhos de (CUNHA (2004), ARAÚJO (2005) e FIGUEIREDO (2007)), apesar do caráter intermitente dos contribuintes de aporte fluvial, as descargas são pequenas, mesmo durante o período de chuvas, propiciando com isto uma insignificante contribuição hidrológico-fluvial no estuário.

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-AMBIENTAL

Para uma melhor compreensão da dinâmica costeira da região, são apresentados a seguir alguns aspectos ambientais gerais referentes ao meio físico da área de estudo.

2.2.1 Clima

Conforme a classificação de Köppen, a região está situada numa zona de transição entre os climas As' - quente e úmido, e BSH - árido quente, com predominância do tipo As'.

O clima da região também está sujeito a interferência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), onde é possível ressaltar sua interferência nos anos em que a região apresenta duas estações bem definidas. O período seco, de maior duração, que se estende de setembro a fevereiro, se deve ao afastamento da (ZCIT) da costa em direção a Norte, provocando a ausência de chuvas e surgimento de ventos mais fortes; e o período chuvoso, que ocorre de março a julho, associa-se ao deslocamento da ZCIT para o Sul, provocando a formação de ventos mais brandos.

A temperatura média anual do Estado está em torno de 25,5°C, com máxima de 31,3°C e mínima de 21,1°C, sendo sua pluviometria bastante irregular, variando de 800 a 1.200 mm anuais. O número de horas de insolação mostra pouca variação, de 2.400 a 2.700 horas, por ano e a umidade relativa do ar apresenta uma variação média anual entre 59 e 76% (IDEMA, 2010).

Conforme os dados de precipitação e temperatura, Figura 2.2, da Estação Meteorológica A304 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no Campus da UFRN, é possível comprovar a irregularidade da precipitação. Observa-se que os períodos chuvosos podem se estender de março a abril e de junho a agosto como em 2002, ou de março a julho, como em 1995.

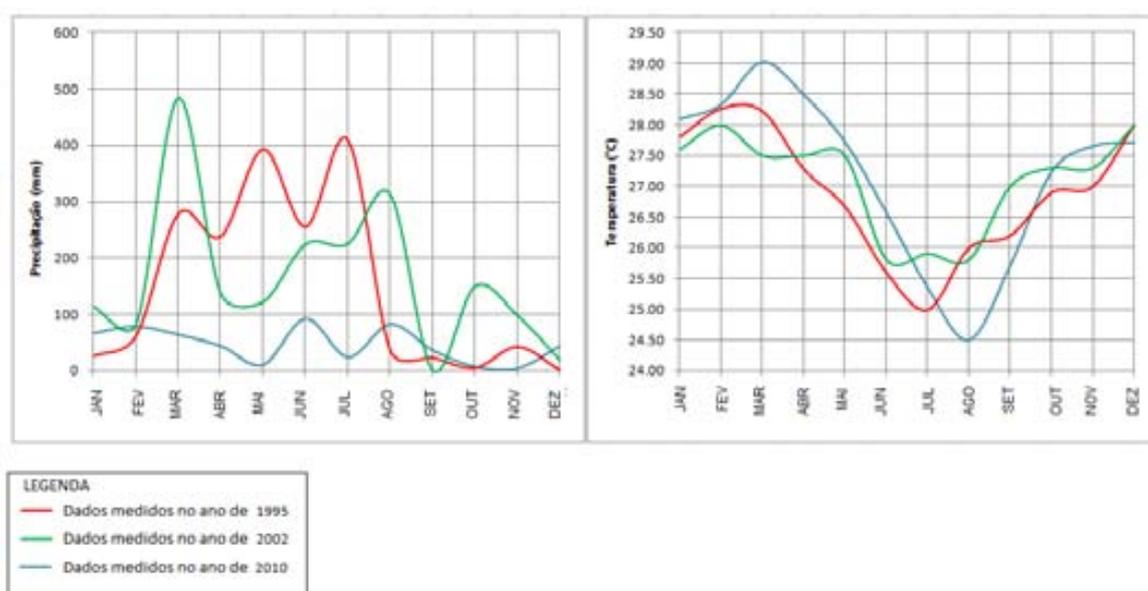


Figura 2.2: Precipitação e Temperatura ao longo dos anos de 1995, 2002 e 2010.

2.2.2 Agentes Costeiros

2.2.2.1 Vento

Os ventos predominantes no litoral do Rio Grande do Norte são provenientes do quadrante E, seguidos dos de SSE, conforme apresentado em Frazão (2003).

Ainda segundo o autor, os ventos do quadrante ESE apresentam maior intensidade, com velocidades que variam na escala entre dias e semanas. Sua maior intensidade compreende o período de julho a setembro, atingindo respectivamente velocidades entre 5,4 e 4,7 m/s, influenciando diretamente a propagação das ondas.

No campus Central da UFRN estão instaladas duas Estações Meteorológicas do INMET, sendo uma de Superfície Convencional (ESC) a 48,6 metros de altitude em relação ao nível do mar, que vem registrando dados de pressão, temperatura, umidade, precipitação, evaporação, insolação, intensidade e direção dos ventos desde o dia 01/01/1911; e uma de Superfície Automática (ESA) a 65 metros de altitude em relação ao nível do mar, que vem registrando dados de temperatura,

umidade, ponto de orvalho, pressão, radiação, precipitação, bem como, intensidade, direção e rajada dos ventos desde o dia 22/02/2003.

Ressalta-se que tanto a ESC quanto a ESA ficam localizadas por traz do cordão de dunas do Parque das Dunas, cujo alinhamento é Norte – Sul a uma altura média de 60 metros sobre o nível do mar.

Primeiramente, com o objetivo de se verificar o regime de vento em que a área de estudo está submetida, foram coletados os dados de intensidade e direção disponíveis através da ESC, desde o ano de 1995 até o ano de 2010. Após compilação foi observado que os anos em que os dados estavam completos, i.e. de janeiro a dezembro, eram os de 1995, 1997, 1998, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. A partir destes, com auxílio do Scilab, foram confeccionados mapas em forma de rosa dos ventos, nos quais é possível observar em porcentagem o número de ocorrência das faixas de intensidade, representadas através de cores, conforme Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

De maneira geral, pode-se observar que a predominância dos ventos nas proximidades da área de estudo está no quadrante SE, seguida dos quadrantes E e S, com velocidades médias na faixa de 5 a 6 m/s.

Contudo, ressalta-se que estes resultados não representam fidedignamente a variabilidade na direção do vento, indicando apenas uma tendência aproximada nas direções dos principais eixos (N, NE, E, SE, S, SW, W). Isto se deve ao fato da estação ser convencional, não possuindo assim a variabilidade das automáticas.

Outro quesito importante a se destacar, refere-se aos intervalos das coletas compreendidos entre as 09, 15 e 21 horas. Ao longo do dia, apenas três medições instantâneas são realizadas, desta forma a ESC não fornece uma quantidade de valores seguros para cálculo da média.

A partir daí surgiu à necessidade de se utilizar os dados das ESA. Devido ao seu mapa diário ser composto por 24 medições com variabilidade angular de 0 a 360 graus em torno do seu eixo, esta estação possui uma acurácia maior se comparada as de superfície convencional. Além disto, os dados são diretamente enviados a rede nacional de estações do INMET e podem ser visualizados online. Maiores informações no site: <http://www.inmet.gov.br>.

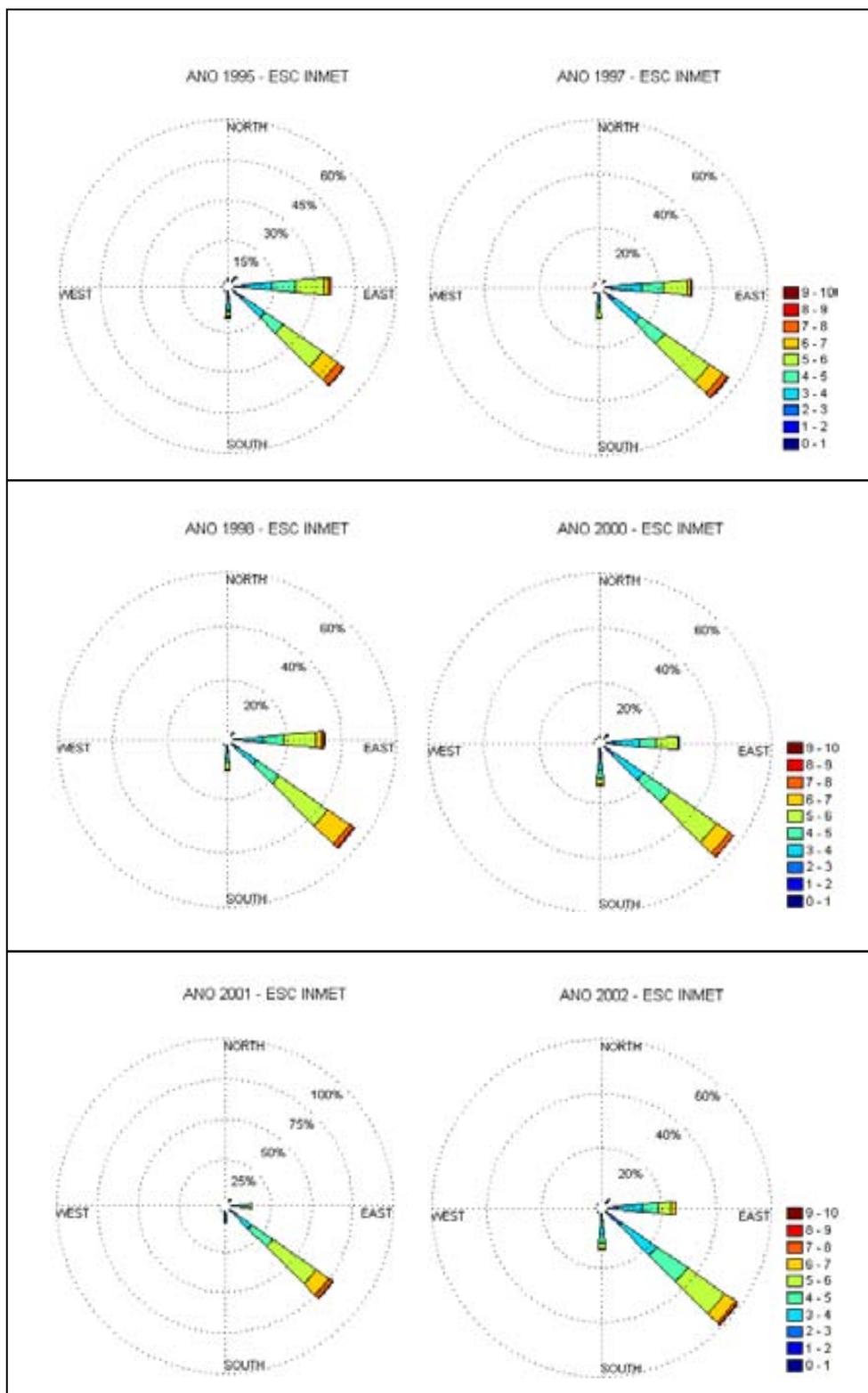


Figura 2.3: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 1995, 1997, 1998, 2000, 2001 e 2002, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

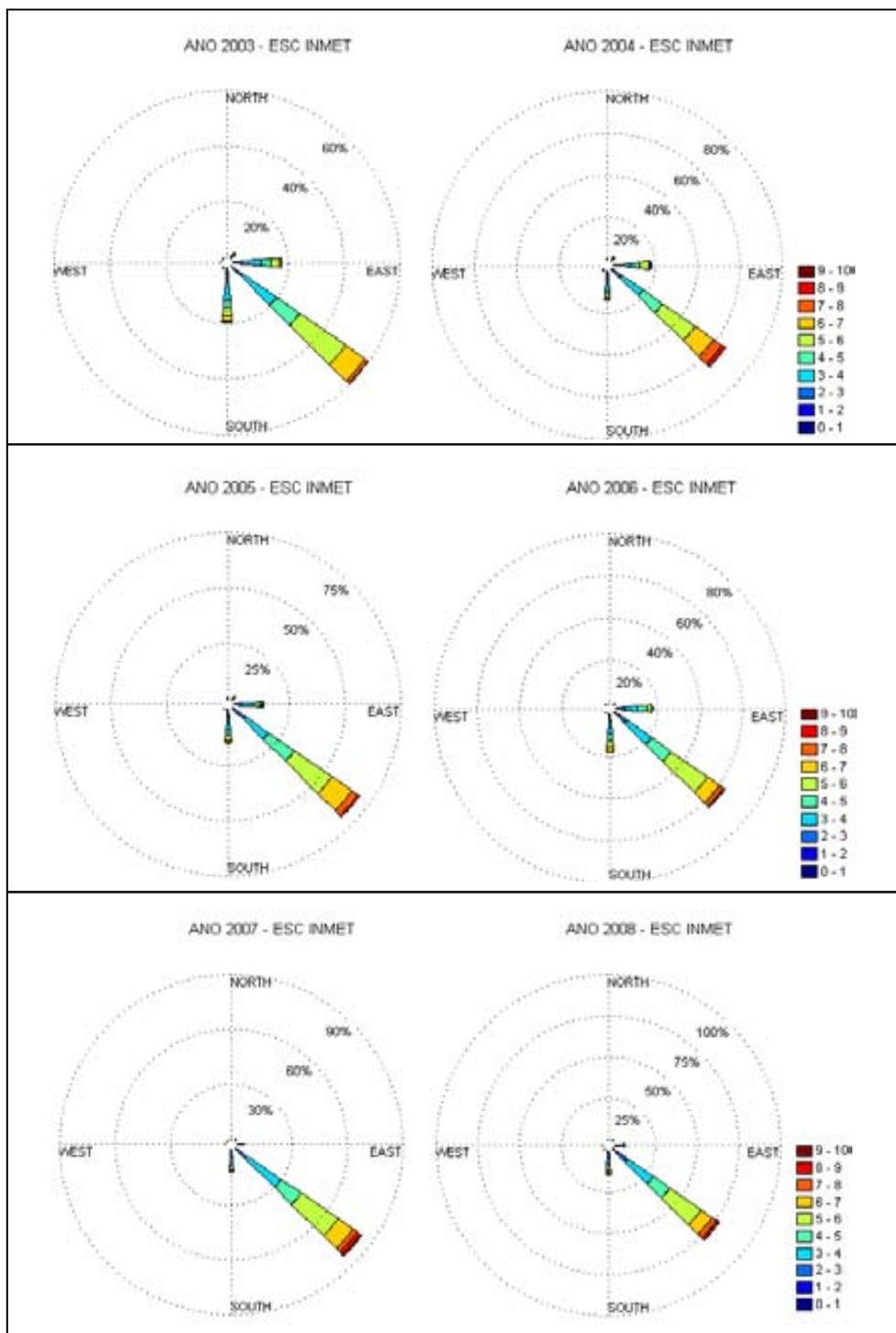


Figura 2.4: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 2003, 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

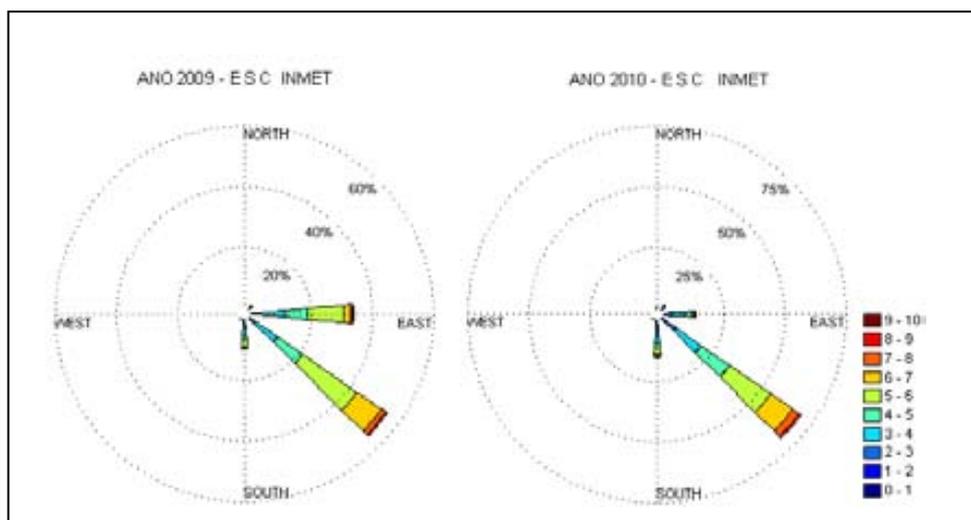


Figura 2.5: Padrão de vento na área de estudo nos anos de 2009 e 2010, obtido através da Estação de Superfície Convencional (ESC).

Com o objetivo de se ter a série anual de intensidade e direção que melhor representasse a área de estudo, foram construídos gráficos mensais dos dados da ESA para o ano de 2010, por este ser um ano onde os dados se encontravam disponível, bem como, completos de Janeiro a Dezembro. Da mesma forma que nas ESC, o Scilab foi utilizado para confeccionar os mapas em forma de rosa dos ventos, nos quais é possível observar em porcentagem o número de ocorrência das faixas de intensidade, representadas através de cores, conforme Figuras 2.6 e 2.7.

Observa-se que para o ano de 2010, no mês de Janeiro predominam os ventos de ESE, seguidos dos de SE em Fevereiro, enquanto em Março, apesar do predomínio dos ventos de ESE, a componente SE contribui com elevado percentual de incidência, mas com as menores velocidades.

No mês de Abril, continuam os de SE com a chegada dos de S. Já nos meses de Maio e Junho, nota-se a chegada dos ventos de S e os de SW com baixíssimas velocidades. Nos meses de Julho e Agosto, predominam os ventos de SE, SSE e SSO, cujas maiores velocidades são referidas aos de SE. Setembro marca o retorno dos ventos de SE, com velocidade média de 5,66 m/s, as maiores para este ano. Nos meses de Outubro, Novembro e Dezembro os ventos voltam definitivamente ao quadrante ESE e SE, com velocidades médias que variam de 4,0 a 5,0 m/s.

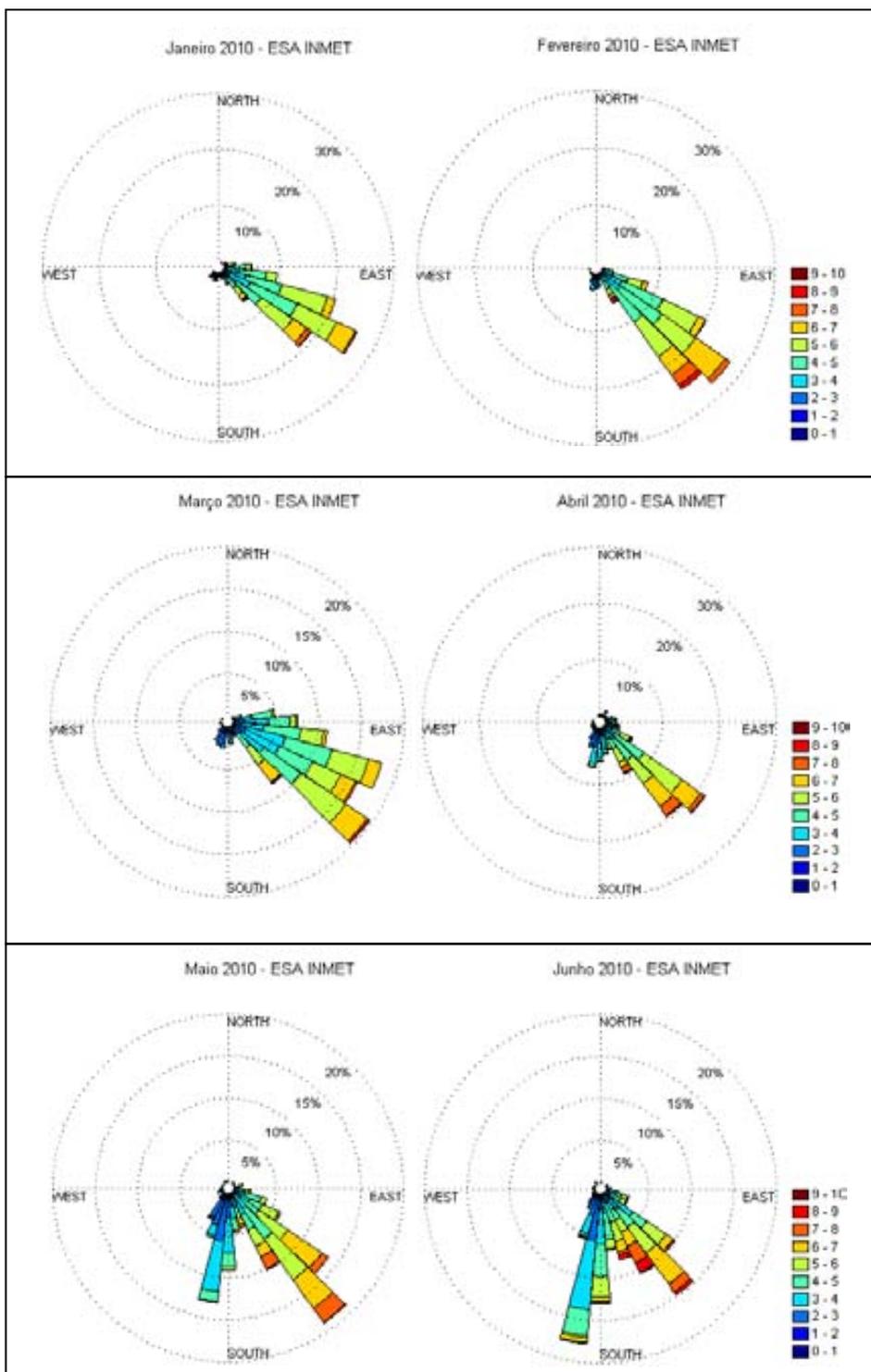


Figura 2.6: Padrão de vento na área de estudo - primeiro semestre de 2010, obtido através da Estação de Superfície Automática (ESA).

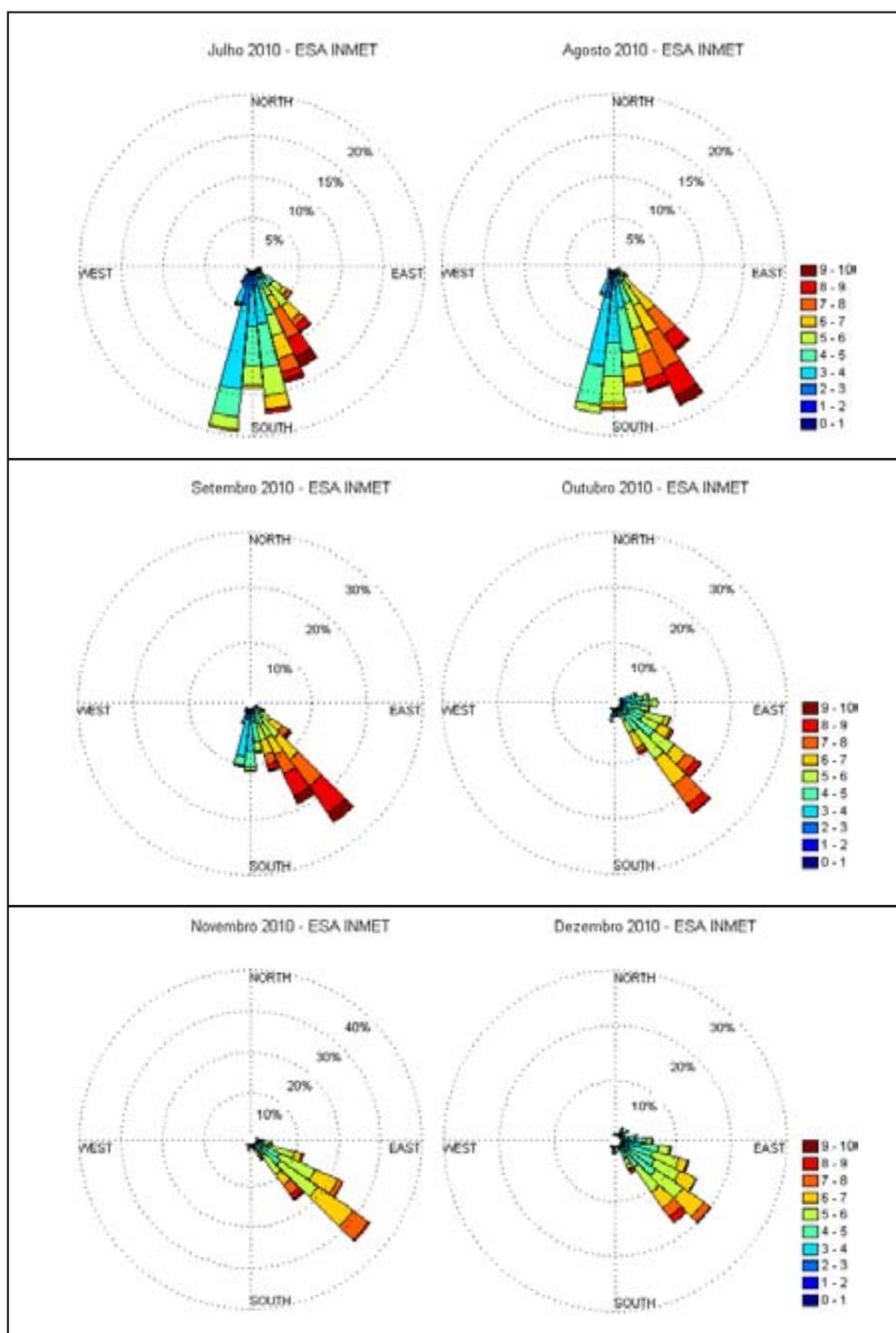


Figura 2.7: Padrão de vento na área de estudo - segundo semestre de 2010, obtido através da Estação de Superfície Automática (ESA).

2.2.2.2 Marés

As marés que ocorrem no Estuário do Rio Potengi e áreas adjacentes são de natureza semidiurna (apresentam duas marés altas e duas marés baixas durante um dia lunar, com período de maré de 12 hs e 25 min), com altura máxima em torno de 2,83 m, altura média de 1,32 m no período de sizígia e 1,33 m no período de quadratura caracterizando um regime de mesomaré (FRAZÃO, 2003). Os níveis médios das marés de preamar e baixa-mar podem ser observados na Figura 2.8.

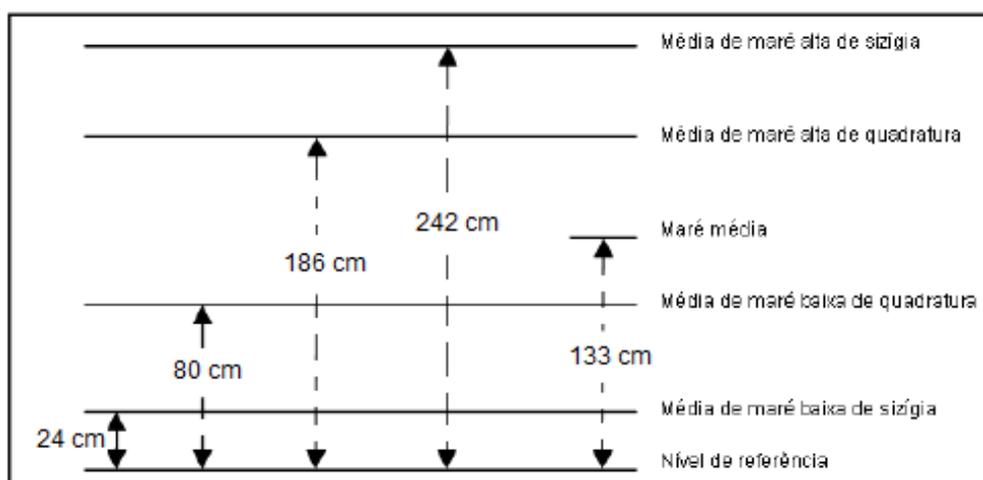


Figura 2.8: Níveis médios das marés no Porto de Natal.

Fonte: FEMAR (2010).

Através do catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), também é possível verificar as 24 componentes harmônicas suas semi-amplitudes e fases, para o Porto de Natal, localizado no interior do Estuário do Rio Potengi, Figura 2.9.

Nome da Estação :		NATAL (PORTO) – RN			
Localização :		No Porto, no antigo cais			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		05° 46,3' S	Longitude : 35° 12,3' W		
Período Analisado :		01/07/77 a 30/04/79	N° de Componentes : 80		
Análise Harmônica :		Método Almirante Santos Franco			
Classificação :		Maré Semidiurna.			
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) em	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) em	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	2,4	119
Ssa	-	-	N ₂	16,6	114
Mm	-	-	NU ₂	2,9	116
Mf	1,6	014	M ₂	80,9	124
MTM	-	-	L ₂	2,4	120
Msf	-	-	T ₂	1,5	134
Q ₁	1,3	123	S ₂	27,9	142
O ₁	5,2	163	K ₂	7,9	137
M ₁	0,6	275	MO ₃	0,2	319
P ₁	1,6	228	M ₃	0,5	140
K ₁	4,8	235	MK ₃	-	-
J ₁	0,2	295	MN ₄	0,8	344
OO ₁	0,4	009	M ₄	2,2	342
MNS ₂	0,5	120	SN ₄	0,3	041
2N ₂	2,4	108	MS ₄	1,7	016
Referências de Nível: RN-M2 (Aerofoto) chumbada no capeamento do cais perto da antiga casa do mareógrafo. RN (Portobrás) junto a casa de bombas					

Figura 2.9: Componentes harmônicas do Porto de Natal.
Fonte: FEMAR (2010).

2.2.2.3 Ondas

De acordo com os estudos realizados por Cunha (2004), em geral, observa-se uma redução da frequência e energia das ondas, da costa sul para a região nordeste, cujas alturas significativas máximas são inferiores a 4 metros. Natal apresenta ondas distribuídas principalmente nas direções E, cujas alturas significativas variam de 40 a 180 cm, e períodos entre 6,4 a 8,8 segundos; ENE cujas alturas significativas variam de 20 a 260 cm, e período entre 4,8 a 10,8 segundos; e ESE cujas alturas significativas variam de 40 a 260 cm, e período entre 4,8 a 10,4. Segundo o mesmo autor, após análise dos anos de 1998 e 1999, observou-se que a altura significativa das ondas na região de Natal, apresenta uma distribuição homogênea, que pode ser caracterizada por uma função lognormal ou Weibull $k = 1,9$, com altura média de 1,14 m, moda de 1,10 m e desvio padrão de 0,21 m, conforme Figura 2.10.

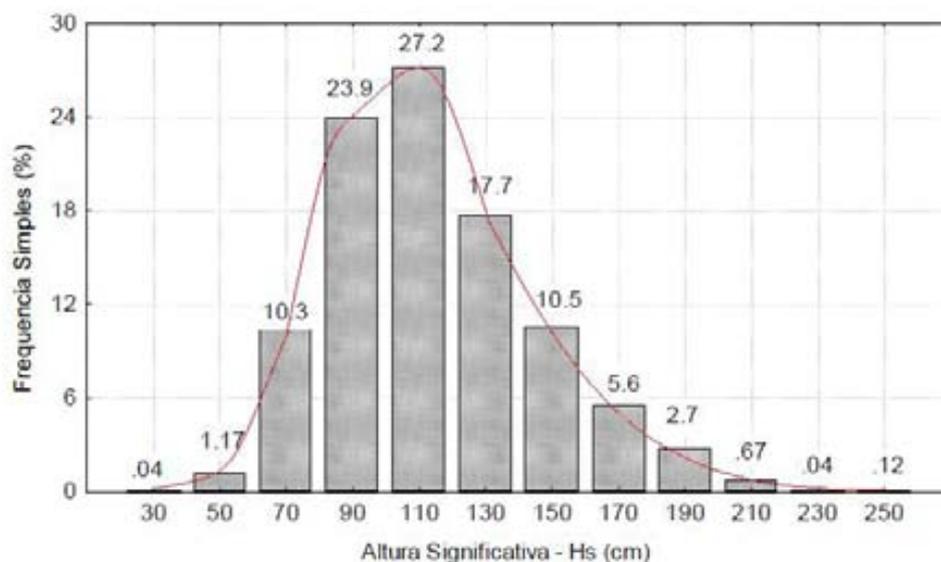


Figura 2.10: Histograma alturas significativas das ondas – 1998 e 1999.
Fonte: Adaptado, Cunha (2004).

2.2.2.4 Correntes e transporte litorâneo

A região é afetada pela Corrente Norte do Brasil, proveniente da Corrente Sul Equatorial que se bifurca ao encontrar a costa brasileira. As velocidades das correntes se situam entre 0,15 e 1,2 m/s, transportando até as profundidades de 500 m de 1 a 6 m².s⁻¹ (CAMPOS et al., 2001 e STRAMMA et al., 1990).

O transporte litorâneo na costa de Natal é da ordem de 500.000 m³ a 700.000 m³, se fazendo de forma unidirecional no sentido de sul para norte. A distribuição do transporte ao longo do perfil de praia apresenta o máximo na zona de arrebentação, em profundidades em torno de 2 m, tornando-se insignificante a partir da batimetria de -9 m. Setenta por cento do material é transportado em suspensão, sendo recolhido em grande parte pelo canal de acesso ao Porto de Natal, o qual impede que este material chegue às praias da zona norte de Natal (SOUZA, 1980).

2.2.3 Textura de fundo

A classificação quanto às principais texturas de fundo do estuário do Rio Potengi foi estudada por Frazão (2003), e pode ser observada na Figura 2.11. Nela, verifica-se que as fácies sedimentares principalmente encontradas são as arenosas. Contudo se pode ressaltar a presença de seixos e areia com cascalho nas áreas mais profundas do canal estuarino.

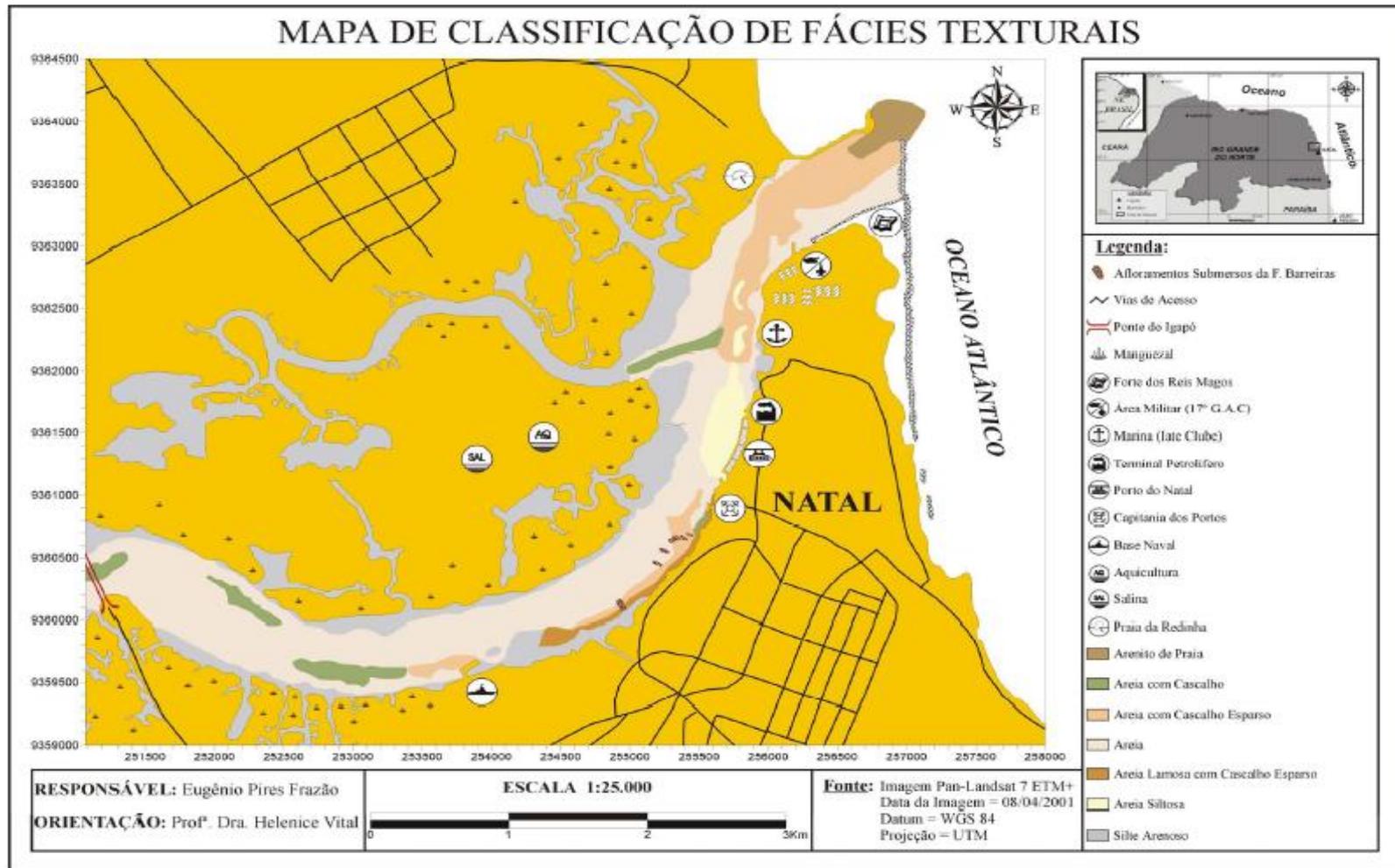


Figura 2.11: Textura de fundo estuário do rio Potengi.
 Fonte: Frazão (2003).

2.2.4 Batimetria

A região de estudo é uma área que sofre constantes alterações em sua batimetria, alterações estas que tem por finalidade dotar o Porto de Natal de melhores condições de navegabilidade.

Dentre as intervenções realizadas, destaca-se segundo a Companhia Docas do Rio Grande do Norte (CODERN):

- ❖ 1955 – Dragagem do canal de acesso da barra, com um volume de 49.840 m³;
- ❖ 1956 – Derrocagem de 25m da extremidade da Ponta do Picão para a cota de 8m;
- ❖ 1968 - Dragagem no canal de acesso, com um volume de 884.815 m³;
- ❖ 1971 – Derrocagem de um trecho da pedra da Baixinha;
- ❖ 1997 – Início das obras de derrocagem, dragagens e construção dos guias correntes, sendo realizado na 1ª etapa, a derrocagem da pedra da Bicuda;
- ❖ 2010 - Nova dragagem no canal de acesso passando de 10m para 12,5m.

Para esta região, segundo a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), são disponibilizadas duas Cartas Náuticas, a n° 802 – Porto de Natal e a n° 810 – Proximidades do Porto.

A carta 802 teve sua primeira edição em 1972 e a última em 2000, passando apenas por algumas correções até 2006. Já a 810, teve sua primeira e ultima edição em 1972, passando por uma última revisão em 2005. Ambas estão disponíveis no site: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/cartas/cartas.html>.

2.3 ASPECTOS SOCIO-ECONÔMICOS

2.3.1 Sociais

Segundo dados do último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (2011):

A população residente absoluta de 2010 dos municípios da Região Metropolitana de Natal é de 1.351.004 habitantes, para uma área de 2.807,60 km², conforme Tabela 2.1.

Destaca-se ainda, que a taxa média de crescimento populacional do estado do Rio Grande do Norte alcançou um índice de 1,33% quando comparada com a de 2000, superando a taxa do nordeste de 1,07% e do Brasil de 1,17%.

Tabela 2.1: Dados demográficos.

Localidade	Área total (Km ²)	População Residente – Absoluta Total (hab.)	
		2000	2010
Natal	167	712.317	803.739
Ceará-Mirim	724	62.424	68.141
Extremoz	139	19.572	24.569
Macaíba	510	54.883	69.467
Monte Alegre	211	18.874	20.685
Nísia Floresta	307	19.040	23.784
Parnamirim	123	124.69	202.456
São Gonçalo do Amarante	249	69.435	87.668
São José de Mipibu	290	34.912	39.776
Vera Cruz	83	8.522	10.719
Rio Grande do Norte	52.810	2.776.782	3.168.027
Nordeste	1.558.196	47.693.253	53.081.95
Brasil	8.514.877	169.590.693	190.755.799

Fonte: IBGE (2011)

Tabela 2.2: Dados demográficos da bacia Potengi

Municípios	Área total (Km ²)	População Residente – Absoluta Total (hab.)	
		2000	2010
Riachuelo	262	5.760	7.067
Cerro Corá	393	10.839	10.916
São Tomé	862	10.798	10.827
Ruy Barbosa	125	3.686	3.595
Barcelona	152	3.990	3.950
Lagoa de Velhos	112	2.651	2.668
Sítio Novo	213	4.448	5.020
Senador Elói de Souza	167	5.028	5.637
Bom Jesus	122	8.608	9.440
Macaíba	510	54.883	69.467
São Gonçalo do Amarante	249	69.435	87.668
Ielmo Marinho	312	10.249	12.171
Santa Maria	219	3.778	4.762
São Pedro	195	6.776	6.235
São Paulo do Potengi	240	13.822	15.843
Presidente Juscelino (serra caiada)	167	7.005	8.768

Fonte: IBGE (2011)

A população residente absoluta de 2010 dos municípios inseridos na bacia do rio Potengi é de 264.034 habitantes, para uma área de 4.307,80 km², conforme Tabela 2.2.

De acordo com dados do IBGE (2010), o estado do Rio Grande do Norte possui em sua totalidade 167 municípios, onde todos possuem rede de distribuição de água. O aspecto negativo fica por conta da rede coletora de esgoto, pois apenas 59 destes municípios são beneficiados por ela.

O tratamento do esgoto também é um aspecto negativo para o Estado, pois apenas 38 municípios apresentam algum tipo de tratamento, sendo em sua grande maioria secundário, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Saneamento básico no estado do Rio Grande do Norte

Localidade	Número de Municípios										
	Total em		Com Rede de Distribuição		Com Rede de Coleta		Com Tratamento de Esgoto				
	2000	2008	2000	2008	2000	2008	2008				
						Total	Prelim.	Prim.	Sec.	Terc.	
Rio Grande do Norte	166	167	159	167	52	59	38	5	11	20	2
Nordeste	1.787	1.793	1.722	1.770	767	819	341	105	119	142	26
Brasil	5.507	5.564	5.391	5.530	2.877	3.069	1.587	334	451	906	148

Fonte: IBGE (2010)

2.3.2 Econômicos

A economia do Estado do Rio Grande do Norte desenvolve-se tendo como base as atividades concentradas nas áreas da agricultura, pecuária, pesca, extrativismo vegetal e mineral e, mais recentemente, o turismo e a carcinicultura.

O Estuário do Rio Potengi se destaca frente à economia do estado do Rio Grande do Norte, pois concentra em seu interior fortes atividades, dentre as quais se revelam como mais importantes, a carcinicultura, a pesca, as atividades portuárias e o turismo (RIBEIRO et al., 2011).

O PIB per capita da área de estudo, e aí se inclui a cidade de Natal, destaca-se frente ao PIB das demais cidades do RN, segundo dados do IBGE (2011).

Este fato se deve principalmente a produção de camarão, que tem se destacado na economia potiguar, garantindo presença frente às exportações, com uma representatividade de 65,92% em 2008 frente aos outros estados produtores (ABCC, 2011).

A consolidação da tecnologia de reprodução, bem como engorda facilitada pelas condições naturais existentes no estado, tais como, clima, posição geográfica e propícios ambientes de reprodução, tem facilitado esta expansão no cultivo de camarão (MEDEIROS, 2009).

O Porto de Natal tem na exportação de frutas seu grande destaque, segundo dados da Companhia Docas do Rio Grande do Norte (CODERN), cerca de 30% de toda movimentação do terminal, é com frutas. O porto vem se aprimorando também

na exportação de minério de ferro, onde atualmente se movimentam aproximadamente 31 mil toneladas/ano.

A operacionalização do Porto de Natal e sistema viário fluvial dependem das condições portuárias do estuário do rio Potengi. O porto comercial tem condições de operacionalização restritas, pois as zonas de armazenamento de carga e descarga se encontram inseridas na zona urbana, compreendendo parte dos bairros da Ribeira e Rocas, com poucas condições para expansão (FIGUEIREDO, 2007).

CAPÍTULO 3

SISTEMA DE MODELAGEM APLICADO

No presente capítulo se dará ênfase para os módulos hidrodinâmico e lagrangeano do SisBAHiA[®], os quais foram utilizados nesta pesquisa, apresentando uma descrição resumida dos modelos, suas equações governantes, condições iniciais e de contorno. Maiores detalhes podem ser encontrados na Referência Técnica do SisBaHiA[®] através do sitio www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

3.1 O SisBaHiA[®]

O SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (Versão 8.5), desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica, e na Área de Banco de Dados do Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, ambos da COPPE/UFRJ, é um sistema para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares ativos e/ou passivos em corpos d'águas naturais, tais como rios, reservatórios, lagoas, lagos, canais, baías, águas costeiras e estuários.

É composto pelos módulos: Hidrodinâmico, de Transporte Euleriano, de Qualidade de Água e Eutrofização, de Transporte de Sedimento e Evolução Morfológica do Fundo, de Transporte Lagrangeano (Determinístico e Probabilístico), de Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais, de Geração e Propagação de Ondas e de Análise e Previsão de Marés.

O Sistema faz interface com o programa de geração e edição de malha via elementos finitos (Argus One), como também com os programas de visualização de resultados gráficos (Grapher) e com o programa de geração de contornos e interpolador de dados (Surfer), possui ainda as ferramentas de gerencia de animações, inibidor de banco de dados, conversor de tempo entre dados e cópia de malhas e modelos. Vem sendo testado e aperfeiçoado desde 1987, e é utilizado como ferramenta em diversas dissertações e teses (Fernandes, 2010; Cavalcante, 2010; Feitosa, 2007, dentre outras), bem como em periódicos (Cunha et al., 2006; Cunha e Rosman, 2005; Martins et al., 2002, etc).

No Rio Grande do Norte é possível destacar as recentes dissertações de Moura (2010), Góis (2008), Figueiredo (2007) e Leite (2007), nas quais se ressaltam a capacidade previsiva deste Sistema.

3.1.1 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA[®] é de linhagem FIST (Filtered in Space and Time), no qual a modelagem da turbulência é baseada em técnicas semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*), otimizado para corpos de água naturais, onde eventuais gradientes de densidade sejam pouco relevantes, isto é, cujos forçantes sejam essencialmente barotrópicos. A versão 3D do FIST resolve as equações completas de Navier-Stokes com aproximação de águas rasas (ROSMAN, 1987).

A discretização espacial pode ser feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos ou via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos, que garante representações de quarta ordem. A discretização vertical da coluna de água usa diferenças finitas com transformação sigma, fazendo com que a discretização completa do domínio resulte em uma pilha de malhas de elementos finitos, uma para cada nível Z da transformação sigma, e o esquema de discretização temporal é via um método implícito de diferenças finitas, com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN, 2010).

O FIST3D utiliza uma técnica numérica em dois módulos, calculando, primeiramente, os valores da elevação da superfície livre e, em seguida, o campo de velocidades. Dependendo dos dados de entrada, os resultados podem ser 3D e 2DH, ou apenas 2DH.

Quando o 3D está acoplado ao 2DH, o FIST utiliza as elevações da superfície livre obtidas no módulo 2DH. Em seqüência, o módulo 2DH utiliza as tensões de atrito no fundo obtidas dos perfis verticais de velocidades, calculados no módulo 3D.

3.1.1.1 Resumo das equações governantes do módulo 2DH

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, compondo assim o modelo matemático fundamental para qualquer corpo d'água (ROSMAN, 2010).

De acordo com Rosman (1997), as equações necessárias para determinar as incógnitas da circulação hidrodinâmica em um escoamento 2DH integrado na vertical são (ζ, U, V) , conforme o sistema de coordenadas da Figura 3.1.

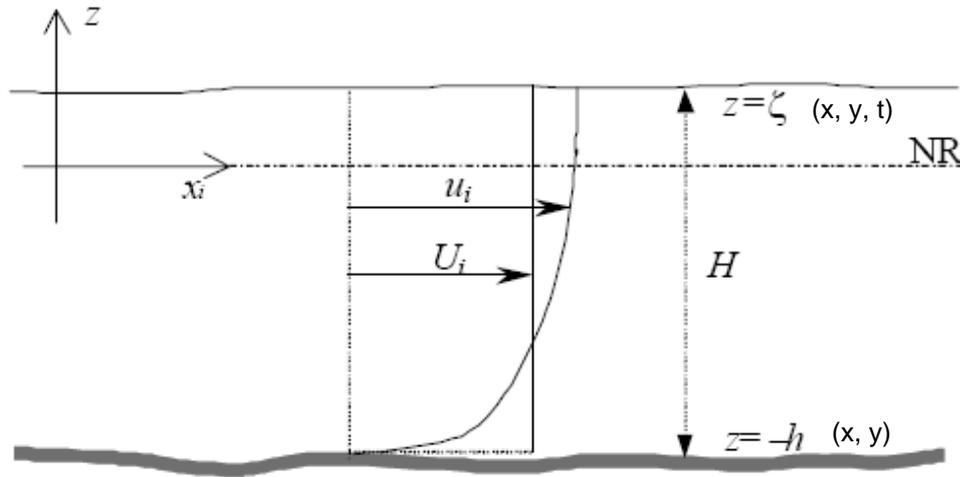


Figura 3.1: Sistema de coordenadas do sistema de modelagem (3D & 2DH).
Fonte: Rosman (1997)

❖ **Equação de Quantidade de Movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:**

$$\underbrace{\frac{\partial U}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}}_{(2)} = \underbrace{-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}}_{(3)} - \underbrace{\frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x}}_{(4)} + \underbrace{\frac{1}{H\rho_0} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right)}_{(5)} + \underbrace{\frac{1}{H\rho_0} (\tau_x^s - \tau_x^b)}_{(6)} + \underbrace{2\Phi \sin \theta V}_{(7)} - \underbrace{\frac{U}{H} \Sigma q}_{(8)} \quad (3.1)$$

Onde:

- U e V são componentes da velocidade do escoamento nas direções x e y ;
- $\zeta(x, y, t)$ é a elevação da superfície livre;
- g é a aceleração da gravidade;
- ρ é a densidade local do fluido;
- H é a profundidade instantânea;
- 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.

(1) Representa à aceleração local do escoamento 2DH, i.e., em uma dada posição, representa a taxa de variação temporal da quantidade de movimento média na vertical por unidade de massa.

(2) Representa a aceleração advectiva do escoamento 2DH, i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos advectivos médios na vertical, por unidade de área, e de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa.

(3) Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido à declividade da superfície livre na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.

(4) Representa a variação da pressão hidrostática na direção x (gradiente de pressão), devido às diferenças de densidade da água na direção x. Conforme indicado pelo sinal negativo, este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para onde a densidade é menor.

(5) Representa a resultante das tensões dinâmicas turbulentas 2DH no escoamento i.e., em um determinado instante, representam o balanço dos fluxos difusivos médios na vertical, por unidade de área, e de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa.

(6) Representa a tensão do vento na superfície livre por unidade de massa, podendo retardar ou acelerar o escoamento.

(7) Representa a tensão de atrito no fundo atuante no escoamento 2DH por unidade de massa. Conforme indicado pelo sinal negativo, esse termo sempre tende a desacelerar o escoamento.

(8) Representa a aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Esse termo é desprezível em latitudes próximas ao equador.

(9) Representa efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_P , evaporação q_E e infiltração q_I .

❖ **Equação de quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção y :**

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho_0} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + \frac{1}{H\rho_0} \left(\frac{\partial(H\bar{\tau}_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{H\rho_0} (\tau_y^s - \tau_y^b) - 2\Phi \sin \theta U - \frac{V}{H} \Sigma q \quad (3.2)$$

Onde:

- U e V são componentes da velocidade do escoamento nas direções x e y ;
- $\zeta(x, y, t)$ é a elevação da superfície livre;
- g é a aceleração da gravidade;
- τ_{yx} e τ_{yy} são as tensões turbulentas;
- ρ é a densidade local do fluido;
- H é a profundidade instantânea;
- 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 continuidade integrada ao longo da vertical:**

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \Sigma q \quad (3.3)$$

Onde:

$$U = \frac{1}{\zeta + h} \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad e \quad V = \frac{1}{\zeta + h} \int_{-h}^{\zeta} v dz \quad (3.4)$$

São as componentes da velocidade média na vertical nas direções x e y respectivamente. $H=h+\zeta$ é a altura da coluna d'água e $f = 2\Omega \sin\theta$ é o parâmetro de Coriolis, sendo Ω a velocidade angular de rotação da Terra e θ a latitude do local considerado. τ_x^s e τ_y^s são as componentes da tensão do vento sobre a superfície livre e τ_x^B e τ_y^B são as componentes da tensão de atrito no fundo.

Para se determinar a amplitude da rugosidade equivalente de fundo (ε), pode-se utilizar os valores recomendados por Abbot e Basco (1989), conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores de rugosidade equivalente para vários tipos de fundo

Leito de sedimentos	
Leito com transporte de sedimentos	0,0070m < ε < 0,0500m
Leito com vegetação	0,0500m < ε < 0,1500m
Leito com obstáculos (i.e. pedras, troncos)	0,1500m < ε < 0,4000m
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	0,0003m < ε < 0,0010m
Fundo de pedra lisa	0,0010m < ε < 0,0030m
Fundo de asfalto	0,0030m < ε < 0,0070m
Fundo com pedregulho	0,0070m < ε < 0,0150m
Fundo com pedras médias	0,0150m < ε < 0,0400m
Fundo com pedras	0,0400m < ε < 0,1000m
Fundo com rochas	0,1000m < ε < 0,2000m

Fonte: Abbot e Basco (1989)

Tensões de atrito devido ao vento

No SisBaHiA[®], o atrito na superfície livre devido ao vento é escrito em termos de uma formulação de velocidade quadrática, conforme Equação 3.5.

$$\tau_i^s = \rho_{ar} C_D W_{10}^2 \cos\Phi_i \quad [i = 1,2] \quad (3.5)$$

Onde:

- ρ_{ar} é a massa específica do ar;
- C_D é o coeficiente de arraste do vento;
- W_{10} é o valor local da velocidade do vento a 10 metros acima da superfície livre;
- Φ_i é o angulo entre o vetor de velocidade do vento local e a direção x_i ;

❖ Tensões de atrito no fundo

A tensão de atrito no fundo é calculada através da Equação 3.6.

$$\tau_i^s = \rho_0 \beta U_i \quad [i = 1,2] \quad (3.6)$$

Onde:

- ρ_0 é uma densidade constante de referência;
- U_i é componente da velocidade média na vertical na direção x;

Se o módulo 2DH for acoplado com o módulo 3D, tem-se ainda que definir o parâmetro β , Equação 3.5, que depende da velocidade de atrito, u_{*s} tensão do vento, ou u_{*b} tensão do fundo conforme Equação 3.8, que são funções do perfil de velocidade 3D.

$$\beta = \frac{\sqrt{g}}{C_h} |u_*| \quad (3.7)$$

$$u_{*s} = \sqrt{\frac{\tau^s}{\rho_0}}; u_{*b} = \sqrt{\frac{\tau^b}{\rho_0}} \quad (3.8)$$

$$C_h = 18 \log 10 \left(\frac{6H}{\varepsilon} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

- g é a aceleração da gravidade;
- ρ_0 é uma densidade constante de referência;
- τ^s e τ^b são respectivamente a tensão na superfície livre e no fundo;
- C_h coeficiente de Chezy;
- H é a profundidade instantânea;
- ε é a rugosidade equivalente de fundo.

3.1.1.2 Condições de contorno

Para os estudos dos padrões de circulação hidrodinâmica é necessária a definição das condições de contorno horizontais e verticais.

Segundo Rosman (1997), as condições de contorno para o módulo vertical, são a prescrição de velocidade nula no fundo e da tensão do vento na superfície livre.

Quanto às condições de contorno horizontais, há dois tipos, as fronteiras de terra e as abertas. As de terra caracterizam as margens do corpo d'água e os possíveis afluentes, sendo zero o valor da componente da vazão normal a linha de fronteira, pois se considera a margem como impermeável.

As fronteiras abertas caracterizam normalmente encontro de massas d'água, representando um limite do modelo, mas não um limite real do corpo d'água, mas sim onde usualmente se prescrevem as elevações do nível d'água.

Para a modelagem hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi será considerada a existência de rios afluentes e suas vazões, doravante mencionadas, bem como para a condição de contorno de terra adotar-se-á velocidade normal nula em nós ao longo das margens consideradas impermeáveis.

Nos contornos abertos, ou fronteiras abertas, serão impostas as elevações de nível d'água, obtidas a partir dos dados de maré.

3.1.2 Modelo de transporte Lagrangeano

O modelo Lagrangeano do SisBaHiA[®] é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Esse modelo tem a vantagem de utilizar o campo de velocidades gerado pelo modelo hidrodinâmico, sem estar restrito às eventuais limitações de escala impostas pela grade de discretização do mesmo. Portanto, pode ser eficientemente aplicado a problemas com fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico, ou com fortes gradientes (ROSMAN, 2010).

O modelo Lagrangeano também é de linhagem FIST (Filtered in Space and Time), no qual a modelagem da turbulência é baseada em técnicas semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*), conforme citado anteriormente.

3.1.2.1 Resumo das equações governantes

No modelo Lagrangeano as fontes contaminantes são volumes prismáticos, com seção horizontal elíptica ou retangular, cuja carga total (QT) é representada por um dado número de partículas lançadas na região fonte, em intervalos de tempos regulares, conforme Equação 3.10.

$$QT = Q_e \cdot C_e \cdot \Delta\tau \quad (3.10)$$

Onde:

- QT é a quantidade total de massa efluente liberada pela região fonte;
- Q_e é a vazão efluente;
- C_e é a concentração efluente;
- $\Delta\tau$ é o intervalo de tempo.

As partículas são dispostas na região fonte aleatoriamente e são advectadas pelas correntes, sendo posteriormente computadas através do modelo hidrodinâmico.

Conforme a Equação 3.11, pode-se observar que a posição de qualquer partícula no instante seguinte, P^{n+1} , é determinada através da expansão em série de Taylor a partir da posição anteriormente conhecida, P^n .

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2P^n}{dt^2} + T.A.D \quad (3.11)$$

Onde:

- T.A.D são termos de alta ordem desprezados.

As derivadas temporais de P são obtidas a partir do campo de velocidades hidrodinâmico resolvível, conforme Equação 3.12.

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad \frac{d^2P}{dt^2} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (3.12)$$

Onde na escala dos resolvíveis, as velocidades que promovem o transporte advectivo das partículas, $\vec{V}(u, v, w)$, ou seja, as velocidades hidrodinâmicas obtidas do FIST3D são as mesmas (ROSMAN, 2010).

3.1.2.2 Condições de contorno

Para a utilização do modelo Lagrangeano, devem ser admitidas duas condições de contorno. A primeira em relação à fronteira aberta, considerando-se que quando uma partícula atravessa um segmento de contorno aberto, ela sai do domínio modelado.

E a segunda, em relação ao contorno de terra. Onde a partícula poderá atingir a fronteira e retornar ao meio sem sofrer alteração em sua massa ou retornar ao meio com sua massa alterada (ROSMAN, 2010).

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Este capítulo apresenta os cenários, o domínio de modelagem, a discretização da malha de elementos finitos e os parâmetros ambientais de entrada no modelo hidrodinâmico, tais como batimetria, rugosidade, maré, massa específica da água e do ar, vazões dos rios afluentes, os ventos, a diferença de fase da maré no contorno aberto, as condições de contorno e as condições iniciais, utilizadas para a caracterização da circulação hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi.

4.2 CENÁRIOS DO MODELO HIDRODINÂMICO

Com o objetivo de analisar a influência do vento na circulação hidrodinâmica 2DH do Estuário do Rio Potengi ao longo do mês de maior e menor média do módulo de velocidade, do ano de 2010, vinte e quatro cenários foram considerados, ambos abordando os ciclos de quadratura e sizígia da maré astronômica, conforme descritos a seguir:

- ❖ **Cenários de 1 a 12:** Nestes cenários foram considerados como forçantes as marés usuais com a ação dos ventos horários, conforme Figuras 2.6 e 2.7. Aqui cada cenário corresponde a um mês do ano de 2010.
- ❖ **Cenários de 13 a 24:** Nestes cenários foram considerados como forçantes as marés usuais sem a ação dos ventos. Aqui cada cenário corresponde a um mês do ano de 2010.

4.3 DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO

Os contornos de terra e de mar do estudo foram adaptados dos utilizados por Figueiredo (2007). Eles foram definidos a partir da utilização de cartas náuticas

confeccionadas pelo Centro de Hidrografia Marinha (CHM) e disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha do Brasil.

Como base cartográfica principal, utilizou-se as cartas náuticas nº 802 (DHN, 2000) e nº 810 (DHN, 1972) aliadas a uma imagem do Google Earth. A Figura 4.1 mostra a definição do contorno da área de estudo desse trabalho.

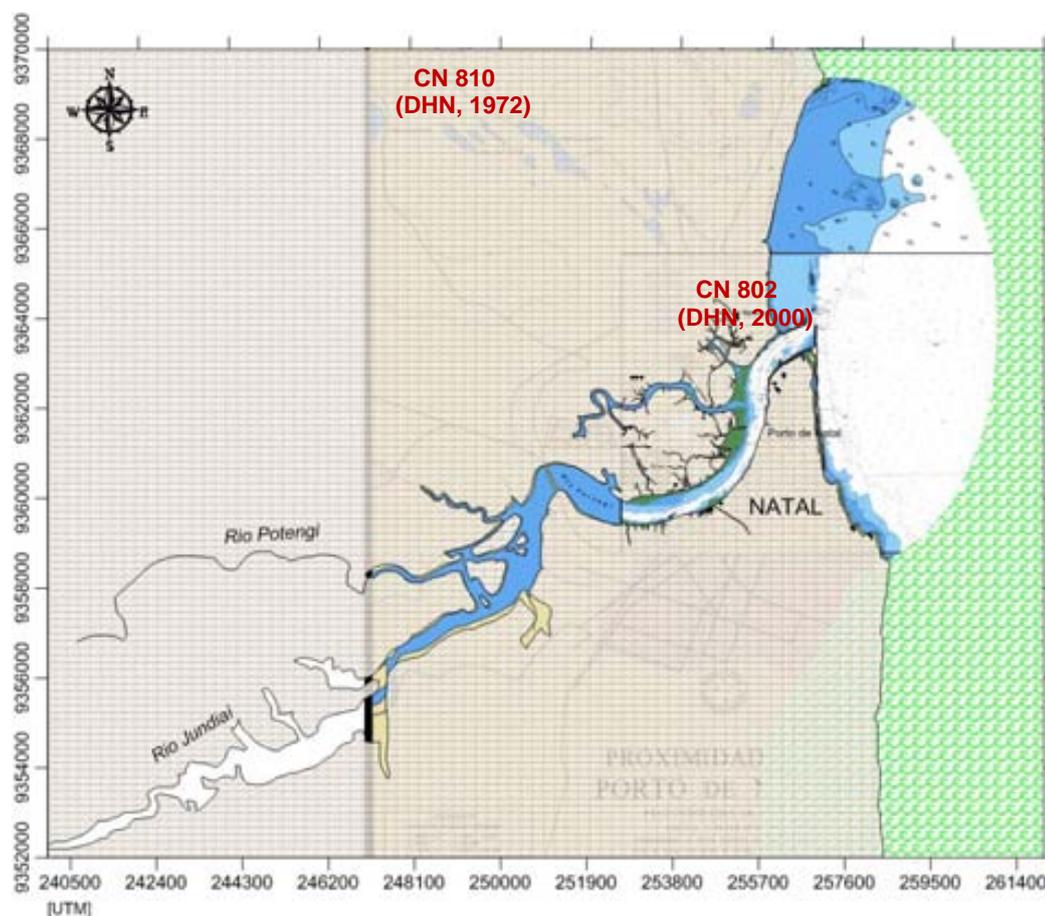


Figura 4.1: Contorno da região de domínio da modelagem hidrodinâmica.

4.4 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos usada na discretização foi refeita a partir da malha utilizada por Figueiredo (2007). A nova malha, que pode ser observada na Figura 4.2, possui um grau mais elevado de detalhamento, pois se buscou preservar os contornos naturais, procurando evitar elementos com grandes distorções geométricas, de modo a garantir uma boa precisão e estabilidade numérica.

A malha foi confeccionada a partir de elementos quadrangulares sub-paramétricos Lagrangeanos, em um total de 1.423 elementos e 6.774 nós, sendo 2.137 de contorno de terra e 43 de contorno aberto.

A área do domínio discretizado é de 54.224.836,968 m² e possui uma profundidade média de 8,75 metros.

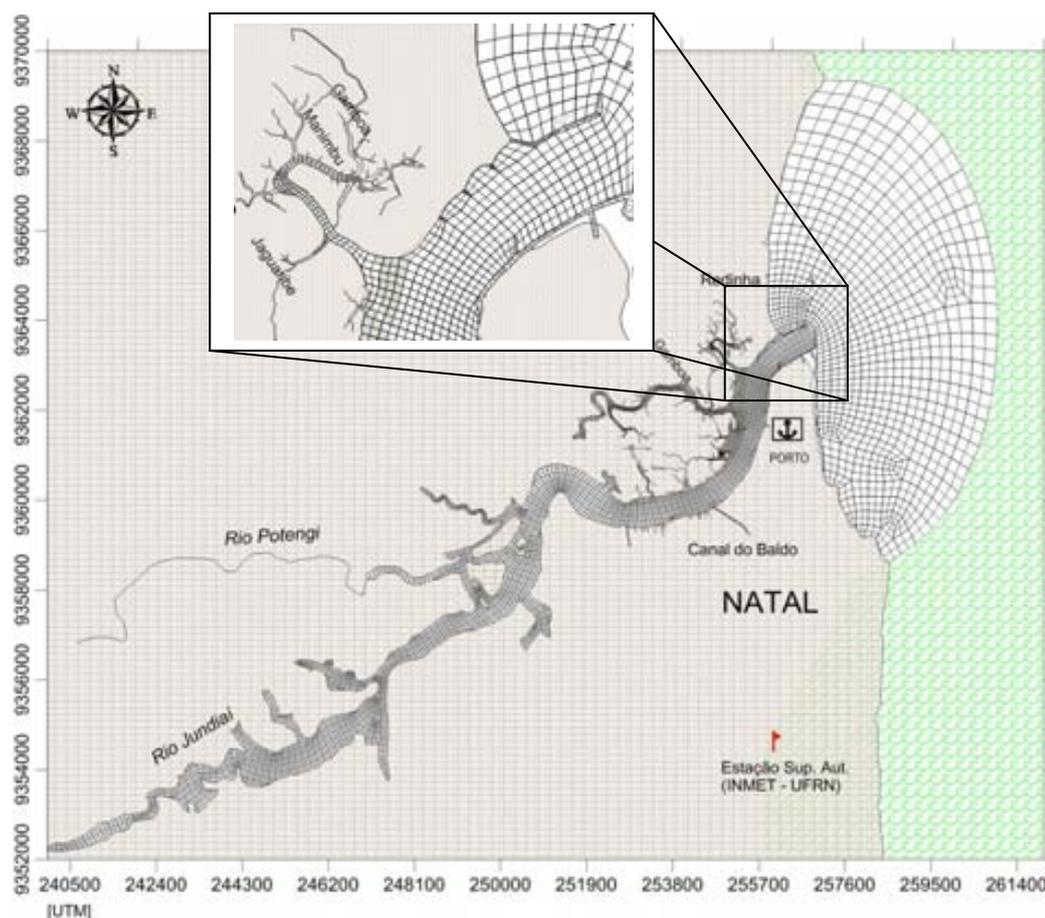


Figura 4.2: Malha de elementos quadrangulares Lagrangeanos.

4.5 PARÂMETROS AMBIENTAIS

Neste item são apresentados os parâmetros que caracterizam o domínio de modelagem e a forma como eles foram imputados no modelo hidrodinâmico. Ressalta-se que os mesmos estão relacionados a características específicas da região em estudo.

4.5.1 Batimetria

As informações relativas à batimetria utilizadas neste estudo foram às mesmas utilizadas por Figueiredo (2007) para o ano de 2004, conforme Figura 4.3.

Tais informações foram obtidas da carta náutica nº 802 e nº 810 da DHN, e de levantamentos batimétricos realizados pelo Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande, para o ano de 2004.

Os valores de profundidade nos nós da malha de elementos finitos foram calculados pelo modelo através de interpolações usando o método do VN (Vizinho natural), pois segundo estudo de Moura (2010), o MDT que melhor reproduz as feições de batimetria é o gerado a partir deste interpolador.

Para evitar que a profundidade durante o processamento de modelagem alcança-se valores negativos, foi preciso impor valores mínimos aos registros batimétricos, obtidos a partir da série temporal de elevação do nível do mar na entrada do estuário. Sendo assim, a profundidade mínima adotada dentro do estuário foi de 150,04 cm.

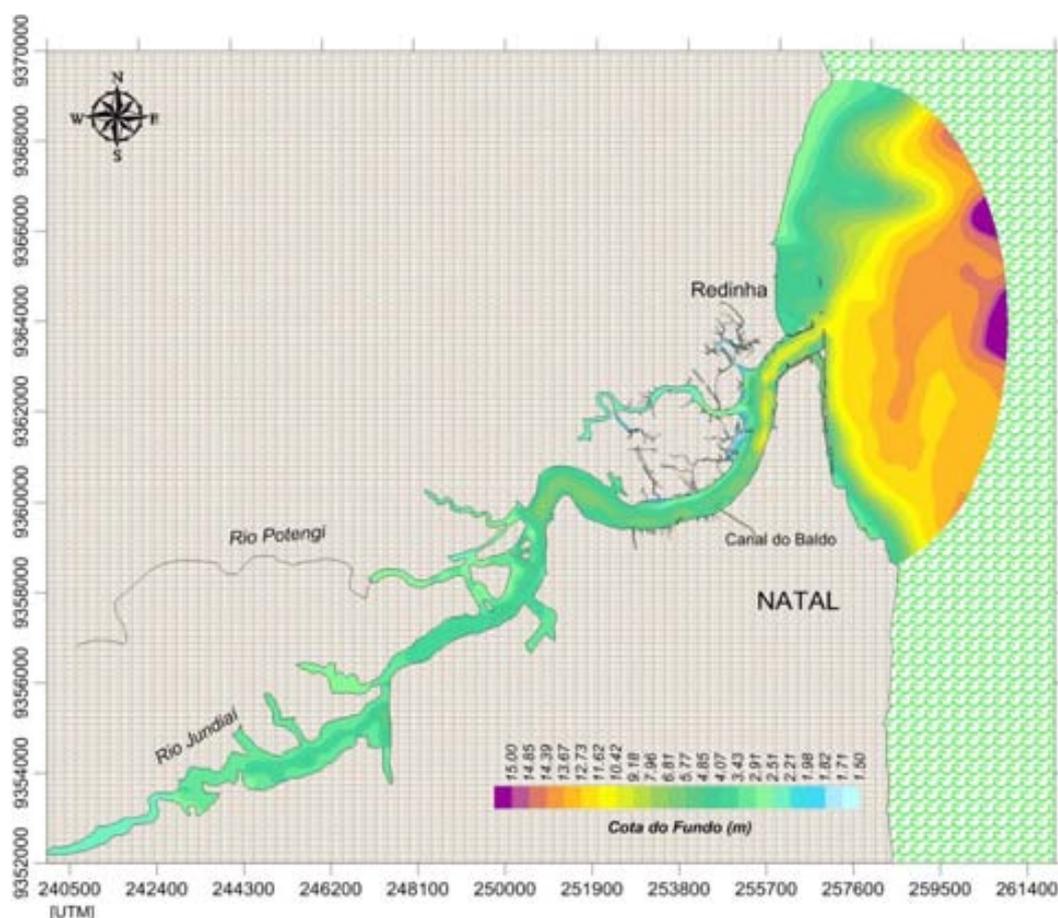


Figura 4.3: Visualização da topografia de fundo do domínio de modelagem, obtida através das cartas náuticas nº802 e 810.

4.5.2 Tipo de fundo e rugosidade equivalente

O coeficiente de atrito do fundo pode ser calculado via coeficiente de Chèzy. Este coeficiente depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo proposto por Abbot e Basco (1989).

Para a determinação da rugosidade equivalente do fundo do Estuário do Rio Potengi, foi utilizada a distribuição de sedimentos de Frazão (2003), conforme item 2.2.3, aplicada aos valores da amplitude da rugosidade (ε), conforme Tabela 3.1.

Sendo assim, pode-se considerar que o domínio de modelagem possui sedimentos de fundo que variam de cascalho, areia e lama. A Figura 4.4 mostra a distribuição espacial da amplitude da rugosidade de fundo no domínio de modelagem, nela é possível observar o valor de $\varepsilon = 0,03$ m em grande parte do domínio (Areia fina), e a gradação deste valor nos bancos de silte arenosos e cascalhos $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,17$ m.

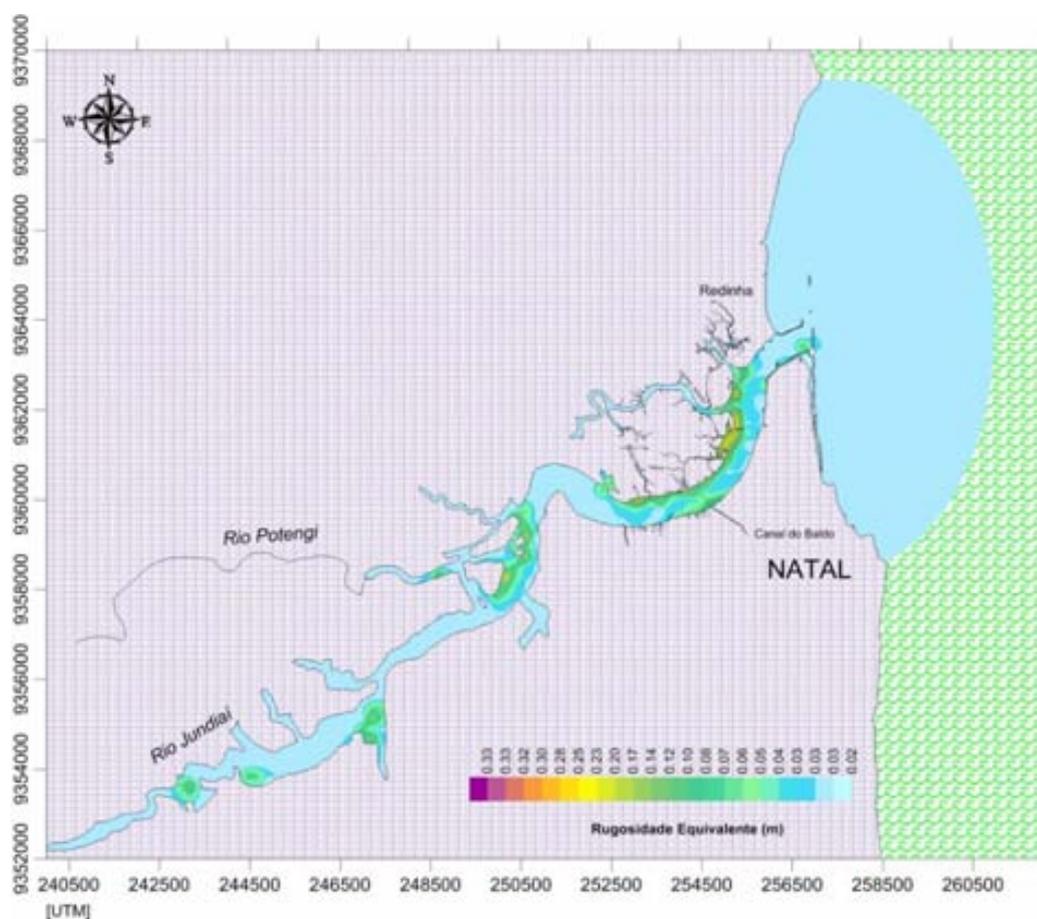


Figura 4.4: Rugosidade equivalente do domínio de modelagem.

4.5.3 Marés

A série temporal de elevação do nível d'água devido à maré astronômica adotada neste estudo corresponde a registros obtidos no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para o Porto de Natal, localizado na cidade do Natal.

Os registros compreendem 24 componentes harmônicas, que estão apresentadas na Figura 2.9 (FEMAR, 2010).

As constantes harmônicas das principais constituintes da maré, obtidas na estação maregráfica foram corrigidas de maneira que quando aplicada no contorno do domínio reproduzam a curva de maré no ponto conhecido (Porto de Natal), conforme apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Correção das componentes 1 e 2 das constantes harmônicas.

Constante	CONST. HARM. FEMAR		CONST. HARM. CORRIGIDAS		
	Amplitude (cm)	Fase (Graus)	Período(s)	Amplitude(m)	Fase (rad)
Mf	1,6	14	1.180.292,29	0,016	0,2443
Q1	1,3	123	96.726,08	0,012	2,1468
O1	5,2	163	92.949,63	0,048	2,8449
M1	0,6	275	89.399,69	0,005	4,7997
P1	1,6	228	86.637,20	0,015	3,9794
K1	4,8	235	86.164,09	0,044	4,1015
J1	0,4	9	83.154,52	0,002	5,1487
OO1	0,5	120	80.301,87	0,004	0,1571
MNS2	2,4	108	42.430,07	0,005	2,0944
2N2	2,4	119	46.459,35	0,024	1,8850
MU2	16,6	114	46.338,33	0,024	2,0769
N2	2,9	116	45.570,05	0,163	1,9897
NU2	80,9	124	45.453,62	0,029	2,0246
M2	2,4	120	44.714,16	0,796	2,1642
L2	1,5	134	43.889,83	0,024	2,0944
T2	27,9	142	43.259,22	0,015	2,3387
S2	7,9	137	43.200,00	0,275	2,4784
K2	0,2	319	43.082,05	0,078	2,3911
MO3	0,5	140	30.190,69	0,002	5,5676
M3	2,2	342	29.809,44	0,005	2,4435
M4	0,3	41	22.357,08	0,022	5,9690
SN4	1,7	16	22.176,69	0,003	0,7156
MN4	1,6	14	22.569,03	0,008	6,0039
MS4	1,3	123	21.972,02	0,017	0,2793

Fonte: FEMAR (2010).

A curva de maré utilizada na modelagem para o período de 01/01/2010 a 31/12/2010 pode ser observada na Figura 4.5. Para sua obtenção foram consideradas as 24 constantes harmônicas corrigidas, apresentadas na Tabela 4.1,

mais a data de cada período inicial da modelagem, ou seja, no SisBaHiA[®], optou-se por valores datados calculados através das constantes harmônicas dadas.

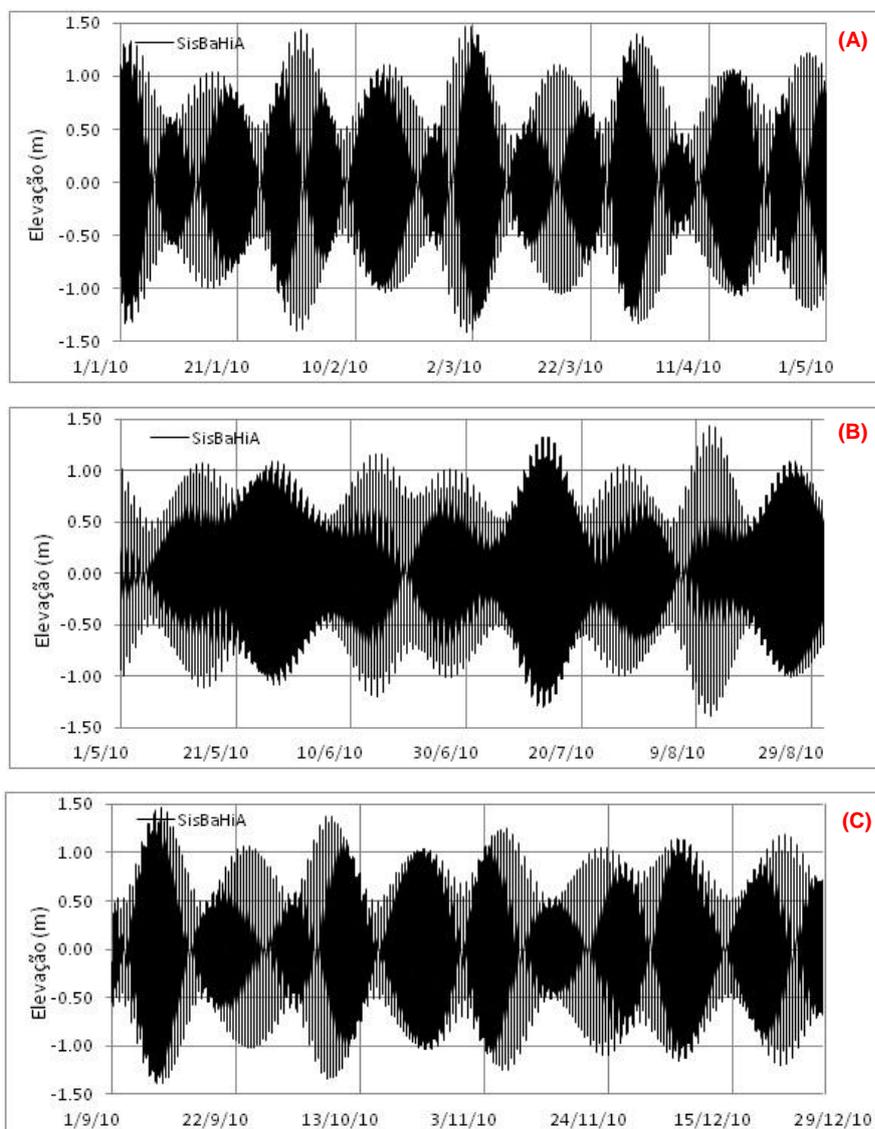


Figura 4.5: Curva de maré utilizada na modelagem para o período de 01/01/10 a 29/12/10, eixos verticais se referem aos instantes das 0:00 horas. (A) período de janeiro a abril; (B) período de maio a agosto e (C) período de setembro a dezembro.

4.5.4 Vazões afluentes

Foram adotadas como vazões afluentes na região modelada, as dos rios Potengi, Jundiá e Doce, sendo este último formado pela descarga da lagoa de Extremoz, bem como, a vazão do Canal do Baldo que recebe contribuição da drenagem urbana das bacias que estão em seu entorno, conforme Figura 4.6. As vazões médias permanentes adotadas podem ser observadas na Tabela 4.2, e se reportam aos estudos de Cunha (2004).

Tabela 4.2: Vazões afluentes ao domínio do Estuário do Rio Potengi

AFLUENTES	VAZÕES (m ³ /s)
Potengi	5,0
Jundiáí	5,0
Doce	2,0
Canal do Baldo	0,8

Fonte: Cunha (2004).

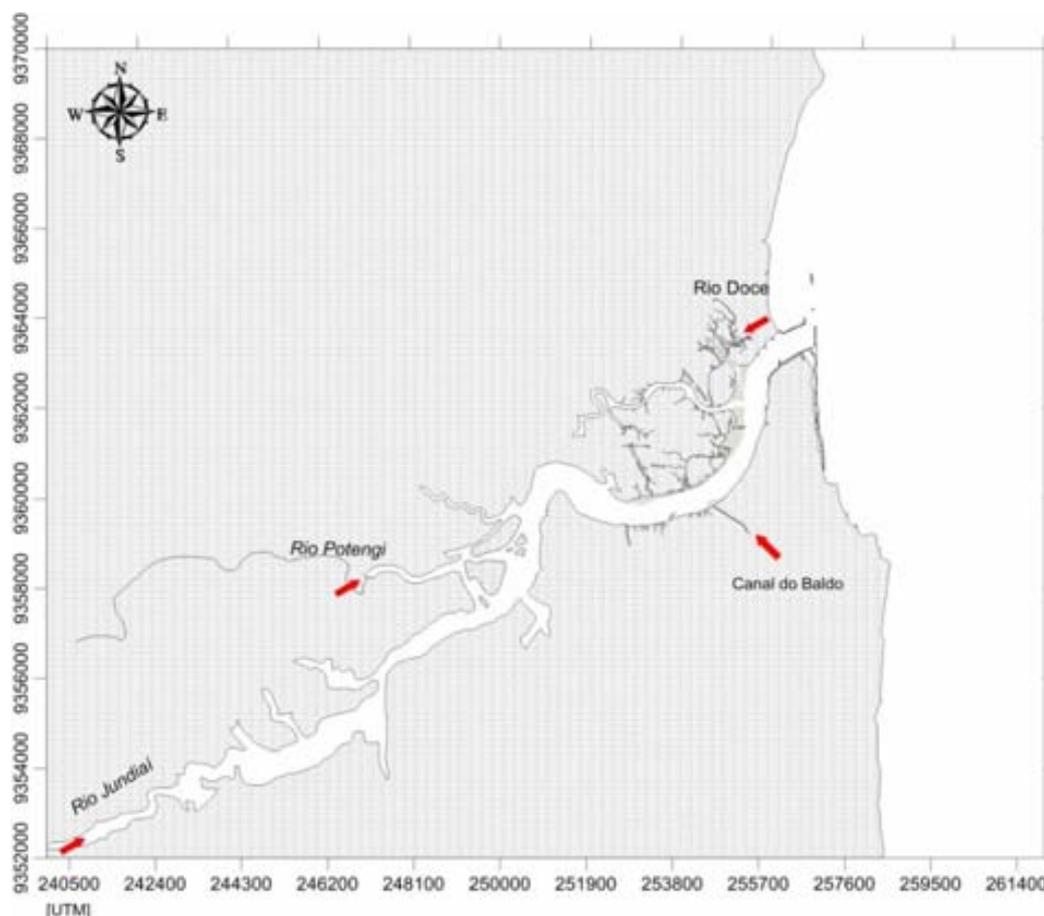


Figura 4.6: Localização dos pontos de vazões afluentes ao domínio do Estuário do Rio Potengi.

4.5.5 Ventos

Os dados de ventos utilizados na modelagem da circulação hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi foram selecionados da Estação Meteorológica de Superfície Automática do INMET – UFRN, já citada no tópico 2.2.2.1.

Estes dados se referem ao registro anual de 2010, pois conforme já observado, os valores das intensidades e direções são mais precisos que aqueles obtidos pela Estação de Superfície Convencional, bem como, estão dentro da faixa de valores observados na série histórica, Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

Após esta seleção, os dados foram corrigidos para bem representar as condições sobre a superfície da água, pois de acordo com Resio e Vincent (1977), devido a rugosidade da água ser diferente da de terra, a relação da velocidade do vento sobre a água para a velocidade do vento sobre a terra, ambos a um nível fixo, não é constante e varia de forma não linear, como pode ser observado na Figura 4.7.

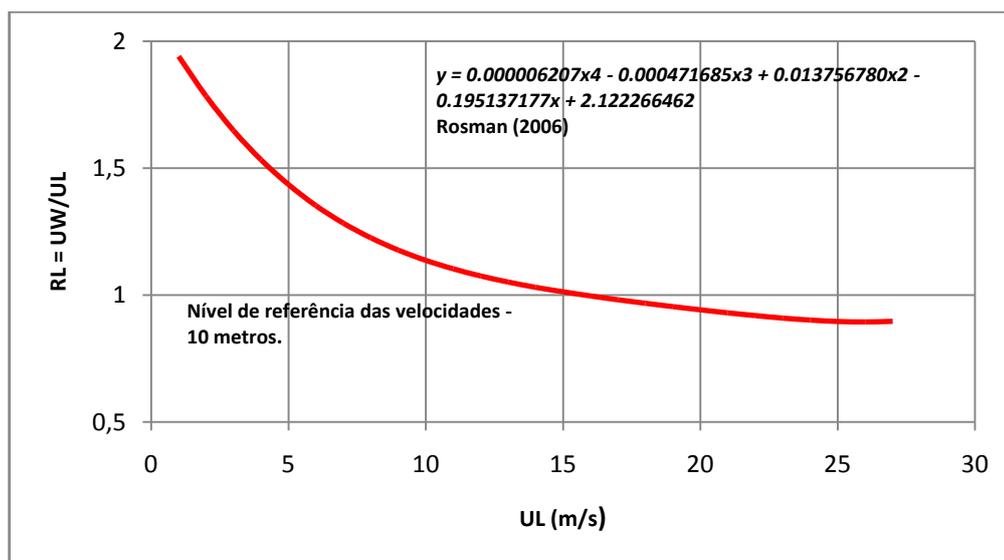


Figura 4.7: Relação RL da velocidade do vento sobre a água U_W para a velocidade do vento sobre a terra U_L . Fonte: Resio e Vincent (1977).

Para a simulação dos cenários no SisBaHiA[®], foi considerado o campo de vento uniforme no espaço, mas variando ao longo do tempo, sendo a direção e intensidade as mesmas em todos os nós da malha, para um mesmo instante de tempo, conforme pode ser observado no mapa de vento da Figura 4.8, que representa em forma de gráfico os dados horários de direção (vetores) e intensidade (cores) para o mês de janeiro de 2010; sendo feito da mesma forma para todos os meses do ano de 2010.

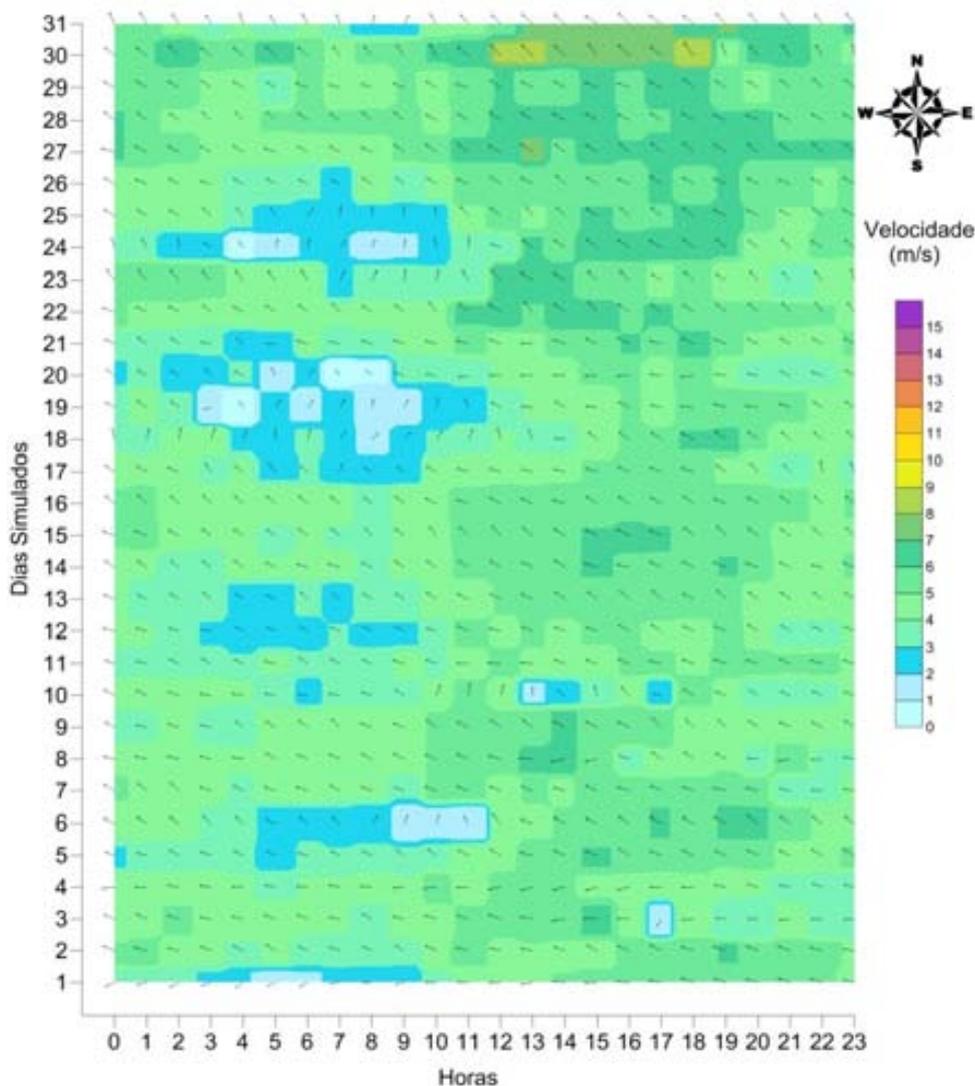


Figura 4.8: Direção e intensidade do vento no mês de Janeiro de 2010.

A análise deste mapa confirma o que Frazão (2003) cita em seu estudo, que ao longo do dia prevalece uma circulação secundária de brisa marítima, fazendo com que o ar aqueça mais rapidamente sobre a terra do que sobre as águas costeiras, decorrendo, deste fato, o decréscimo de pressão sobre a terra e uma convergência do ar marítimo sobre a mesma, resultando em velocidades máximas do vento do meio para o fim da tarde.

4.5.6 Diferença de fase

A diferença de fase da maré indica o tempo em segundos que a maré leva de um extremo ao outro da fronteira aberta (ROSMAN, 2010).

Para o cálculo da diferença de fase da fronteira aberta no Estuário do Rio Potengi, foram utilizados como pontos equidistantes o Cabo de São Roque e a

Lagoa Guaraíras, localizados respectivamente a uma Latitude de 05° 31,6' Sul e Longitude de 35° 15,5' Oeste, e Latitude 06° 10,4'Sul e Longitude 35° 05' Oeste. Após o cálculo é possível observar que a maré leva 399,81 segundos do nó 362 para o nó 536, que corresponde a linha de nós da fronteira aberta, conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Diferença de fase da maré no contorno aberto do domínio

Nó	Dif. Fase (Seg.)						
362	0,00	669	104,71	735	209,42	552	314,14
360	9,52	671	114,23	737	218,94	550	323,66
383	19,04	673	123,75	733	228,46	548	333,18
385	28,56	713	133,27	727	237,98	546	342,69
442	38,08	715	142,79	725	247,50	544	352,21
444	47,60	717	152,31	622	257,02	542	361,73
490	57,12	719	161,83	620	266,54	540	371,25
492	66,63	721	171,35	554	276,06	538	380,77
572	76,15	723	180,87	558	285,58	535	390,29
574	85,67	729	190,39	560	295,10	536	399,81
667	95,19	731	199,91	557	304,62		

4.5.7 Massa específica da água e do ar

Os valores da massa específica do ar e da água serão considerados constantes em todo o domínio de modelagem.

$$\rho_{\text{água}} = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

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

4.5.8 Condições de contorno

Para a modelagem hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi foi considerada a existência de rios afluentes, como já mencionado no item 4.5.4.

Como condição de contorno de terra impôs-se velocidade normal nula em nós ao longo das margens consideradas impermeáveis, e prescreveram-se as vazões médias dos rios afluentes e do canal do Baldo. Nos pontos de vazão prescrita, listados na Tabela 4.2, especifica-se o valor normal como sendo o valor desejado e impõe-se como zero a componente tangencial.

Os contornos abertos, ou fronteiras abertas, caracterizam normalmente encontros de massas d'água, representando um limite do modelo, mas não um limite real do corpo d'água, como a entrada do Estuário do Rio Potengi, caracterizando

convenientemente o encontro das águas do estuário com o mar. Ao longo das fronteiras abertas usualmente impõem-se as elevações de nível d'água.

Direções de afluxo ao domínio através de fronteiras abertas podem ser impostas ou calculadas pelo modelo em função da geometria do contorno. Como em um ponto de afluxo os efeitos da direção do fluxo só afetam de fato as proximidades do ponto, e são irrelevantes para a circulação no interior do Estuário do Rio Potengi, optou-se por adotar as direções de afluxo. As elevações de superfície livre prescritas são obtidas a partir dos dados de maré apresentados anteriormente, conforme seção 4.5.3.

4.5.9 Condições iniciais

É necessário informar, para o instante inicial de simulação, os valores da elevação da superfície livre e as componentes da velocidade 2DH para todos os nós do domínio. Neste trabalho, foi realizada a simulação com 'partida fria', referindo-se a uma condição inicial com nível plano e velocidades nulas, para os cenários 1 (janeiro com vento) e 13 (janeiro sem vento), pois por se tratar de um corpo de água relativamente pequeno e com escoamento fortemente barotrópico, observa-se que o modelo entra em regime em menos de três ciclos de maré.

Os resultados dos últimos passos de tempo destas simulações geraram as condições iniciais para uma "partida quente", com ζ_0 , U_0 e V_0 variados, para os cenários 2 (fevereiro com vento) e 14 (fevereiro sem vento), e assim subsequente para os demais.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES DO MODELO HIDRODINÂMICO

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à modelagem da circulação hidrodinâmica do Estuário do Rio Potengi. Vale ressaltar que os resultados apresentados nesta seção devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível realizar a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. Como as medições disponíveis para comparação referem-se ao ano de 2010, seria necessário alimentar o modelo com dados referentes a este período. Neste caso, a batimetria deveria ser aquela observada no período, com cuidado especial na região do canal principal que sofre dragagem constante; as vazões dos rios teriam que ser variáveis, e principalmente, a curva de maré usada no contorno aberto deveria basear-se em registros de maré em pontos mais próximos da fronteira.

No entanto, destaca-se que, como foram utilizados dados de vento medidos através da Estação de Superfície Automática do INMET – UFRN e corrigidos para bem representar a velocidade sobre a água; constantes harmônicas ajustadas para a fronteira aberta; marés datadas para os mesmos períodos das simulações, bem como, correções de diferença de fase da maré, sendo assim, comparações podem ser efetuadas entre os cenários.

5.1 ANÁLISE DOS DADOS

Conforme destacado na seção 4.2, para avaliação da circulação hidrodinâmica 2DH do Estuário do Rio Potengi sob influência dos ventos, 24 cenários foram determinados. Tendo em vista que a análise de todos estes cenários em seus momentos de preamar, baixa-mar, meia maré vazante e meia maré enchente em seus ciclos de sizígia e quadratura, seria impossível; foi traçada uma estratégia para apresentar os resultados.

A princípio se adotou como momento padrão para análise o maior pico de preamar de sizígia e quadratura, e o menor vale de baixa-mar de sizígia e quadratura, com seus referentes pontos de meia maré vazante e meia maré

enchente, como pode ser observado na Figura 5.1 que retrata a situação para o Cenário 1 (Janeiro com vento). Com isto, os resultados mostrados são caracterizados por oito instantes.

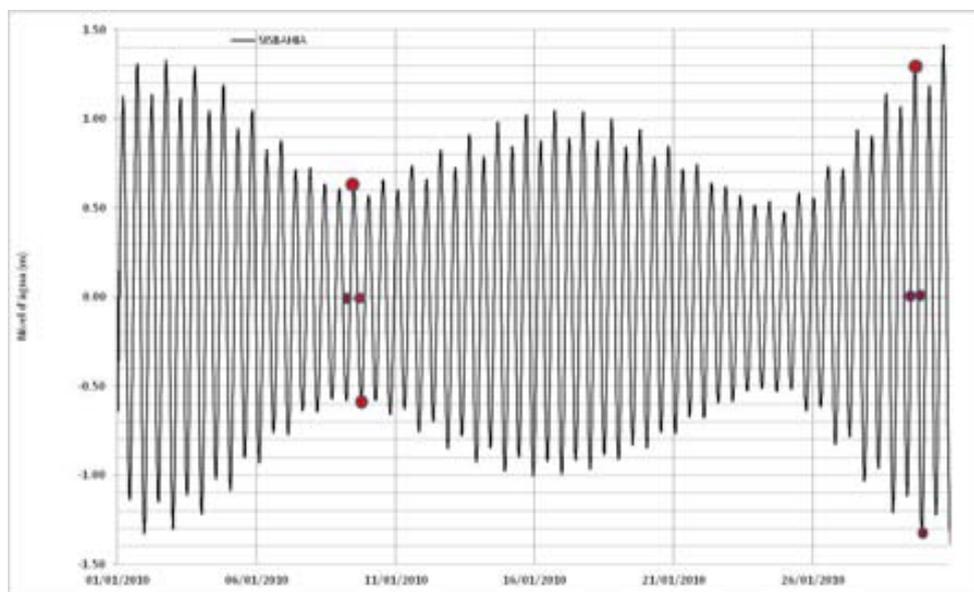


Figura 5.1: Momentos de análise dos resultados do cenário 1 (Janeiro com vento).

Observa-se na Figura 5.1, que o maior momento de preamar de sizígia está entre os dias 01/01/10 e 06/01/10, contudo este momento não foi selecionado devido à partida fria do modelo.

Após esta padronização, a primeira estratégia para reduzir o universo de cenários foi realizar uma análise estatística dos meses com vento (Cenários 1 a 12), para que a partir daí se conhecesse os dois cenários extremos em relação à hidrodinâmica, ou seja, o mês com maior e menor módulo de velocidade, reduzindo assim o número de cenários de 12 para apenas 2.

Conhecidos os dois cenários, de maior e de menor módulo de velocidade, para os meses com vento; se buscou os resultados da modelagem sem vento para os mesmos meses, onde o objetivo foi classificar as diferenças a partir de 5 (cinco) graus do vetor velocidade.

Na Tabela 5.1 é possível observar os tempos no SisBaHiA[®] utilizados para a análise estatística, que fazem referência aos momentos de preamar, baixa-mar, meia maré vazante e meia maré enchente de cada cenário simulado.

Conhecidos os cenários e classificadas as diferenças, com auxílio do SisBaHiA[®], foram distribuídas estações ao longo do Estuário do Rio Potengi,

conforme Figura 5.2. O objetivo das estações foi de avaliar o perfil longitudinal de elevação e o módulo de velocidade 2DH ao longo do Estuário. A distribuição longitudinal das estações se atribuiu o nome de Fatia IA, que doravante será tratada.

Após a avaliação da Fatia IA, foram analisados os padrões espaciais das correntes 2DH para o Cenário de maior e menor média do módulo de velocidade nos instantes de baixa-mar, meia maré enchente, preamar e meia maré vazante nos ciclos de sizígia e quadratura, conforme os tempos da Tabela 5.1.

Por fim, foram feitas as análises das hodógrafas de velocidade, bem como, do escoamento residual, conforme Itens 5.7 e 5.8, doravante tratados.

Tabela 5.1: Tempos do SisBaHiA[®] utilizados na análise estatística dos cenários

Cenários	Meses	Quadratura			
		MME	PM	MMV	BM
1 e 13	Jan.	723600	734400	745200	756000
2 e 14	Fev.	637200	64800	662400	669600
3 e 15	Mar.	2016000	2026800	2037600	2048400
4 e 16	Abr.	1843200	1854000	1864800	1875600
5 e 17	Mai.	1753200	1764000	1778400	1789200
6 e 18	Jun.	1717200	1728000	1738800	1749600
7 e 19	Jul.	1627200	1638000	1648800	1659600
8 e 20	Ago.	1544400	1555200	1566000	1576800
9 e 21	Set.	1371600	1382400	1393200	1404000
10 e 22	Out.	1281600	1292400	1303200	1314000
11 e 23	Nov.	1105200	1116000	1126800	1137600
12 e 24	Dez.	2494800	2505600	2516400	2527000
Cenários	Meses	Sizígia			
		MME	PM	MMV	BM
1 e 13	Jan.	2466000	2476800	2487600	2498400
2 e 14	Fev.	220200	2214000	2224800	2235600
3 e 15	Mar.	2466000	2476800	2487600	2498400
4 e 16	Abr.	2336400	2347200	2358000	2368800
5 e 17	Mai.	1216800	1227600	1238400	1249200
6 e 18	Jun.	1130400	1141200	1152000	1162800
7 e 19	Jul.	1134000	1144800	1155600	1166400
8 e 20	Ago.	961200	972000	982800	993600
9 e 21	Set.	698400	709200	720000	730800
10 e 22	Out.	612000	622800	633600	644400
11 e 23	Nov.	482400	493200	504000	514800
12 e 24	Dez.	1954800	1965600	1976400	1987200

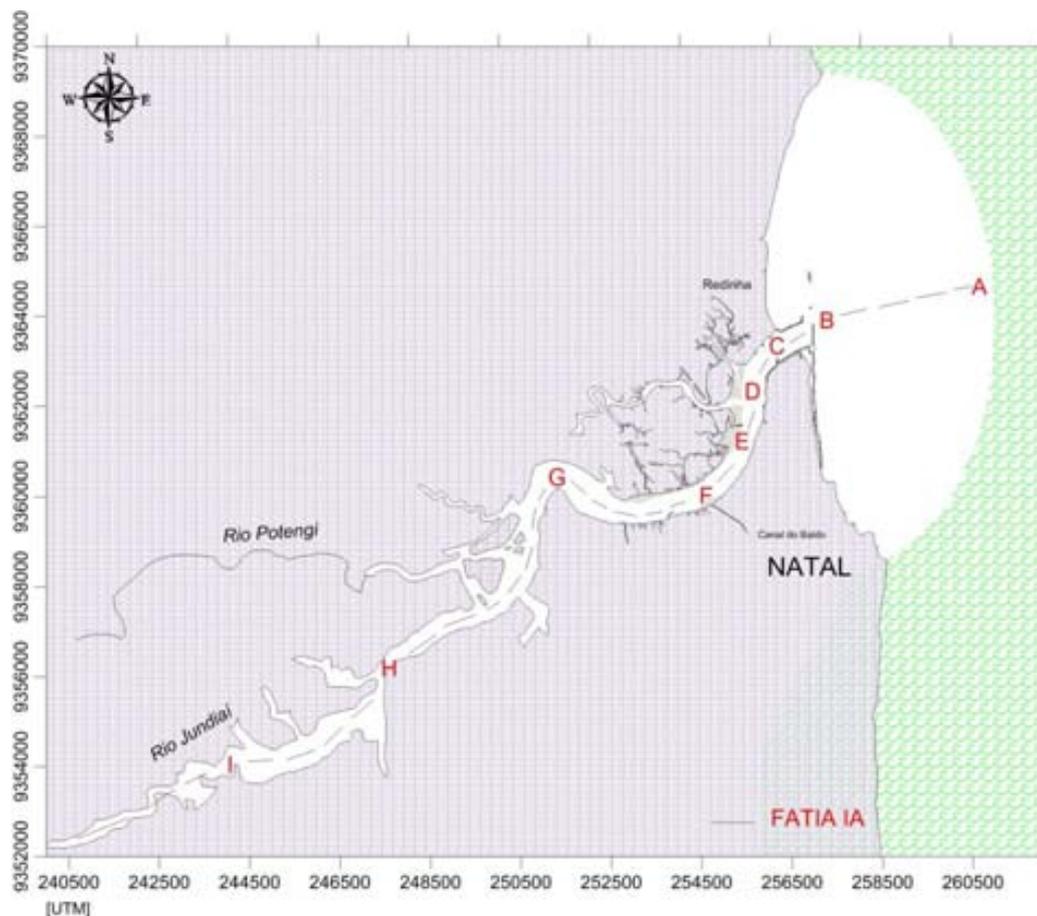


Figura 5.2: Localização das nove estações do SisBaHiA[®] ao longo do Estuário do Rio Potengi, referentes a Fátia IA.

5.2 COMPARAÇÃO DOS VALORES DE MARÉ

A Figura 5.3 mostra uma comparação entre os valores de elevação previstos pela DHN e os valores obtidos numericamente pelo SisBaHiA[®], através dos dados da FEMAR para os meses de Janeiro e fevereiro (Cenários 1 e 2). Como se pode observar, os resultados obtidos pelo SisBaHiA[®], apesar do uso das interfaces dissipativas, não apresentaram significativos amortecimentos, com isto se pode dizer que os resultados de elevação obtidos pelo SisBaHiA[®] estão bem ajustados com os valores previstos, reproduzindo bem os picos de preamar e baixa-mar. Quanto à fase, os valores calculados pelo SisBaHiA[®] também não apresentam grandes diferenças.

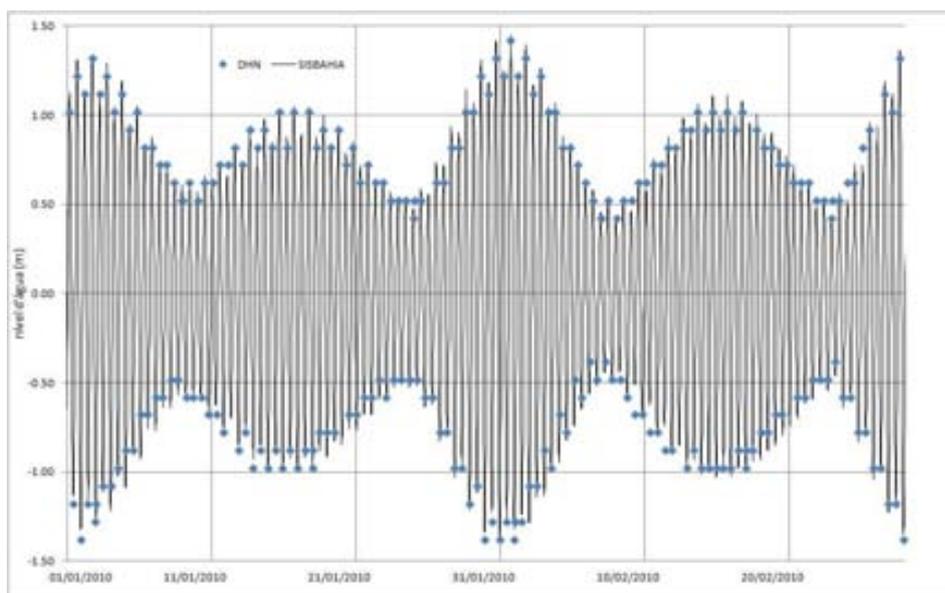


Figura 5.3: Comparação entre os valores de elevação obtidos numericamente pelo SisBaHiA[®] e os valores previstos pela DHN, nos Cenários 1 e 2. Eixos verticais se referem aos instantes das 0:00 horas.

5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA

Conforme ressaltado no item 5.1, com o objetivo de conhecer o mês de maior módulo de velocidade e o mês de menor módulo de velocidade, foi realizada uma análise estatística dos resultados gerados pelo SisBaHiA[®] nos tempos descritos na Tabela 5.1, para os pontos que estão inseridos no canal do Estuário do Rio Potengi. Para esta análise foram observados os seguintes itens: a média, a mediana, o desvio padrão, o coeficiente de variação, a variância, a assimetria e a amplitude do módulo de velocidade.

Apesar de ter sido realizada toda a análise estatística, para a definição dos meses de maior e menor módulo de velocidade, foram considerados os somatórios das médias aritméticas obtidas nos instantes de meia maré enchente, meia maré vazante, preamar e baixa-mar, para os pontos que estão inseridos no canal do Estuário do Rio Potengi.

Conforme Figura 5.4 e Tabelas 5.2 e 5.3, observa-se que para os momentos de preamar, meia maré enchente, meia maré vazante e baixa-mar de quadratura, o mês cujo somatório das médias obteve o maior valor para o módulo de velocidade foi o de maio (Cenário 5), com 0,587 m/s. Desta mesma forma, nota-se também que o mês com menor módulo foi o de setembro (Cenário 9), com 0,366 m/s.

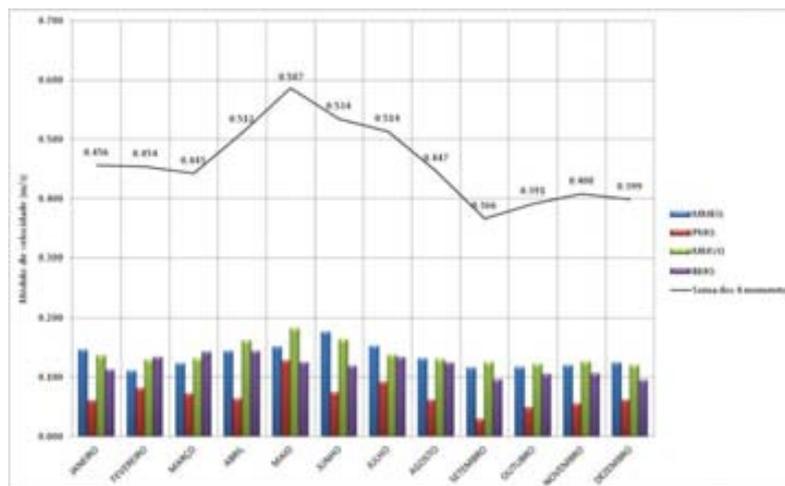


Figura 5.4: Média do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de quadratura.

Tabela 5.2: Estatística do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente e preamar de quadratura.

Cenário	Mês	MME_QUADRATURA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,146	0,090	0,150	1,029	0,023	1,254	0,863
2	Fev.	0,110	0,068	0,113	1,023	0,013	1,220	0,654
3	Mar.	0,123	0,075	0,127	1,033	0,016	1,228	0,717
4	Abr.	0,144	0,089	0,147	1,022	0,022	1,245	0,853
5	Mai.	0,151	0,093	0,155	1,031	0,024	1,227	0,917
6	Jun.	0,177	0,108	0,185	1,044	0,034	1,274	1,103
7	Jul.	0,152	0,096	0,153	1,009	0,023	1,270	0,939
8	Ago.	0,131	0,093	0,128	0,973	0,016	1,241	0,796
9	Set.	0,116	0,077	0,116	1,002	0,013	1,251	0,705
10	Out.	0,116	0,083	0,113	0,971	0,013	1,223	0,701
11	Nov.	0,120	0,084	0,118	0,978	0,014	1,236	0,734
12	Dez.	0,124	0,075	0,128	1,037	0,016	1,228	0,728
Cenário	Mês	PREAMAR_QUADRATURA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,060	0,045	0,060	1,007	0,004	1,164	0,386
2	Fev.	0,081	0,054	0,082	1,013	0,007	1,239	0,503
3	Mar.	0,071	0,055	0,069	0,962	0,005	1,068	0,426
4	Abr.	0,063	0,047	0,064	1,005	0,004	1,147	0,405
5	Mai.	0,128	0,099	0,125	0,971	0,016	1,165	0,780
6	Jun.	0,074	0,054	0,076	1,040	0,006	1,271	0,506
7	Jul.	0,092	0,056	0,098	1,069	0,010	1,316	0,618
8	Ago.	0,061	0,039	0,064	1,052	0,004	1,264	0,400
9	Set.	0,029	0,019	0,030	1,049	0,001	1,341	0,199
10	Out.	0,049	0,032	0,051	1,059	0,003	1,292	0,325
11	Nov.	0,055	0,036	0,059	1,063	0,003	1,326	0,373
12	Dez.	0,061	0,048	0,059	0,965	0,003	1,013	0,371

Tabela 5.3: Estatística do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré vazante e baixa-mar de quadratura.

Cenário	Mês	MMV_QUADRATURA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,137	0,101	0,127	0,930	0,016	1,136	0,705
2	Fev.	0,129	0,102	0,117	0,904	0,014	1,060	0,649
3	Mar.	0,132	0,095	0,122	0,930	0,015	1,121	0,674
4	Abr.	0,161	0,126	0,147	0,912	0,022	1,067	0,800
5	Mai.	0,182	0,142	0,168	0,923	0,028	1,113	0,908
6	Jun.	0,164	0,119	0,155	0,944	0,024	1,169	0,843
7	Jul.	0,137	0,099	0,129	0,938	0,017	1,140	0,711
8	Ago.	0,130	0,104	0,116	0,888	0,013	0,969	0,641
9	Set.	0,125	0,099	0,112	0,894	0,012	1,015	0,623
10	Out.	0,121	0,098	0,106	0,876	0,011	0,915	0,595
11	Nov.	0,126	0,100	0,112	0,889	0,013	0,982	0,632
12	Dez.	0,120	0,078	0,118	0,985	0,014	1,236	0,660
Cenário	Mês	BAIXAMAR_QUADRATURA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,113	0,089	0,104	0,921	0,011	1,130	0,697
2	Fev.	0,134	0,103	0,118	0,886	0,014	1,014	0,733
3	Mar.	0,143	0,109	0,128	0,893	0,016	1,056	0,812
4	Abr.	0,143	0,111	0,130	0,908	0,017	1,125	0,862
5	Mai.	0,125	0,105	0,121	0,965	0,015	1,314	0,853
6	Jun.	0,119	0,098	0,115	0,965	0,013	1,321	0,804
7	Jul.	0,133	0,102	0,121	0,905	0,015	1,097	0,783
8	Ago.	0,124	0,094	0,111	0,894	0,012	1,023	0,715
9	Set.	0,096	0,075	0,088	0,917	0,008	1,093	0,585
10	Out.	0,105	0,079	0,093	0,890	0,009	0,913	0,586
11	Nov.	0,106	0,082	0,095	0,895	0,009	0,959	0,606
12	Dez.	0,094	0,075	0,088	0,934	0,008	1,230	0,596

Analisando os resultados da sizígia, Figura 5.5 e Tabelas 5.4 e 5.5, observa-se que o mês cujo somatório das médias obteve o maior valor para o módulo de velocidade foi o de março (Cenário 3), com 0,977 m/s; e o de menor, o mês de novembro (Cenário 11), com 0,788 m/s. Verifica-se também que em alguns meses a média do módulo de velocidade duplica seu valor quando comparada aos valores da quadratura.

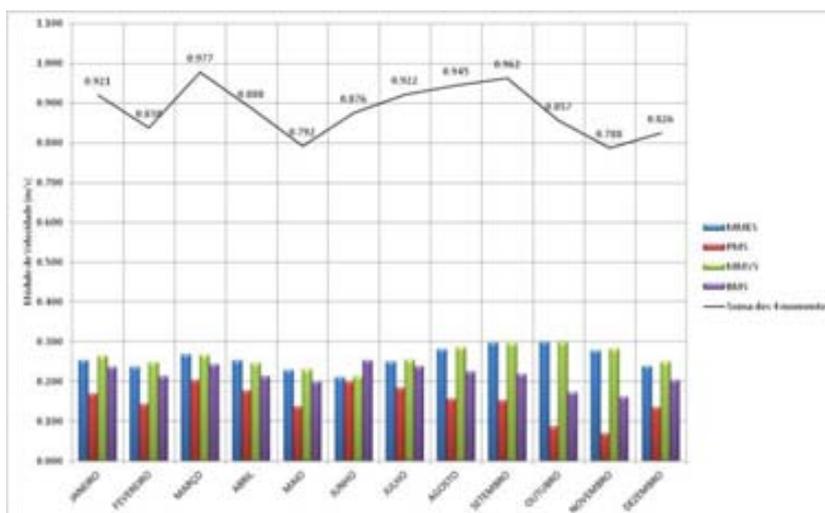


Figura 5.5: Média do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA® para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de sizígia.

Tabela 5.4: Estatística do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA® para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente e preamar de sizígia.

Cenário	Mês	MME_SIZIGIA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,253	0,169	0,246	0,973	0,061	1,274	1,532
2	Fev.	0,236	0,156	0,231	0,979	0,054	1,274	1,423
3	Mar.	0,267	0,185	0,253	0,948	0,064	1,246	1,590
4	Abr.	0,253	0,175	0,240	0,949	0,058	1,241	1,478
5	Mai.	0,228	0,147	0,226	0,994	0,051	1,286	1,381
6	Jun.	0,210	0,136	0,211	1,002	0,044	1,264	1,311
7	Jul.	0,249	0,162	0,244	0,983	0,060	1,281	1,532
8	Ago.	0,280	0,186	0,273	0,977	0,075	1,298	1,715
9	Set.	0,297	0,213	0,282	0,951	0,080	1,267	1,749
10	Out.	0,300	0,210	0,290	0,967	0,084	1,306	1,765
11	Nov.	0,277	0,181	0,273	0,987	0,075	1,323	1,660
12	Dez.	0,238	0,152	0,240	1,006	0,057	1,303	1,481
Cenário	Mês	PREAMAR_SIZIGIA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	Jan.	0,169	0,134	0,169	1,002	0,029	1,235	1,113
2	Fev.	0,142	0,113	0,142	0,998	0,020	1,196	0,930
3	Mar.	0,203	0,162	0,202	0,999	0,041	1,261	1,337
4	Abr.	0,176	0,141	0,175	0,994	0,031	1,236	1,160
5	Mai.	0,136	0,108	0,136	0,998	0,019	1,212	0,892
6	Jun.	0,200	0,152	0,198	0,989	0,039	1,257	1,268
7	Jul.	0,183	0,141	0,184	1,008	0,034	1,271	1,204
8	Ago.	0,156	0,122	0,161	1,032	0,026	1,295	1,078
9	Set.	0,152	0,122	0,154	1,016	0,024	1,253	1,042
10	Out.	0,087	0,065	0,086	0,995	0,007	1,480	0,623
11	Nov.	0,068	0,048	0,070	1,026	0,005	1,680	0,515
12	Dez.	0,135	0,102	0,138	1,028	0,019	1,278	0,911

Tabela 5.5: Estatística do módulo de velocidade obtido pelo SisBaHiA[®] para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré vazante e baixa-mar de sizígia.

Cenário	Mês	MMV_SIZIGIA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	JAN.	0,263	0,193	0,251	0,954	0,063	1,171	1,413
2	FEV.	0,247	0,179	0,235	0,954	0,055	1,173	1,295
3	MAR.	0,266	0,185	0,258	0,973	0,067	1,208	1,463
4	ABR.	0,246	0,171	0,238	0,968	0,057	1,202	1,312
5	MAI.	0,229	0,164	0,219	0,956	0,048	1,180	1,187
6	JUN.	0,214	0,142	0,211	0,989	0,045	1,220	1,160
7	JUL.	0,254	0,181	0,245	0,964	0,060	1,189	1,377
8	AGO.	0,286	0,217	0,270	0,946	0,073	1,147	1,522
9	SET.	0,295	0,222	0,281	0,952	0,079	1,168	1,588
10	OUT.	0,298	0,227	0,280	0,941	0,079	1,152	1,536
11	NOV.	0,282	0,219	0,261	0,926	0,068	1,106	1,410
12	DEZ.	0,250	0,190	0,235	0,940	0,055	1,135	1,293
Cenário	Mês	BAIXAMAR_SIZIGIA						
		Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	Variância da Amostra	Assimetria	Amplitude
1	JAN.	0,236	0,181	0,223	0,945	0,050	1,342	1,390
2	FEV.	0,213	0,157	0,203	0,951	0,041	1,352	1,306
3	MAR.	0,242	0,185	0,231	0,954	0,053	1,342	1,414
4	ABR.	0,213	0,154	0,206	0,965	0,042	1,374	1,319
5	MAI.	0,199	0,149	0,189	0,951	0,036	1,332	1,243
6	JUN.	0,252	0,199	0,231	0,918	0,053	1,200	1,356
7	JUL.	0,237	0,181	0,223	0,942	0,050	1,312	1,380
8	AGO.	0,224	0,165	0,214	0,957	0,046	1,389	1,398
9	SET.	0,218	0,158	0,215	0,984	0,046	1,467	1,412
10	OUT.	0,172	0,135	0,172	0,999	0,030	1,856	1,307
11	NOV.	0,161	0,129	0,159	0,986	0,025	1,872	1,226
12	DEZ.	0,203	0,149	0,196	0,962	0,038	1,376	1,286

Para obter o mês de maior e menor módulo de velocidade foram somados os valores das médias obtidos nos momentos de quadratura e sizígia, como pode ser observado na Figura 5.6.

A partir daí foi possível extrair, dentre os Cenários 1 a 12, o mês de julho (Cenário 7) como sendo o de maior módulo de velocidade, cuja soma das médias deram 1,436 m/s; e o mês de novembro (Cenário 11) o de menor módulo de velocidade, cuja soma das médias deram 1,196 m/s.

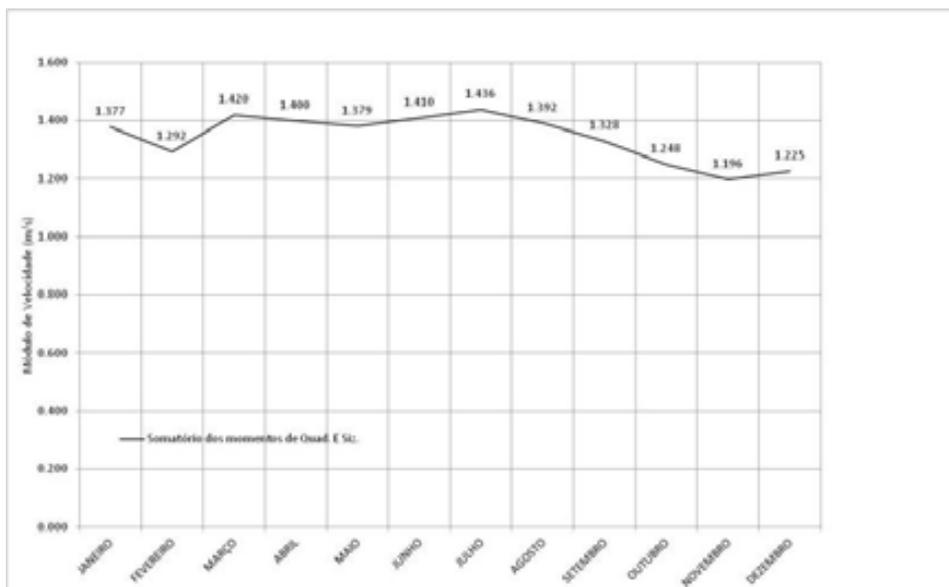


Figura 5.6: Somatório das Médias dos resultados do SisBaHiA® para os pontos do canal principal do Estuário do Rio Potengi, nos momentos de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar de quadratura e sizígia.

5.4 CLASSIFICAÇÃO DAS DIFERENÇAS DO VETOR VELOCIDADE

Conhecido o mês de maior e menor módulo de velocidade com a influência do vento, ou seja, Cenário 7 e Cenário 11 respectivamente, buscou-se o resultado da modelagem para os mesmos sem a influência do vento (Cenários 19 e 23), para que a partir daí se pudesse classificar as diferenças do vetor velocidade.

Para se classificar as diferenças do vetor velocidade, foi utilizado o aplicativo Diferenças.xls, que aproveitando o recurso de exportação dos dados resultantes da modelagem, pode classificar, dinamicamente, a diferença em graus do sentido de rotação do vetor velocidade, conforme Figura 5.7.

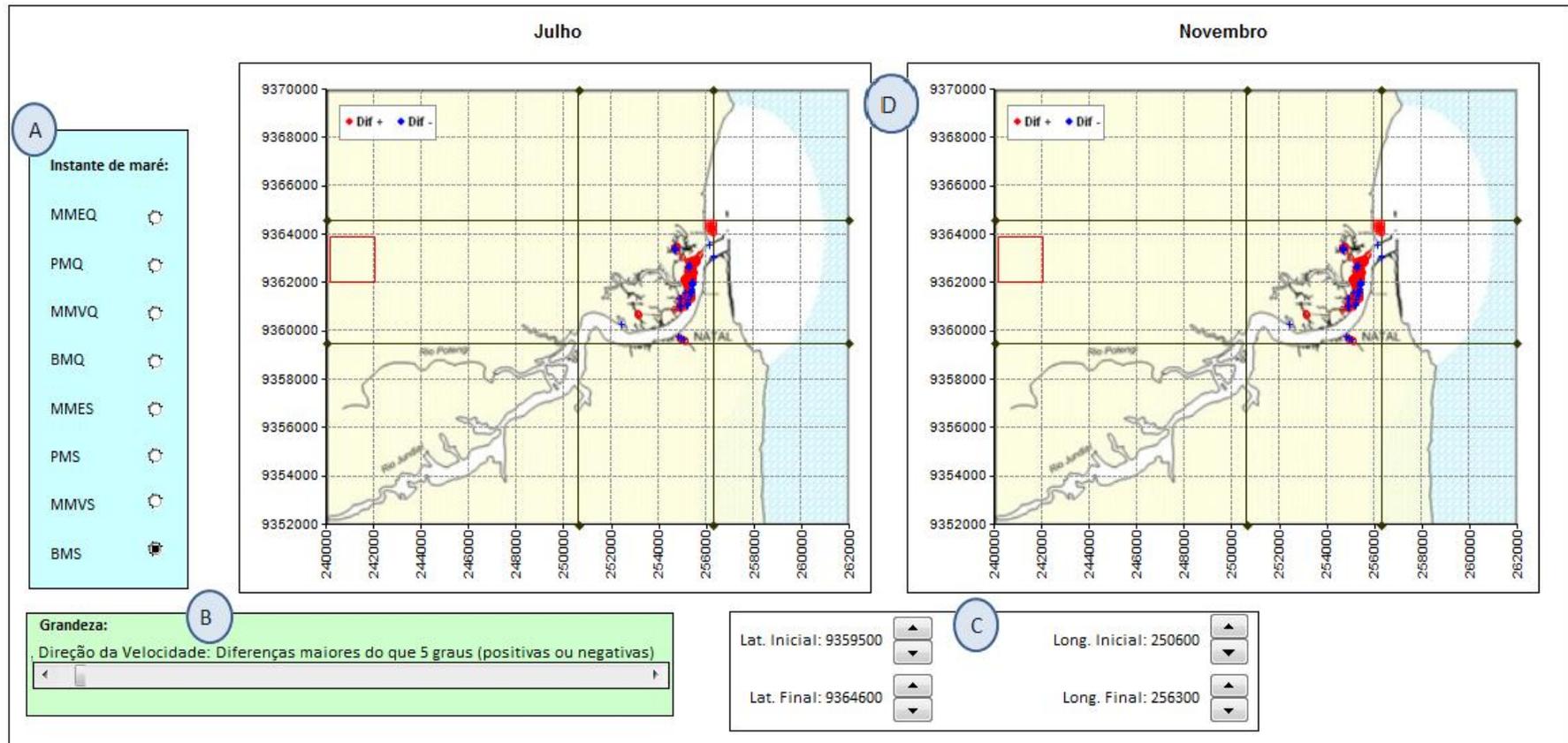


Figura 5.7: Visualização da classificação das diferenças do vetor velocidade para os meses de Julho e Novembro. A) Escolhe o instante da maré a ser analisado conforme tabela 5.1. B) Escolhe o valor a partir do qual será analisada a diferença em graus (positivas ou negativas). C) Delimita a região de plotagem a partir da seleção de latitudes e longitudes máximas e mínimas. D) Potagem das diferenças, a esquerda mês de Julho (Cenários 7 e 19) e a direita mês de Novembro (Cenários 11 e 23).

Os vetores adotados como referência são os dos Cenários 7 e 11 (mês com vento) e sua amplitude de rotação varia de 0 a +180, e de 0 a -180. Quando o sentido de rotação da diferença em graus dos vetores dos Cenários com vento (referência) em relação ao sem vento é anti-horário, classificou-se como sendo uma diferença positiva (cor vermelha). Quando o sentido de rotação se processa de maneira inversa (horário), classificou-se como sendo uma diferença negativa (cor azul), conforme Figura 5.8.

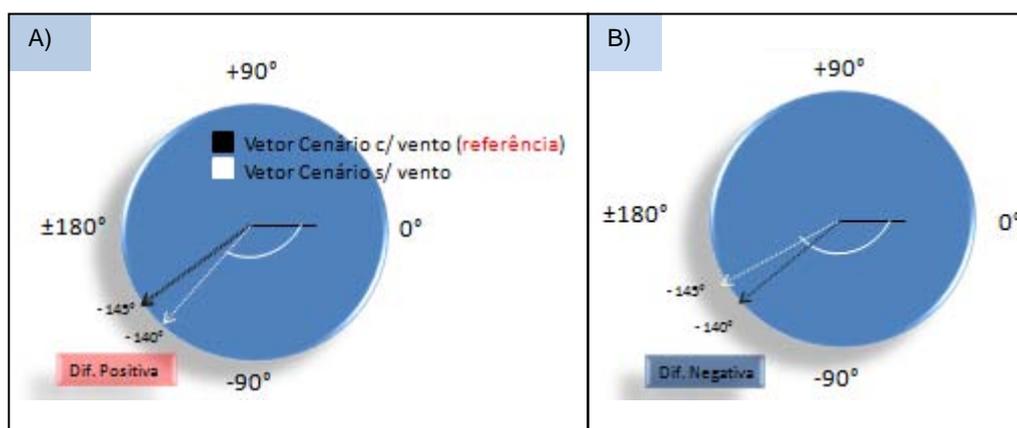


Figura 5.8: Classificação da rotação do vetor velocidade no instante de preamar e meia maré enchente para pontos localizados no canal principal do estuário. A) Sentido de rotação anti-horário do vetor referência (com vento) em relação ao sem vento. B) Sentido de rotação horário do vetor referência (com vento) em relação ao sem vento.

Desta forma foram classificadas as diferenças angulares a partir de cinco graus (Item B – Figura 5.7) nos instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de sizígia e quadratura referentes aos momentos da Tabela 5.1 do SisBaHiA[®], para os Cenários citados anteriormente. O valor cinco graus, escolhido para a classificação, se deve ao fato de aqui se considerar que abaixo deste as diferenças são irrelevantes para o presente estudo.

Na Figura 5.9 é possível verificar a classificação das diferenças do vetor velocidade, a partir de 5 (cinco) graus, no instante de meia maré enchente do ciclo de quadratura. Pode-se observar que no mês de Julho (Cenários 7 e 19) as diferenças ocorrem em menor número quando comparadas ao mês de Novembro (Cenários 11 e 23), e estas quando se processam, ocorrem principalmente na margem esquerda do canal, onde a batimetria é inferior a do eixo central devido a presença de bancos de areia. Com auxílio da Figura 5.4 é possível notar uma forte relação com o módulo de velocidade, ou seja, quando este é maior as diferenças ocorrem em poucos pontos.

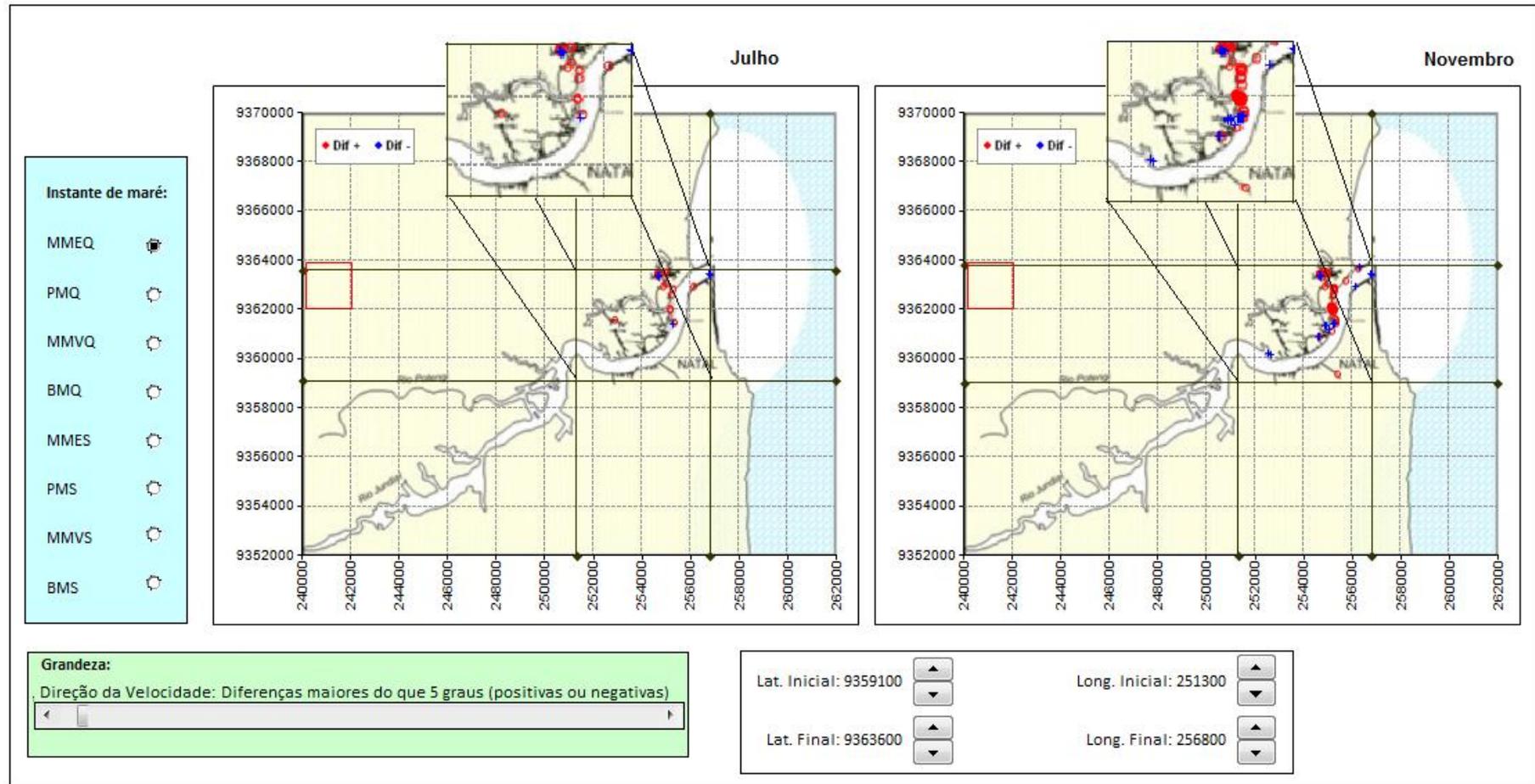


Figura 5.9: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré enchente de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

Observa-se ainda através da Figura 5.9, para ambos os meses, que o ângulo formado pelo vetor velocidade resultante do cenário com vento é maior que o formado pelo cenário sem vento; de acordo com o sistema de coordenadas da Figura 5.8; isto faz com que o vetor referência se desloque no sentido anti-horário gerando diferenças positivas (cor vermelha). Com auxílio da Figura 2.7 é possível observar que no mês de Julho existe uma oscilação entre as direções SE e SW, enquanto que no mês de Novembro a atuação do vento se concentra na direção SE, fazendo com que as diferenças neste mês sejam em maior quantidade que em Julho.

A Figura 5.10 retrata a condição de preamar de quadratura, nela é possível observar para ambos os meses um número maior de diferenças, quando comparada ao momento de meia maré enchente (Figura 5.9). Nota-se que os Cenários 11 e 23 (novembro) expressam um maior número de diferenças, sendo estas em sua maioria “negativas”, ou seja, o ângulo do vetor velocidade da modelagem com vento foi menor que o ângulo do vetor velocidade da modelagem sem vento, de acordo com o sistema de coordenadas da Figura 5.8.

Na Figura 5.11 para o instante de meia maré vazante, verifica-se a redução do número de diferenças entre os vetores. Este fato se deve ao aumento do módulo de velocidade, pois em meia maré vazante as correntes se intensificam, tornando-se maiores quando comparadas ao momento de preamar.

A Figura 5.12 classifica as diferenças para o instante de baixa-mar. Devido ao menor módulo de velocidade, ocorre a intensificação do número de diferenças, bem como, é possível observar a influência do vento que desloca o vetor velocidade fazendo com que ele forme um ângulo maior que o formado pelo vetor do Cenário sem vento de acordo com o sistema de coordenadas da Figura 5.8.

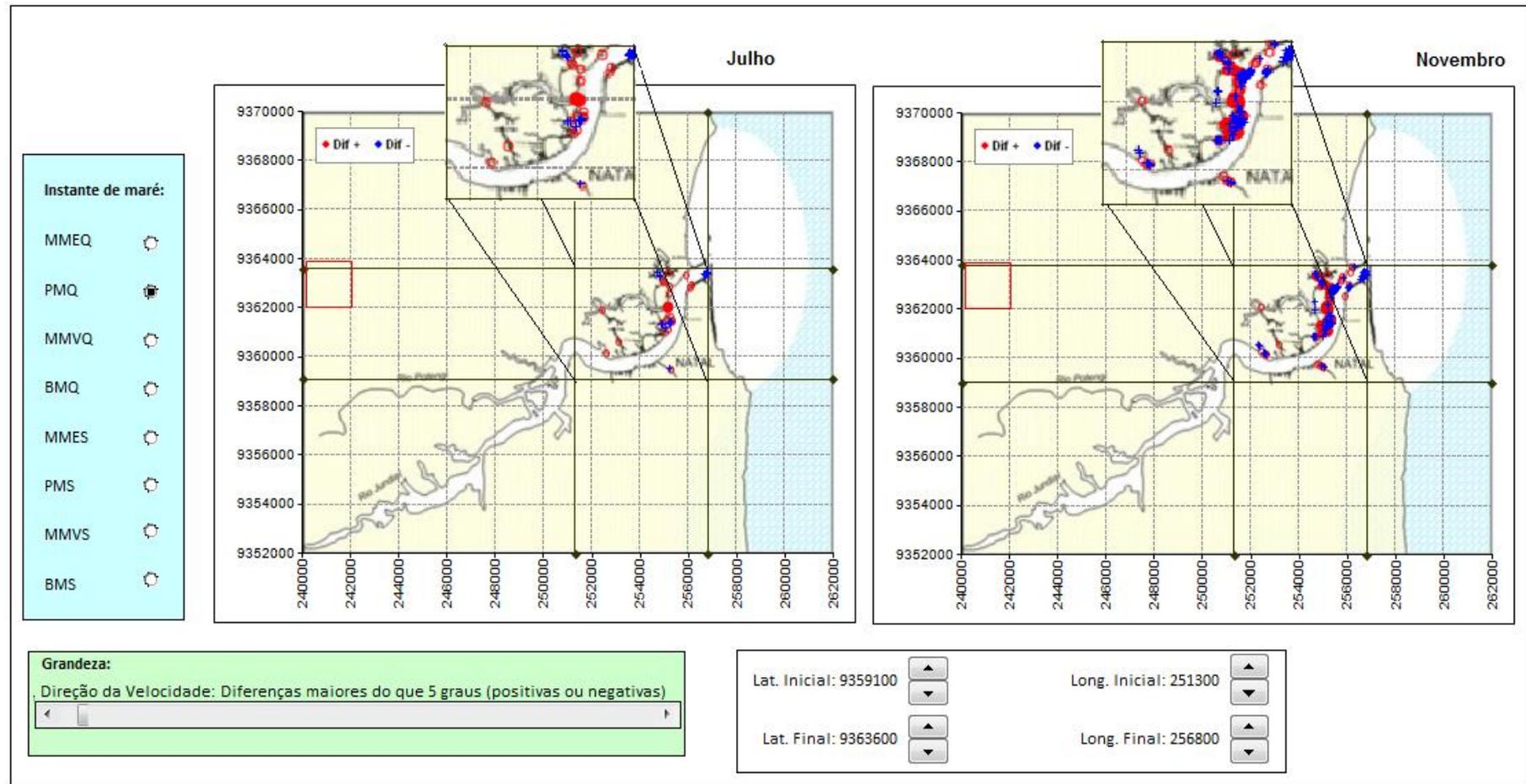


Figura 5.10: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de preamar de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

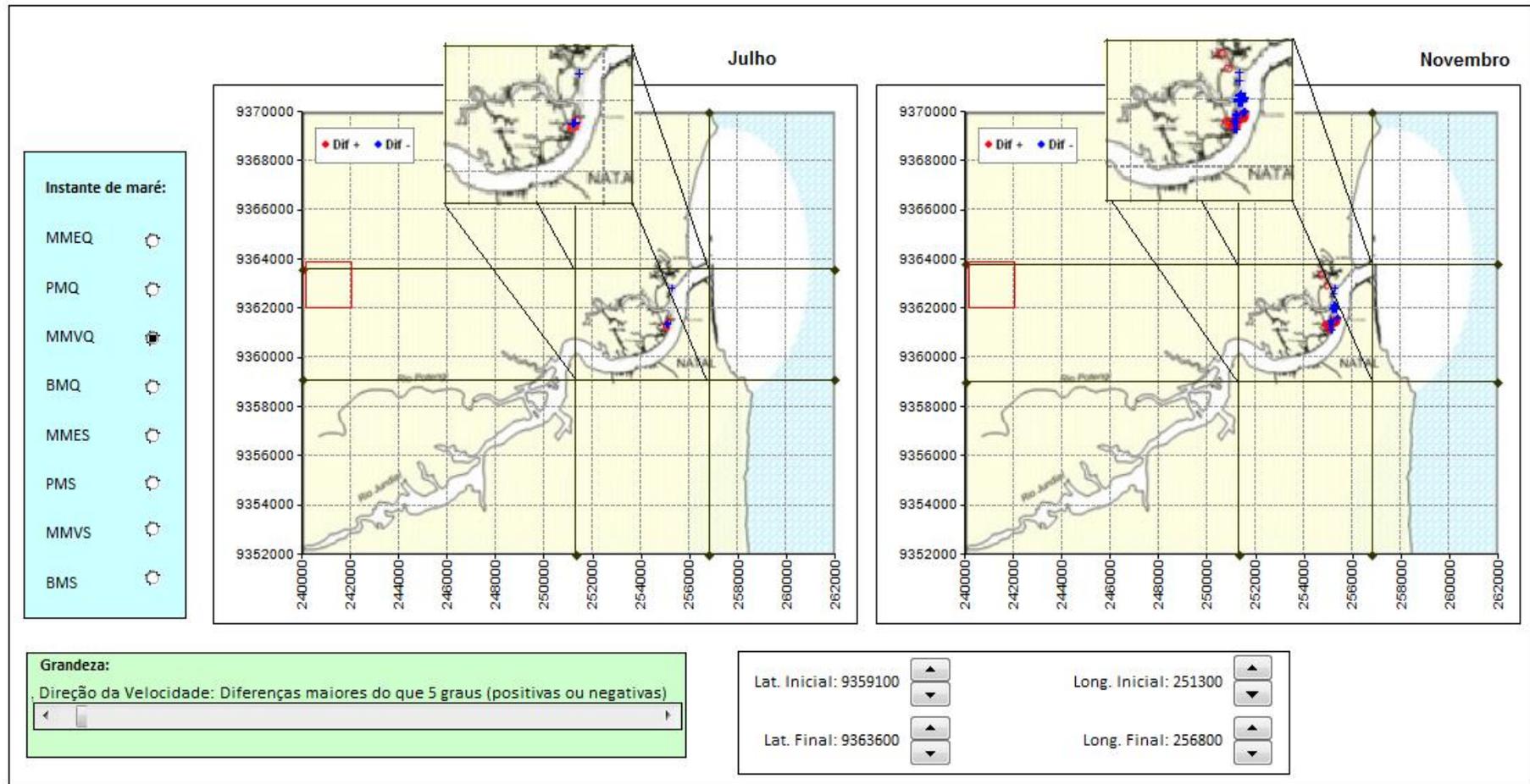


Figura 5.11: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré vazante de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

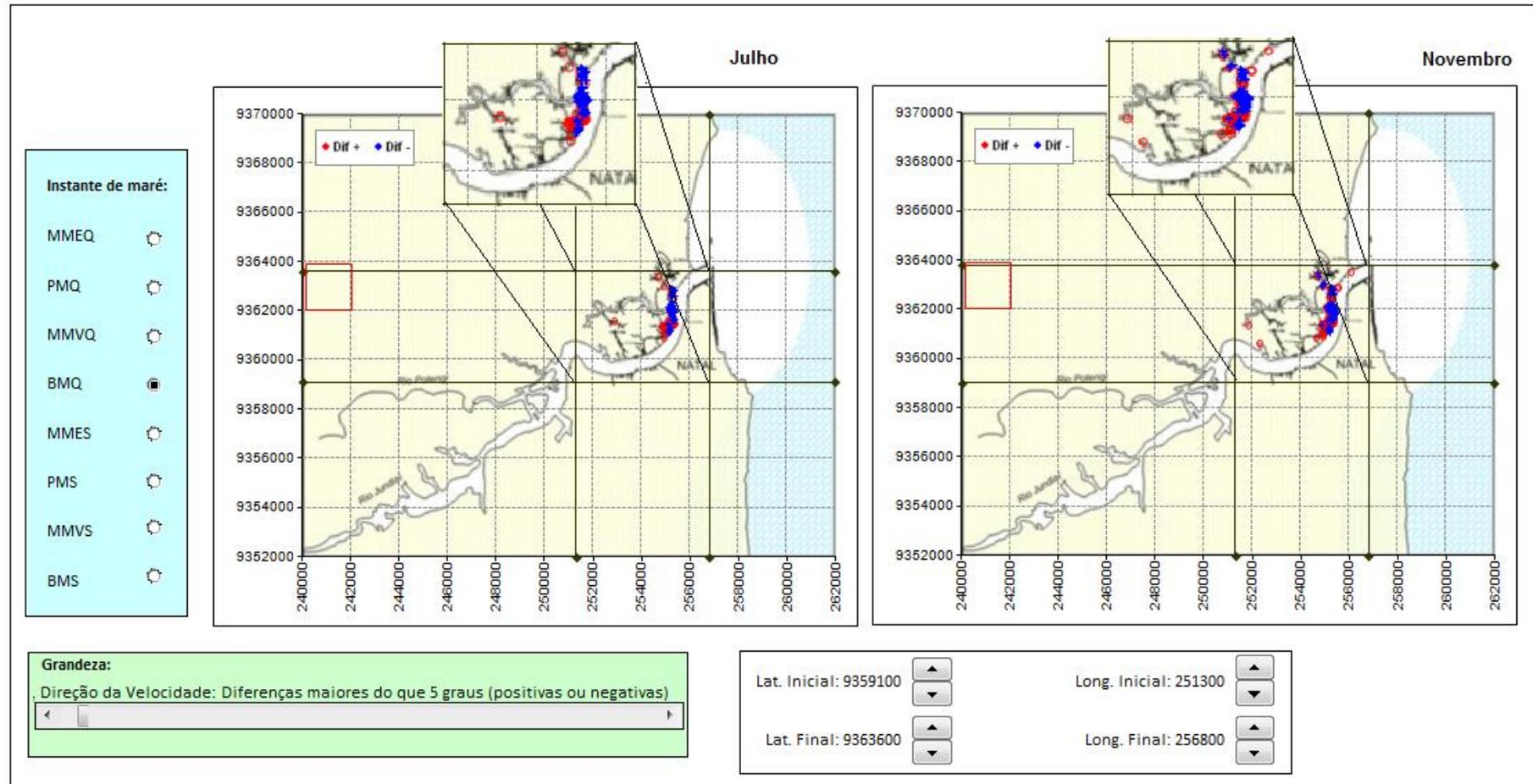


Figura 5.12: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de baixa-mar de quadratura. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

No instante de meia maré enchente de sizígia, Figura 5.13, devido aos altos valores de velocidade das correntes, nota-se que quase não ocorrem diferenças superiores a 5 graus, positivas e/ou negativas.

A Figura 5.14 retrata a condição de preamar de sizígia. Observa-se que o mês de Novembro (Cenários 11 e 23) possui um maior número de diferenças quando comparado a Julho (Cenários 7 e 19), este fato está diretamente relacionado com o módulo de velocidade (Figura 5.5), que é maior neste último.

No instante de meia maré vazante de sizígia, Figura 5.15, devido aos altos valores de velocidade das correntes, também nota-se que quase não ocorrem diferenças superiores a 5 graus, positivas e/ou negativas.

Na Figura 5.16, instante de baixa-mar de sizígia, verifica-se que no mês de Julho (Cenário 7 e 19) as diferenças foram “negativas” (cor azul), ou seja, o ângulo formado pelo vetor velocidade no Cenário com vento (vetor em cor vermelha – Detalhe A) foi maior que o ângulo formado pelo vetor velocidade do Cenário sem vento (vetor em cor preta – Detalhe A), caracterizando assim uma pequena influência do vento neste instante de maré para este mês.

De maneira geral, para todos os instantes analisados, observa-se que no eixo central do canal principal do Estuário do Rio Potengi não ocorrem diferenças significativas de direção do vetor velocidade. Este fato mostra a forte relação com a batimetria local, que nesta região varia entre 10 e 15 metros devido ao Porto de Natal.

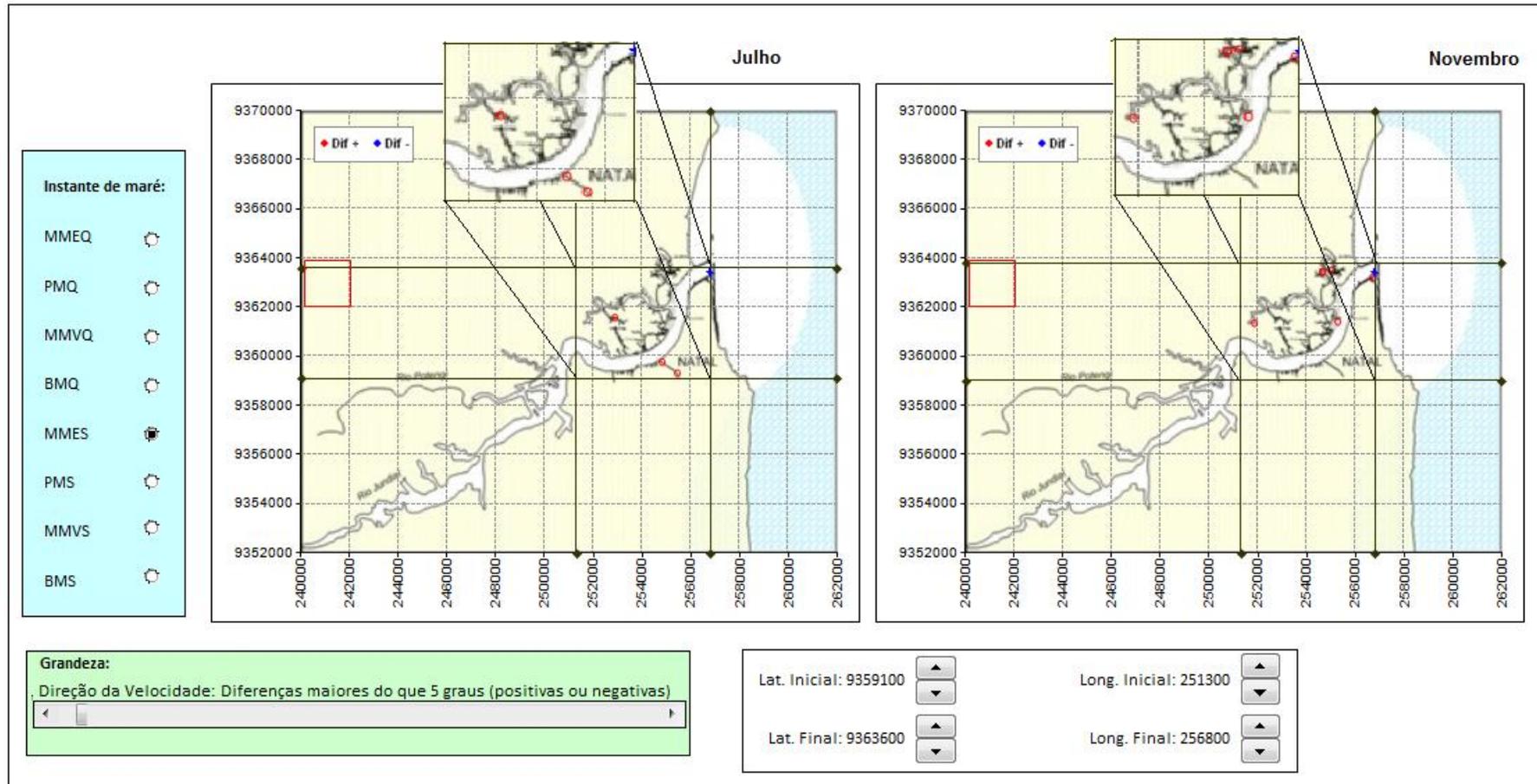


Figura 5.13: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré enchente de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

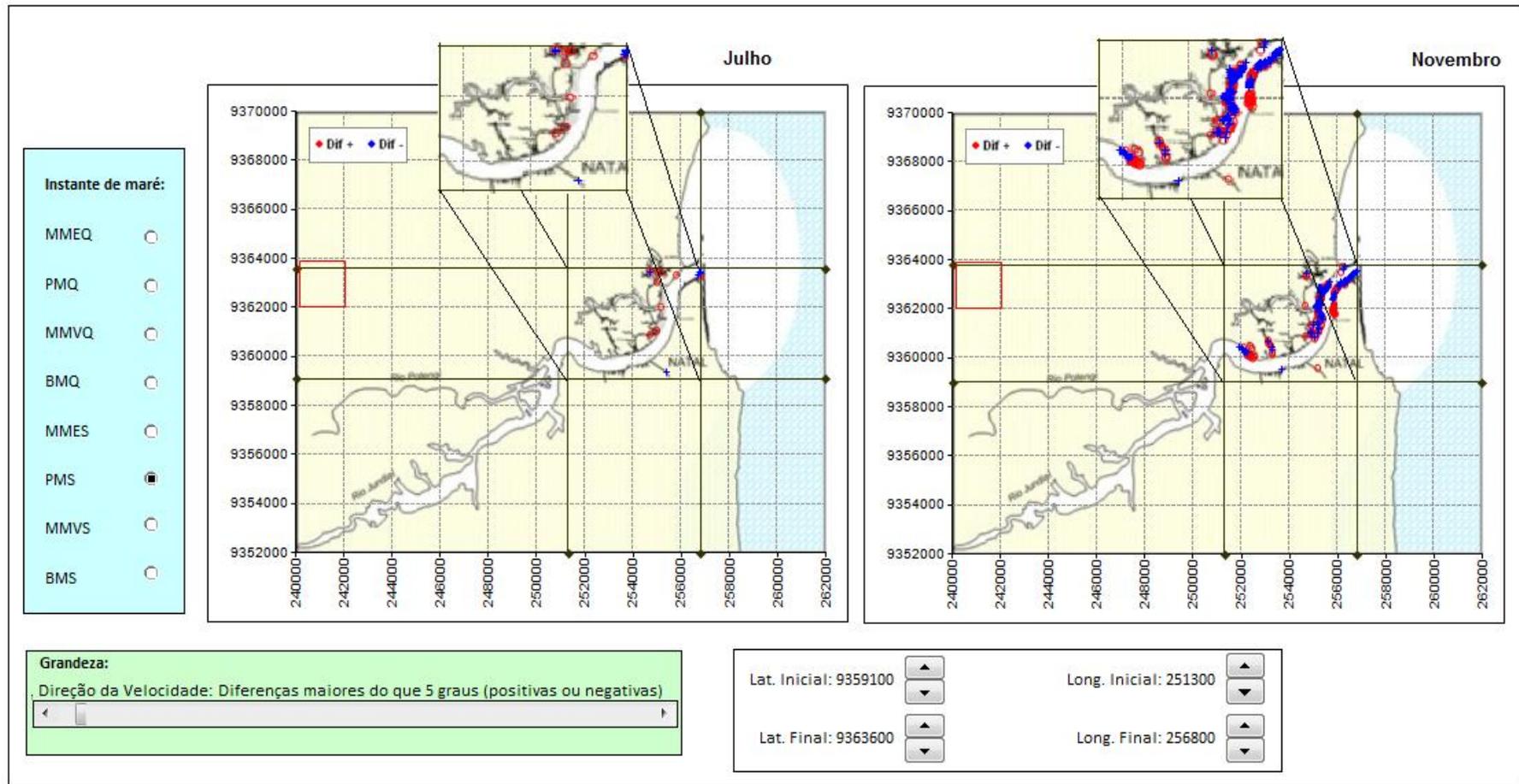


Figura 5.14: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de preamar de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

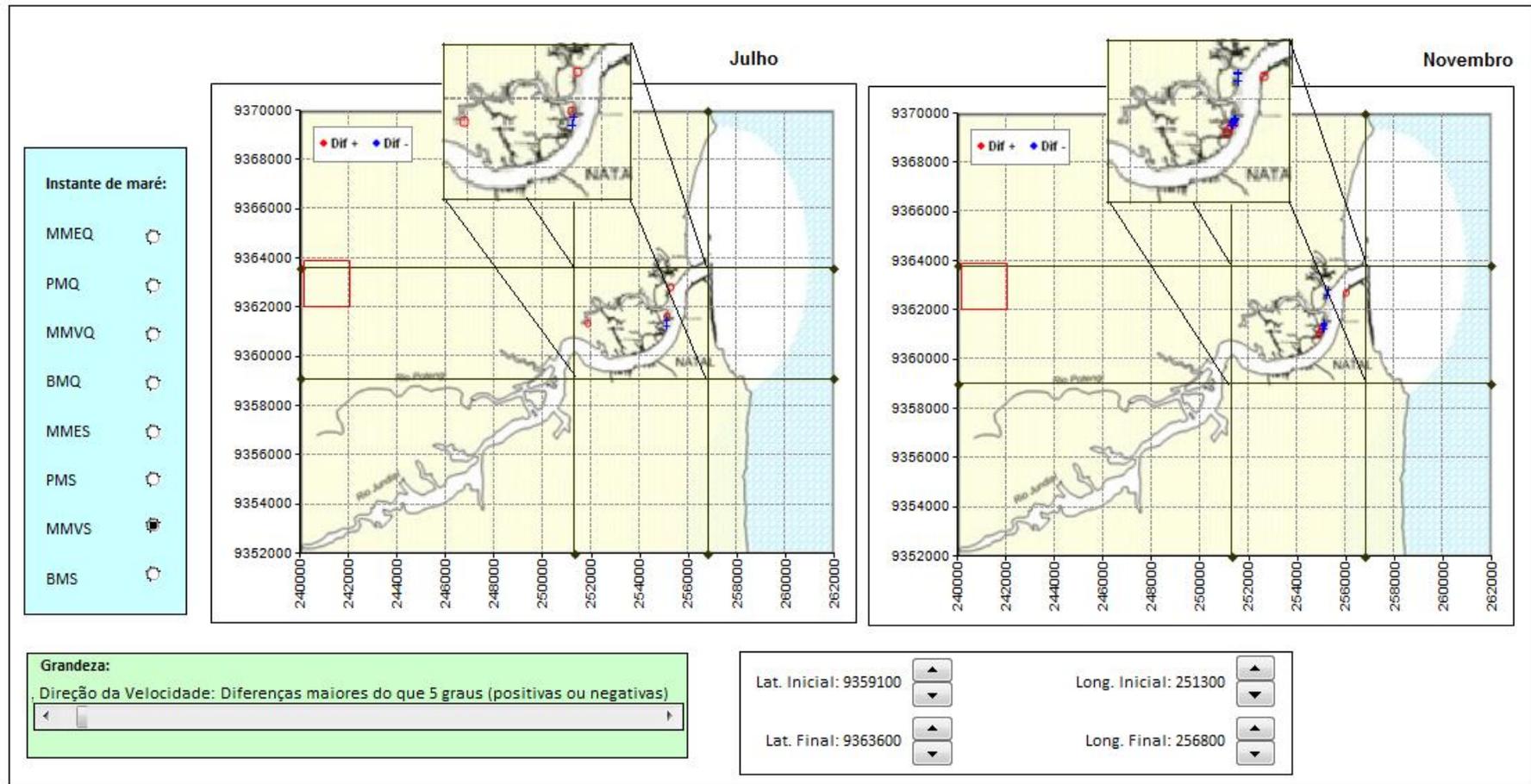


Figura 5.15: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de meia maré vazante de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro).

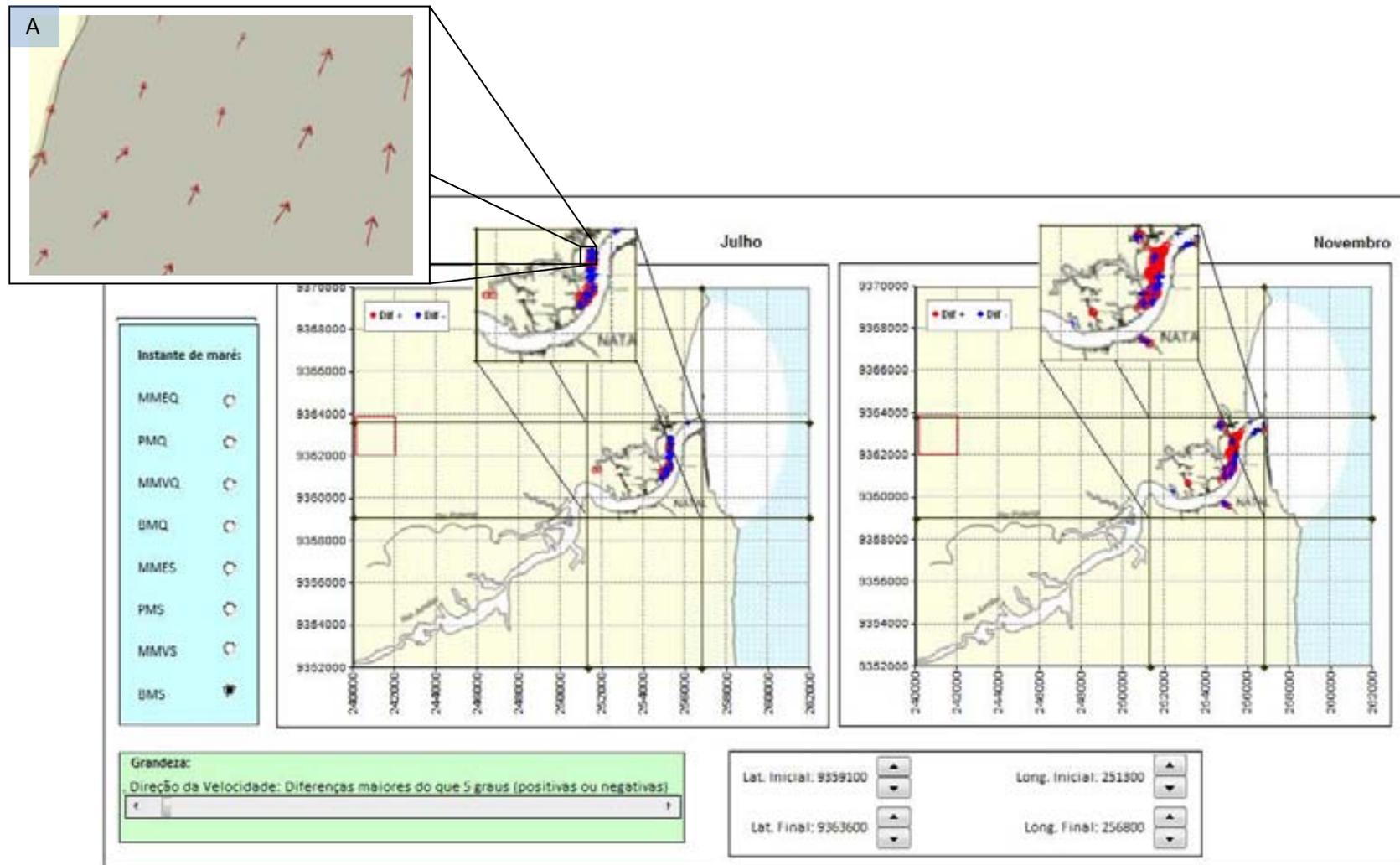


Figura 5.16: Classificação das diferenças de direção do vetor velocidade, maiores que cinco graus, no instante de baixa-mar de sizígia. A esquerda resultados dos Cenários 7 e 19 (Julho) e a direita resultados dos Cenários 11 e 23 (Novembro). A) Campo de correntes no domínio selecionado 2DH para o instante de baixa-mar de sizígia mês de Julho. Os vetores em vermelho indicam o Cenário 7 (vetor referência – com vento) e os vetores em preto o Cenário 19 (sem vento).

5.5 ANÁLISE LONGITUDINAL ATRAVÉS DA FATIA IA

Conforme mencionado no item 5.1, ao longo do eixo central do Estuário do Rio Potengi, com auxílio do SisBaHiA[®], foram distribuídas 9 (nove) estações, Figura 5.2, cujo objetivo foi avaliar o perfil vertical da elevação e o módulo de velocidade ao longo do Estuário, dentre os cenários de maior e menor módulo de velocidade com e sem a influência do vento. A distribuição longitudinal das estações se atribuiu o nome de Fatia IA, conforme Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Localização das estações no Estuário do Rio Potengi.

ESTAÇÃO	LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO
A	Fronteira Aberta
B	Entrada do Estuário
C	Abaixo da Ponte Newton Navarro
D	Proximidades do Porto
E	Porto de Natal
F	Jusante do Canal do Baldo
G	Abaixo da Ponte de Igapó
H	Estreito do Rio Jundiáí
I	Montante do Jundiáí

Para esta análise foram considerados os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar nos ciclos de sizígia e quadratura, conforme mencionados na Tabela 5.1. O mês de maior módulo de velocidade foi Julho (Cenários 7 e 19), e o mês de menor módulo foi Novembro (Cenários 11 e 23).

5.5.1 Módulo da velocidade

Através da Figura 5.17 que mostra o perfil longitudinal do módulo de velocidade promediado na vertical gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes anteriormente citados, para os Cenários 19 e 23, Julho e Novembro sem a influência do vento é possível observar a intensificação da velocidade das correntes nos pontos de estrangulamentos do Estuário do Rio Potengi (Estações H e B), bem como, na frente do Canal do Baldo (Estação F). Pode-se observar também que Julho apresenta os maiores módulos de velocidades nos ciclos de sizígia para todas as estações, com exceção da Estação H (Estreito do Rio Jundiáí) no instante de meia maré enchente de sizígia.

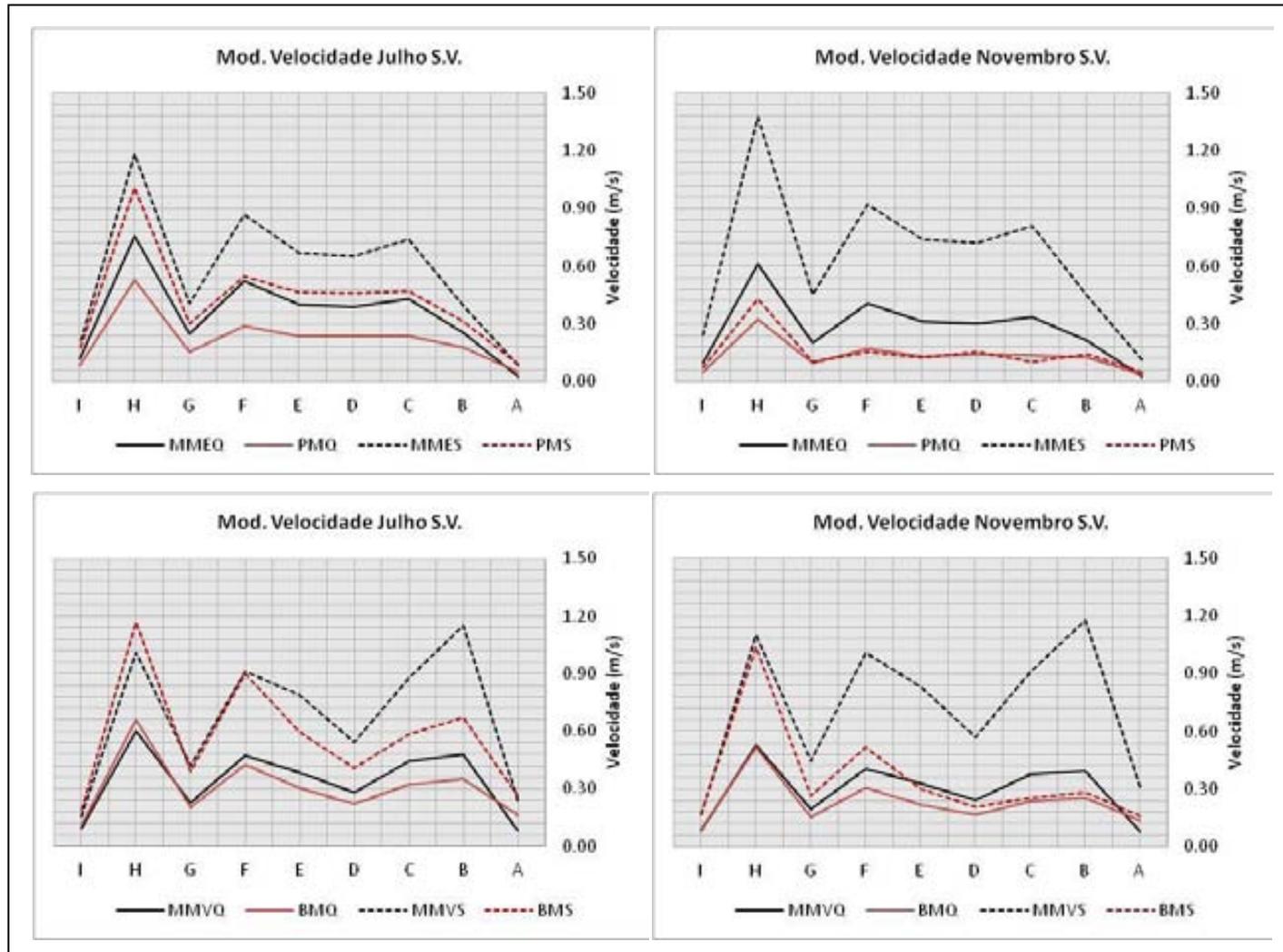


Figura 5.17: Perfil longitudinal do módulo de velocidade 2DH gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 19 e 23, Julho e Novembro sem a influência do vento.

Na Figura 5.18 é mostrado o perfil longitudinal do módulo de velocidade promediado na vertical gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes anteriormente citados, para os Cenários 7 e 11, Julho e Novembro com a influência do vento. Nota-se que a influência do vento para intensificação do módulo de velocidade dentre as Estações localizadas no interior do Estuário do Rio Potengi é muito pequena; com maior diferença ocorrendo na meia maré enchente de quadratura da Estação H no mês de Julho 0,01 m/s.

Observa-se que o vento altera muito discretamente o módulo de velocidade, apenas nas estações localizadas na foz do Estuário (Estações B e A), cuja maior diferença, ou seja, 0,03 m/s ocorre à preamar de sizígia na Estação B no mês de Julho.

Por fim, a partir dos módulos de velocidade das Figuras 5.17 e 5.18 é possível identificar regiões propícias ao acúmulo de sedimento com formação de bancos de areia (Estação G), bem como, regiões propícias a retirada de sedimento (Estações H e B).

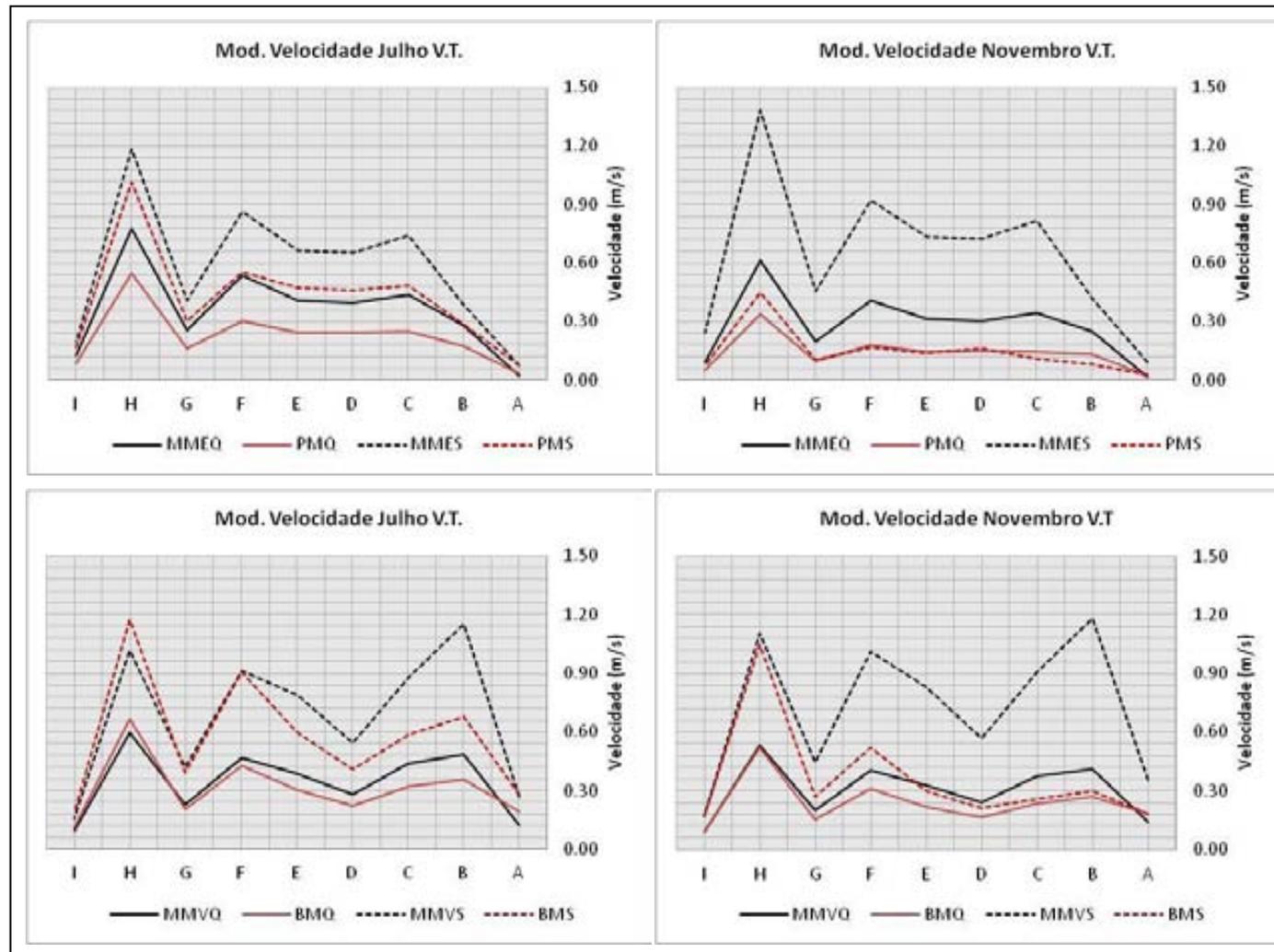


Figura 5.18: Perfil longitudinal do módulo de velocidade 2DH gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 7 e 11, Julho e Novembro com a influência do vento.

5.5.2 Elevação

Na Figura 5.19 é mostrado o perfil da elevação gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1) para os meses de Julho e Novembro. A partir dela, observa-se que quando a preamar ocorre na porção oeste do estuário do Rio Potengi nota-se um maior gradiente de elevação no domínio de modelagem do que o observado quando ocorre a preamar na porção leste do estuário do Rio Potengi. Este fato se deve ao aumento da amplitude da onda de maré quando esta entra no Estuário do Rio Potengi, tornando os níveis de preamares mais elevados e os de baixa-mares mais baixos à medida que se avança para o interior do sistema estuarino, conforme pode ser observado na Figura 5.20.

A Figura 5.20, citada anteriormente, apresenta os resultados das elevações para o Cenário 11, no período das 00:00 horas do dia 01/11/2010 as 00:00 horas do dia 04/11/2010 para as Estações A, B, H e I. Além do aumento da elevação à medida que a onda de maré se propaga no interior do estuário, conforme já comentado, nota-se também diferenças de fase ao longo do percurso.

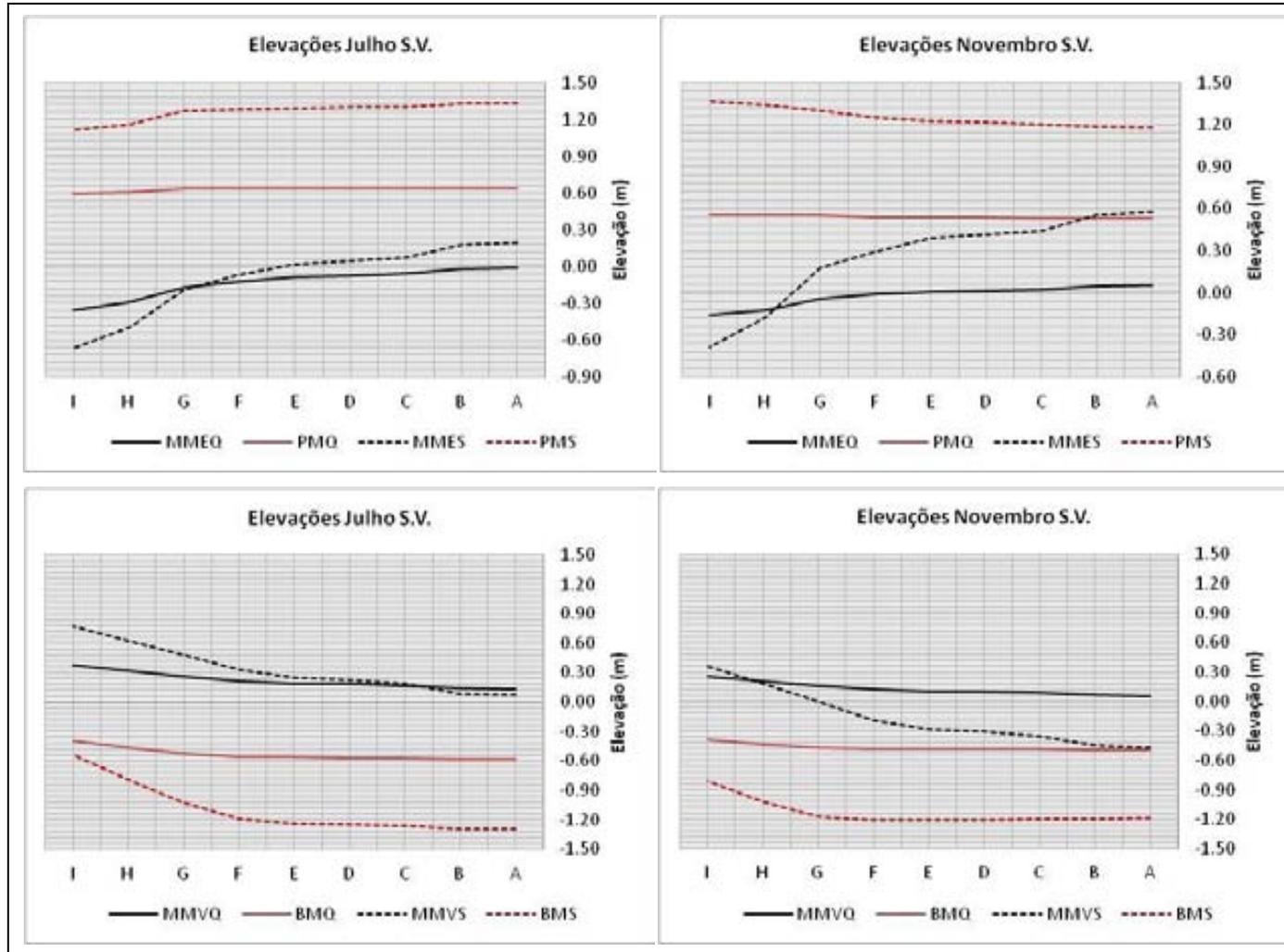


Figura 5.19: Perfil da elevação gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 19 e 23, Julho e Novembro sem vento.

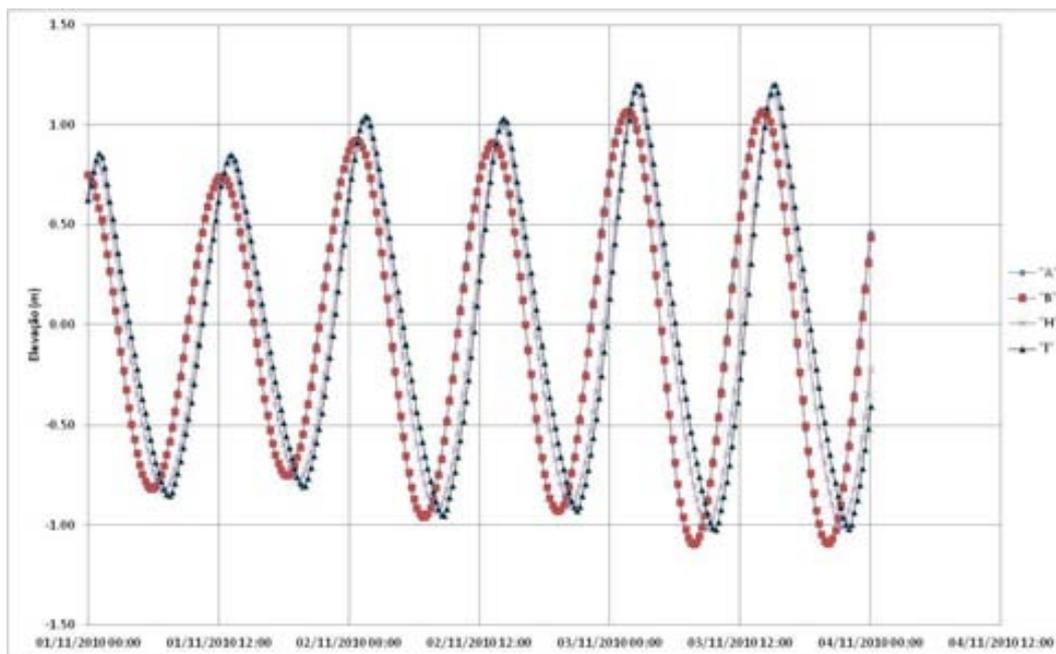


Figura 5.20: Elevações geradas pelo SisBaHiA[®] na Estação A (Fronteira Aberta), Estação B (Entrada do Estuário), Estação H (Estreito do Rio Jundiá) e Estação I (Montante do Jundiá).

Verifica-se também que a maior altura da onda de maré (H_0), ou seja, diferença da elevação entre os níveis máximos (Preamar) e mínimos (baixa-mar) ocorre no mês de Julho na Estação E, com aproximadamente 2,53 metros. A importância da altura da maré se relaciona ao fato de que áreas inundadas pela maré podem ter condições propícias para o desenvolvimento de vegetação tipo mangue e/ou *salt marsh*.

Quanto à influência do vento no parâmetro elevação, conforme pode ser observado na Figura 5.21, a ocorrência dos ventos nos meses de Julho e Novembro causam pequena alteração na elevação, cujas diferenças, quando ocorrem ficam em torno de 0,01 a 0,02 metros.

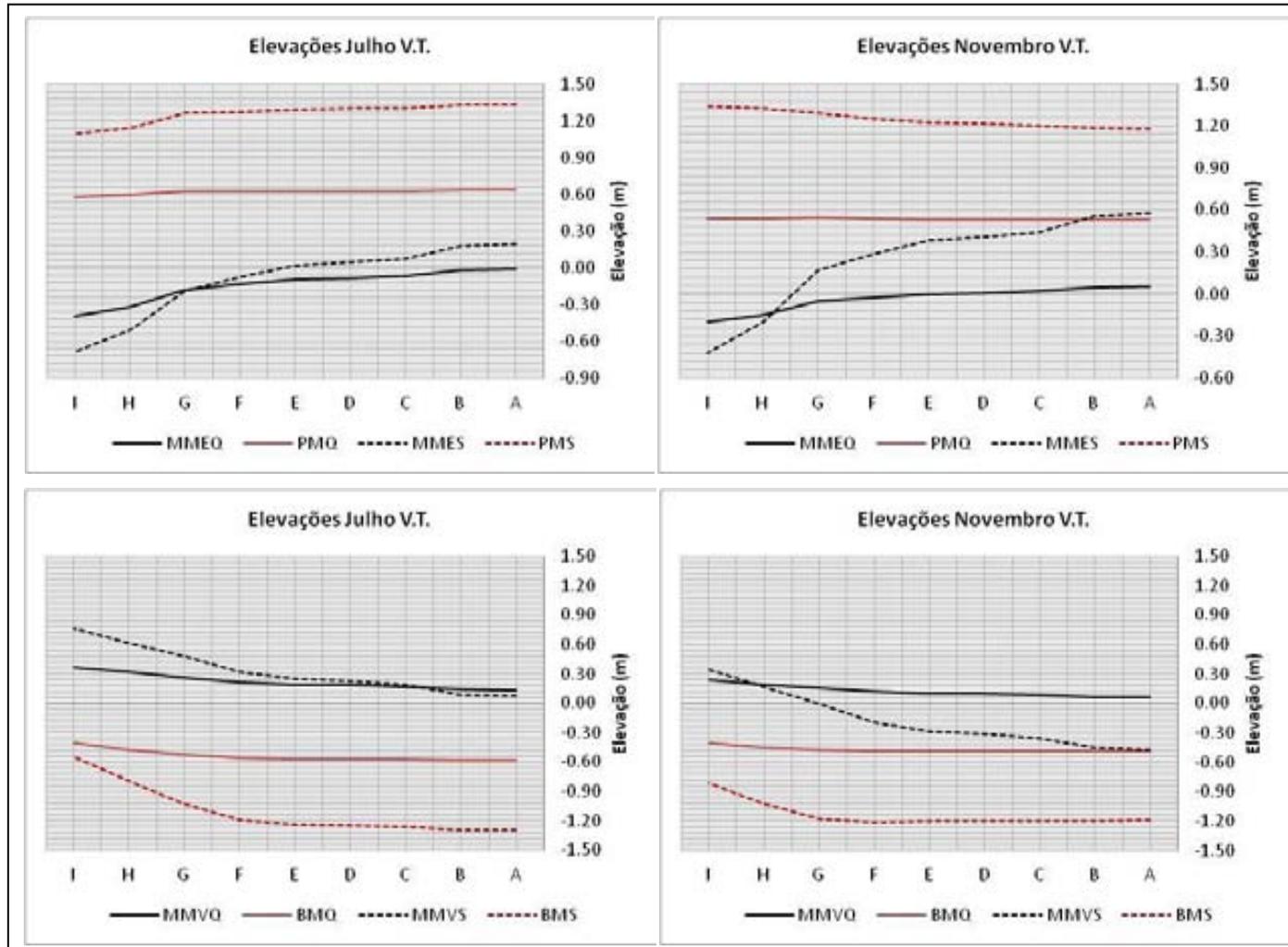


Figura 5.21: Perfil da elevação gerado pelo SisBaHiA[®] ao longo da Fatia IA, dentre os instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar dos ciclos de quadratura e sizígia (Tabela 5.1), para os Cenários 7 e 11, Julho e Novembro com vento.

5.6 ANÁLISE DO PADRÃO ESPACIAL DAS CORRENTES

De modo a visualizar o padrão espacial de correntes em diferentes situações de maré, dentre os Cenários 7 e 11 (Julho e Novembro), mostra-se na Figura 5.22, a cada quatro horas, o padrão de correntes 2DH na região modelada correspondendo ao ciclo de maré de sizígia, que se inicia no instante de baixa-mar e termina no instante de meia maré enchente, para os instantes da Tabela 5.1. Pode-se observar que os canais formados pela ilhas tendem a guiar o campo de correntes na direção paralela aos contornos, intensificando seus valores, fato este também presente no estreitamento da entrada do Estuário. Na enchente as correntes são mais fortes que na vazante, principalmente nas regiões estranguladas, para ambos os Cenários. Na porção leste do Estuário as correntes são fracas, apresentando um comportamento bastante semelhante tanto na enchente quanto na vazante. Pode-se ainda observar que os campos de velocidade mostram uma forte relação com a batimetria local. Nota-se também que na baixa-mar o Cenário 7 apresenta velocidades maiores que as do Cenário 11 no leito principal do estuário, em torno de 0,77 m/s no ciclo de sizígia.

Na Figura 5.23 é possível verificar o padrão de corrente na região modelada para os instantes de preamar e meia maré vazante do ciclo de sizígia, também para os Cenários 7 e 11. Verifica-se que na meia maré vazante as correntes são mais fortes que no instante de preamar, para ambos os Cenários, bem como, a embocadura do canal estuarino apresenta valores de velocidade que tendem a aumentar no quadrante NE ao largo do domínio. Nota-se também que na preamar o Cenário 7 apresenta velocidades maiores que as do Cenário 11 no leito principal do estuário, em torno de 0,68 m/s.

A Figura 5.24 retrata as condições de maré de quadratura, nos instantes de baixa-mar e meia maré enchente. Observa-se também que na meia maré enchente as correntes são mais fortes que na baixa-mar, para ambos os Cenários.

Por fim, na Figura 5.25 são mostradas as condições de preamar e meia maré vazante, ambas do ciclo de quadratura. Nota-se que tanto o Cenário 7 quanto o Cenário 11 apresentam maior intensidade de corrente na meia maré vazante. Comparando-se instantes semelhantes para os ciclos de sizígia e quadratura, pode-se observar que o padrão de circulação hidrodinâmico do Estuário do Rio Potengi

apresenta valores de velocidade mais intensos nos ciclos de sizígia que no ciclo de quadratura para os dois Cenários analisado.

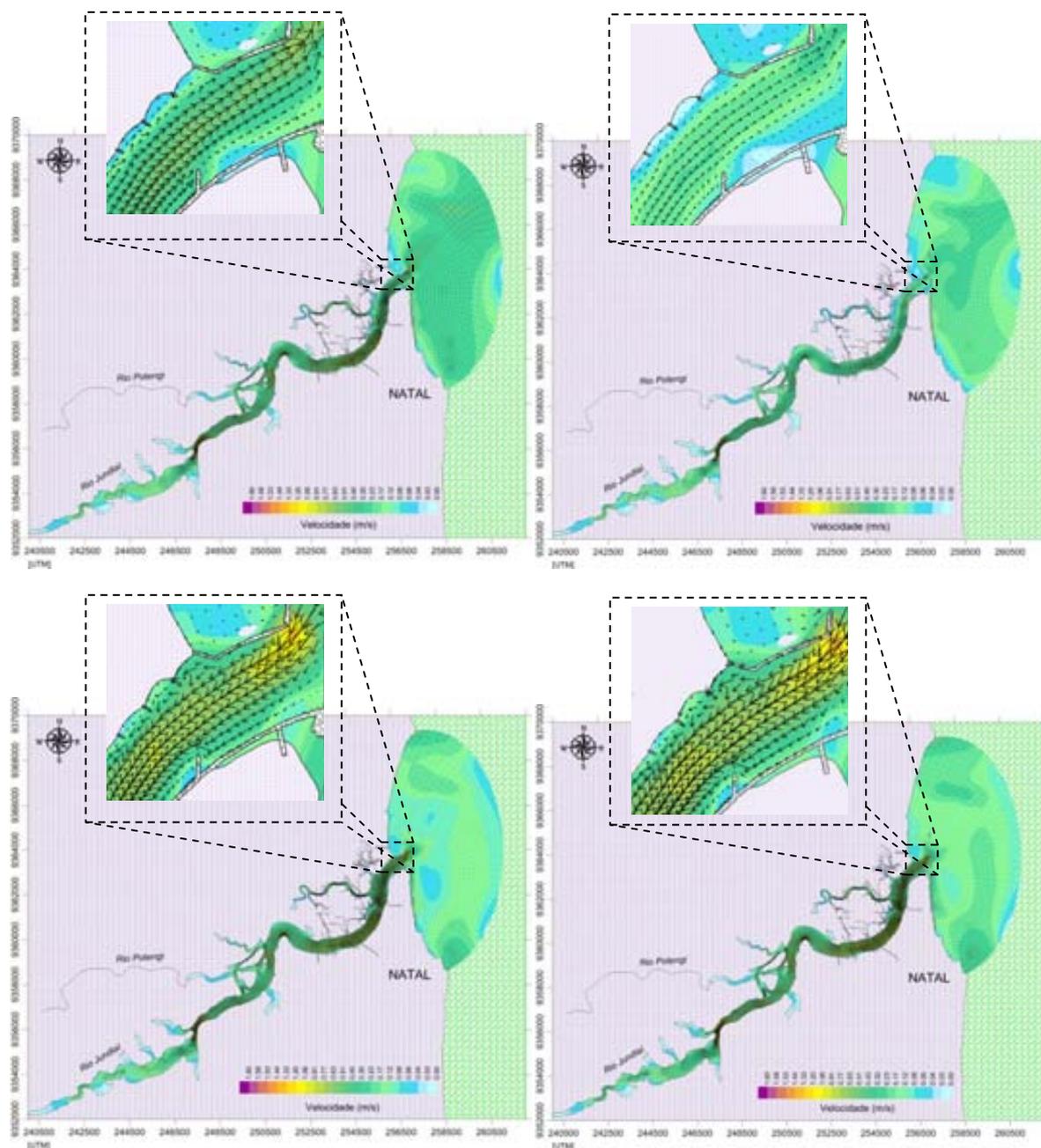


Figura 5.22: Campo de correntes no domínio do modelo obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de sizígia. Quadro acima em situação de baixa-mar e quadro abaixo em meia maré enchente. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

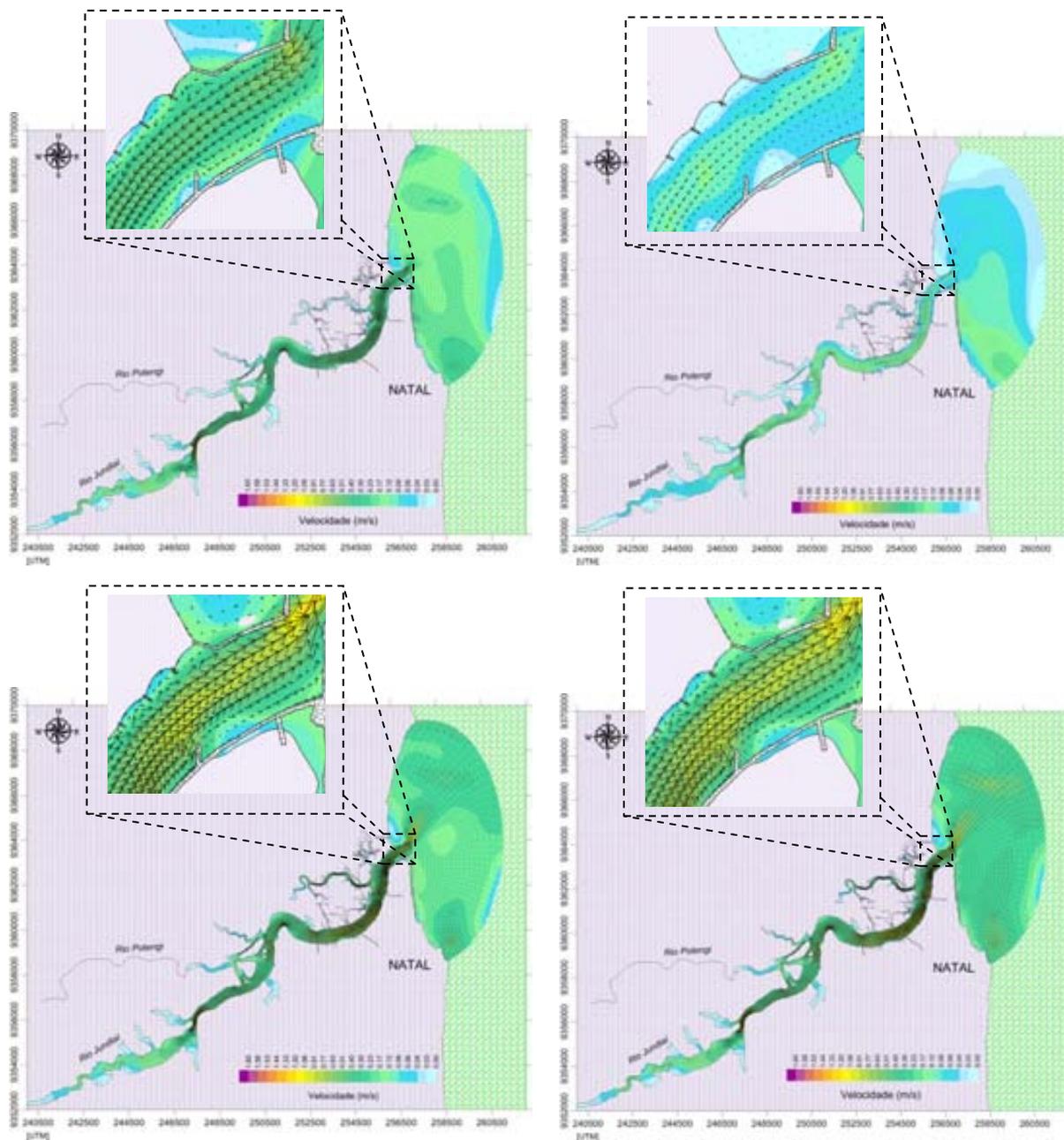


Figura 5.23: Campo de correntes no domínio do modelo obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de sizígia. Quadro acima em situação de preamar e quadro abaixo em meia maré vazante. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

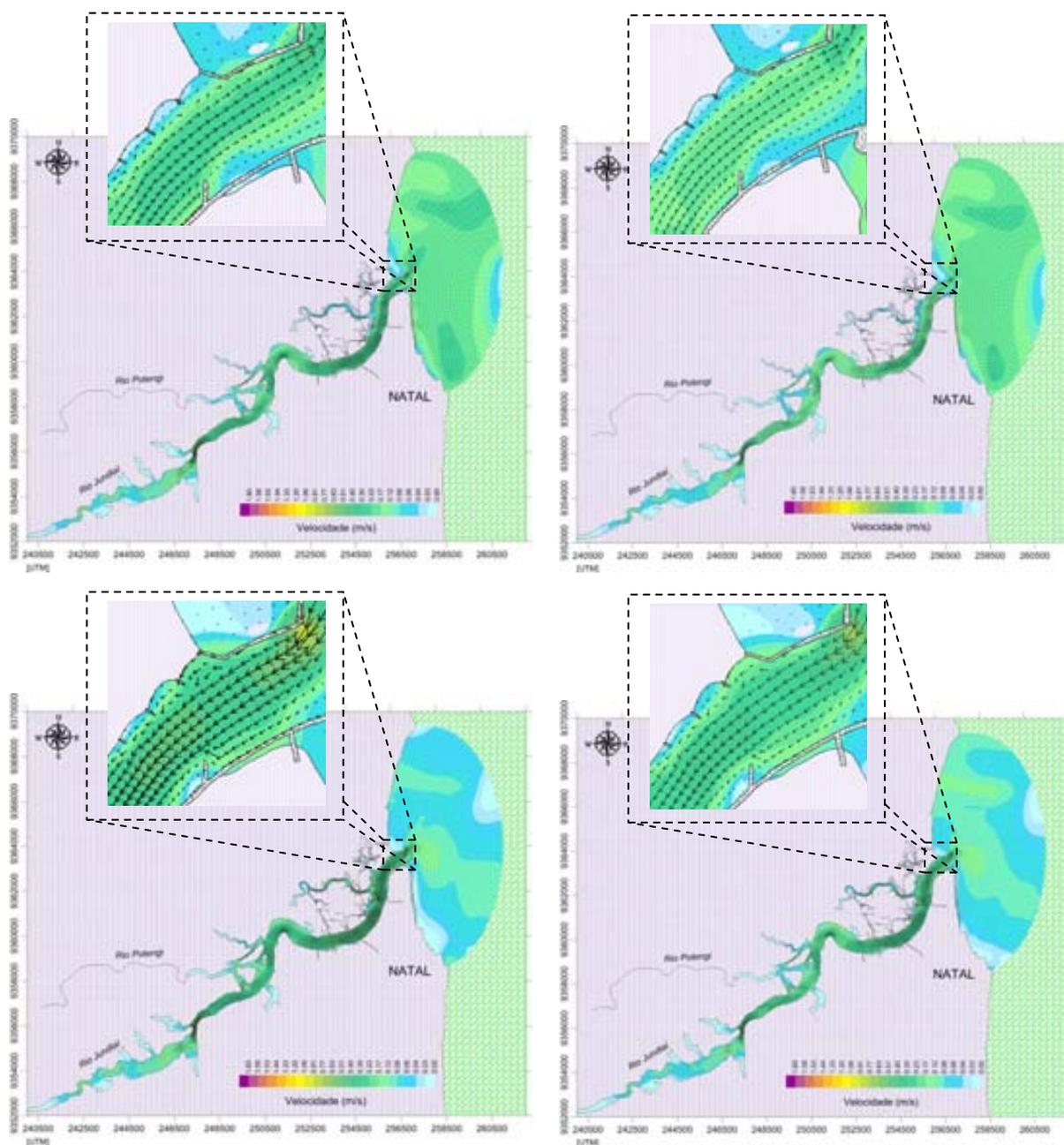


Figura 5.24: Campo de correntes no domínio do modelo obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de quadratura. Quadro acima em situação de baixa-mar e quadro abaixo em meia maré enchente. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

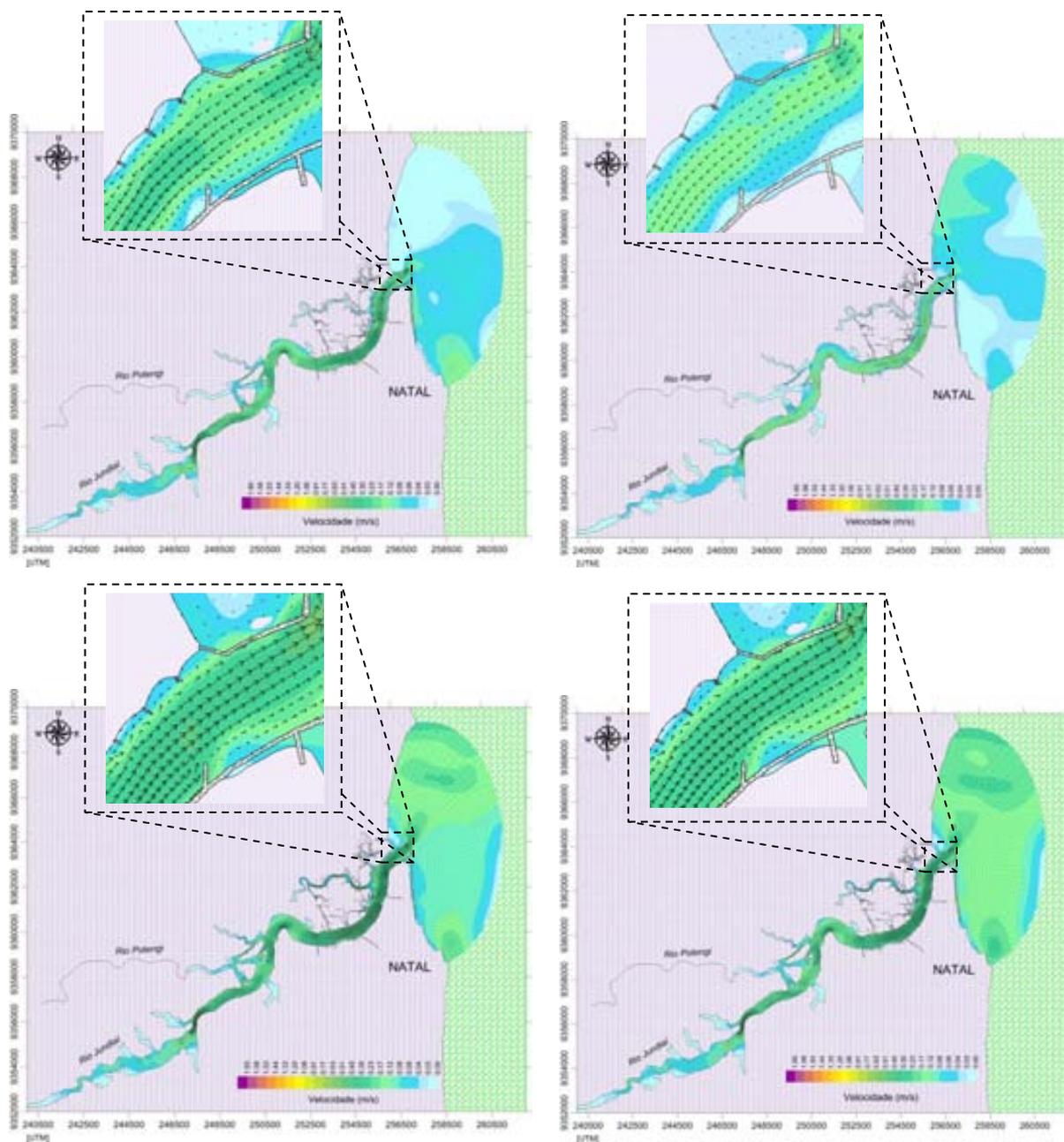


Figura 5.25: Campo de correntes no domínio do modelo obtidas com o modelo SisBaHiA[®] em situação de maré de quadratura. Quadro acima em situação de preamar e quadro abaixo em meia maré vazante. Quadros a esquerda se referem ao mês de Julho (Cenário 7) e a direita ao mês de Novembro (Cenário 11), nos instantes da Tabela 5.1.

5.7 ANÁLISE HODOGRÁFICA

Para analisar a influência do vento na direção, bem como, na intensidade das componentes U e V das velocidades, em dois pontos no interior do Estuário do Rio Potengi, recorreu-se ao conceito de curva hodográfica de velocidade.

Segundo Nascimento (2007), curva hodográfica é um gráfico construído a partir das componentes, U e V de velocidade e ilustram a relação entre essas velocidades, indicando a direção preferencial do fluxo nos eixos X e Y. Para o caso de um fluxo unidimensional, a hodógrafa de velocidade é uma linha reta que indica o movimento periódico das velocidades.

Para a análise hodográfica das componentes U e V foram considerados dois pontos no interior do Estuário do Rio Potengi, Estações E (Porto de Natal) e H (Estreito do Rio Jundiá), conforme Figura 5.2. Cada hodógrafa construída, compara os resultados da modelagem hidrodinâmica 2DH obtidos através do SisBaHiA[®] para os Cenários com vento e sem vento, ou seja, Cenário 7 com Cenário 19; e Cenário 11 com Cenário 23. Para auxiliar a análise, são plotadas também as diferenças de velocidade U_1-U_2 , para o eixo X; e V_1-V_2 , para o eixo Y. Ressalta-se que U_1 e V_1 , correspondem às componentes dos Cenários com vento.

Quanto ao período de análise foi considerado todo o tempo de modelagem no hidrodinâmico, que corresponde a 31 dias para os Cenários 7 e 19; e 30 dias para os Cenários 11 e 23.

Na Figura 5.26 estão representadas as hodógrafas de velocidade das componentes U e V dos Cenários 7 e 19; Julho com vento e sem vento respectivamente; para a Estação E ao longo dos 31 dias de simulação. Através dos gráficos verifica-se a tendência das hodógrafas a serem retas inclinadas em relação aos eixos de velocidade. A direção principal do fluxo é dada pela inclinação da reta, que neste caso, tende a se alinhar com a velocidade U (eixo X), ficando transversal ao contorno da margem. Nota-se também que não existe influência significativa quanto à ação dos ventos nas componentes U e V, como pode ser observado pelo resultado das diferenças (U_1-U_2 e V_1-V_2), centrados nas coordenadas (0,0), bem como, na direção do fluxo, através do alinhamento dos gráficos do Cenário 7 e do Cenário 19. Nota-se que a maior intensidade das componentes U e V, para estes cenários, estão em torno de 0,8 m/s.

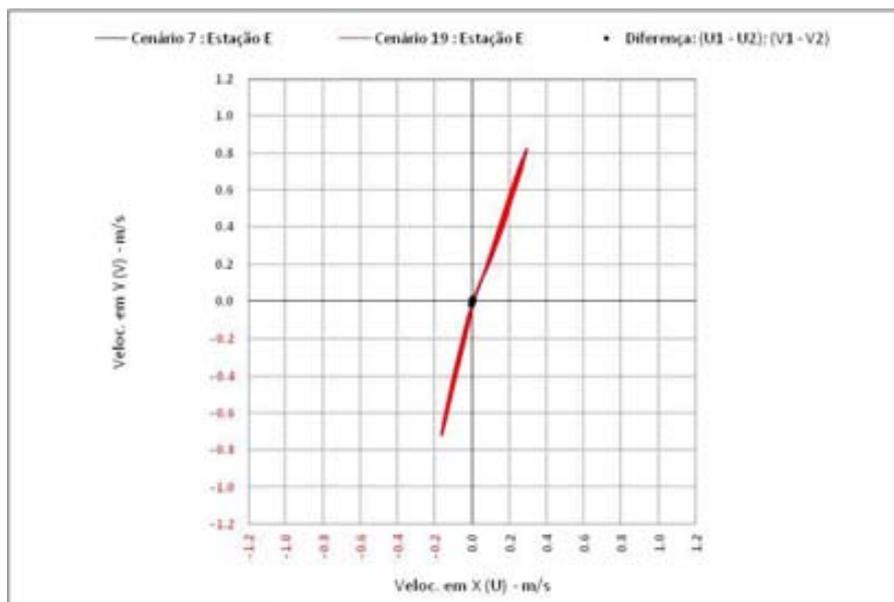


Figura 5.26: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 7 (Julho com vento) e 19 (Julho sem vento), para a Estação E ao longo dos 31 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

Na Figura 5.27 estão representadas as hodógrafas dos Cenários 11 e 23; Novembro com vento e sem vento respectivamente; para a Estação E ao longo dos 30 dias de simulação. Observa-se que apesar da mudança de Cenário, a curva hodográfica para o mês de Novembro é praticamente igual a do mês de Julho, ambas para a Estação E. Também não existem grandes diferenças quanto à ação dos ventos nas componentes U e V.

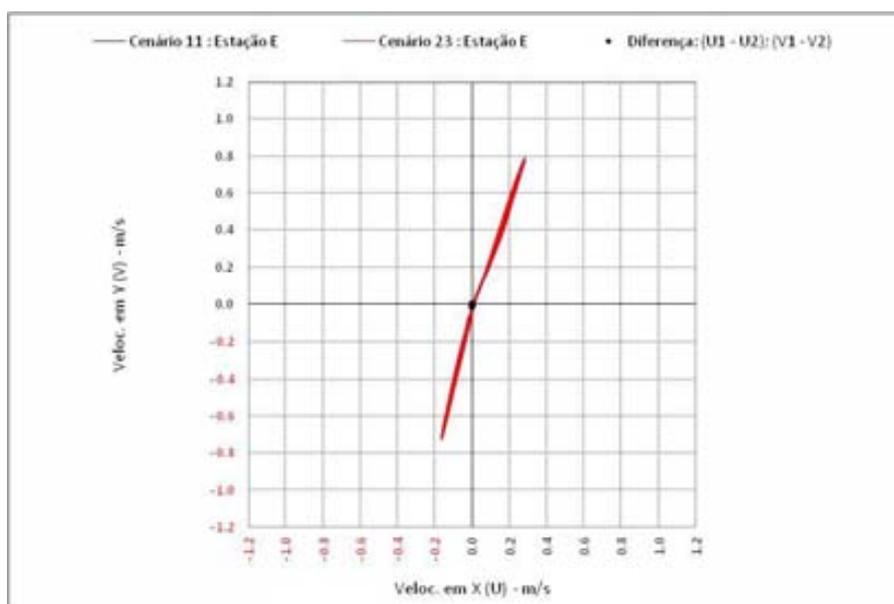


Figura 5.27: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 11 (Novembro com vento) e 23 (Novembro sem vento), para a Estação E ao longo dos 30 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®].

A Figura 5.28 representa as hodógrafas dos Cenários 7 e 19; Julho com vento e sem vento respectivamente; para a Estação H ao longo dos 31 dias de simulação. Verifica-se a mudança da inclinação do ângulo do fluxo no sentido da velocidade V, indicando que o fluxo tende a ficar paralelo ao contorno da margem (direção Y). Nota-se também um aumento de velocidade nas componentes U e V, fato este devido ao estreitamento do Rio Jundiá que gera correntes com maior intensidade. Quanto à influência dos ventos, como ressaltado anteriormente, não existem diferenças significantes nos gráficos dos Cenários 7 e 19 para a Estação H.

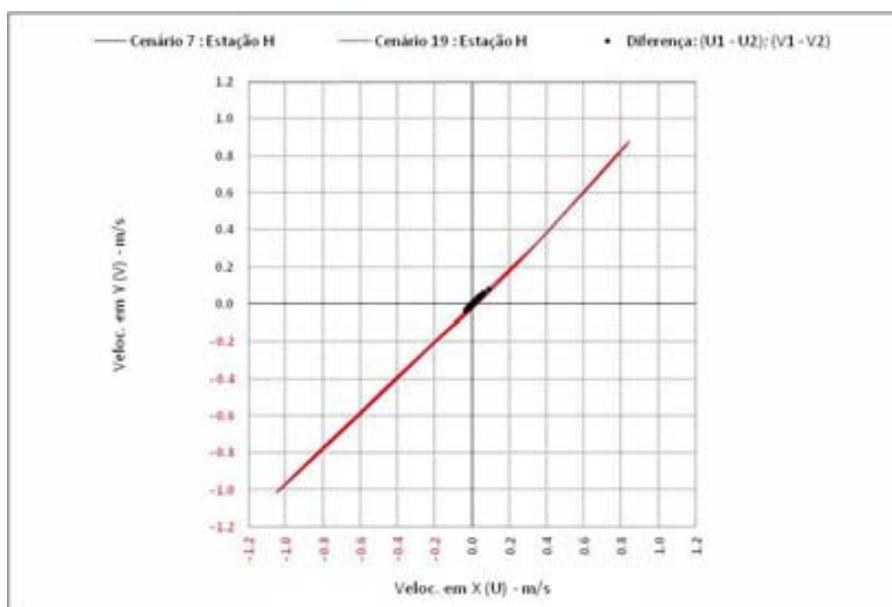


Figura 5.28: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 7 (Julho com vento) e 19 (Julho sem vento), para a Estação H ao longo dos 31 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA®.

A Figura 5.29 representa as hodógrafas dos Cenários 11 e 23; Novembro com vento e sem vento respectivamente; para a Estação H ao longo dos 30 dias de simulação. Verifica-se que apesar da mudança dos Cenários, a mudança da inclinação do ângulo do fluxo no sentido da velocidade V, bem como, um aumento de velocidade nas componentes U e V, são praticamente iguais em ambos os meses. Também não existem diferenças significantes quanto à ação dos ventos nas componentes U e V.

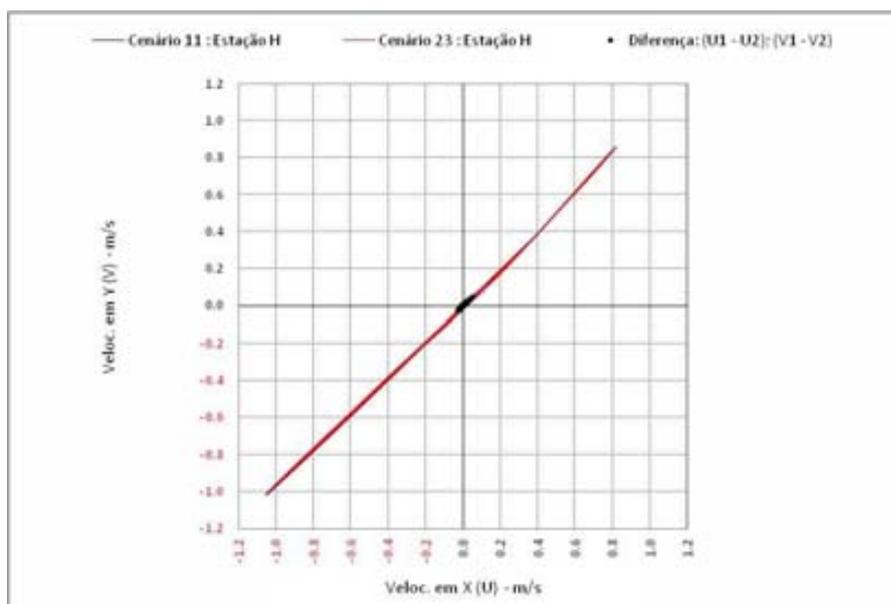


Figura 5.29: Hodógrafas das componentes U e V dos Cenários 11 (Novembro com vento) e 23 (Novembro sem vento), para a Estação H ao longo dos 30 dias simulados no modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA®.

5.8 ANÁLISE DO ESCOAMENTO RESIDUAL

Segundo Cunha et al. (2001), os campos de velocidades residuais podem ser definidos segundo a Equação 5.1.

$$U_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HU) dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} H dt}; \quad V_R = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} (HV) dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} H dt} \quad (5.1)$$

Onde:

- U_R e V_R são as componentes da velocidade residuais nas direções x e y;
- U e V são as componentes da velocidade promediadas na direção vertical nas direções x e y, respectivamente;
- H é a altura da coluna d'água;
- t_0 é o instante inicial;
- T é o período.

No Estuário do Rio Potengi, as velocidades residuais foram calculadas para os Cenários 7 e 11, ou seja, Julho e Novembro com vento, partindo dos instantes (t_0) de meia maré vazante e preamar, respectivamente. Para o Cenário 7 o período (T) foi de 31 dias; para o Cenário 11 o período (T) foi de 30 dias.

Nas Figuras 5.30 e 5.31 verifica-se que as velocidades residuais no canal principal do Estuário do Rio Potengi, são extremamente baixas e não ultrapassam 0,06 m/s, exceto nas regiões próximas aos estreitamentos, chegando a 0,18 m/s. Nota-se que as velocidades residuais obtidas no Cenário 7 são praticamente iguais as do Cenário 11, cuja a diferença é de apenas 0,01 m/s. Também observa-se a presença de um grande vórtice próximo ao estreito do Rio Jundiáí (Detalhe - A), bem como, na embocadura do Estuário (Detalhe - B).

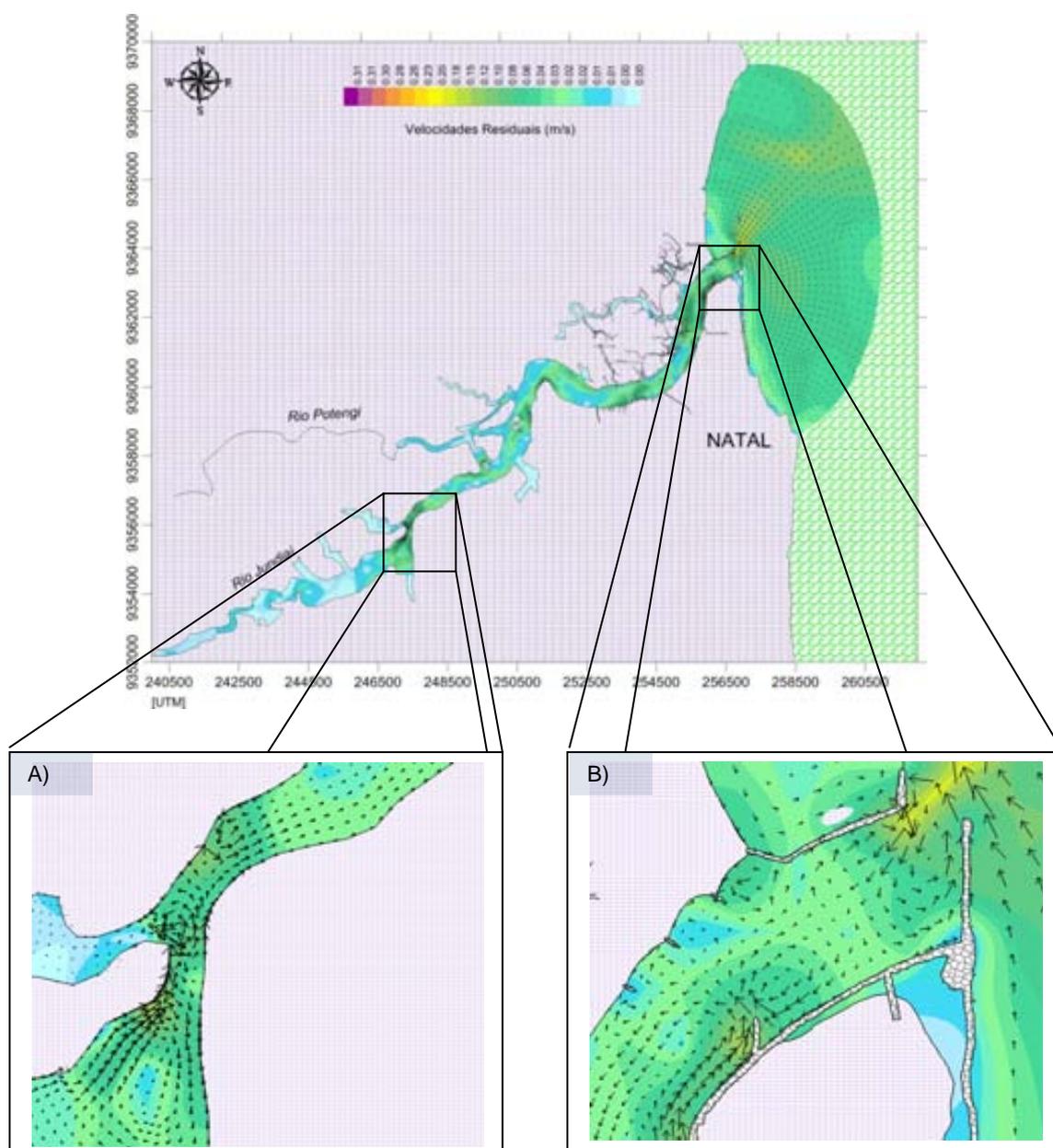


Figura 5.30: Campo de correntes residuais no domínio modelado, considerando 31 dias, do Cenário 7 (Julho com vento). A) Proximidades do estreito do Rio Jundiáí. B) Embocadura do Estuário do Rio Potengi.

As Figuras 5.30 e 5.31 também mostram a existência de uma corrente residual que segue a batimetria de maior profundidade do canal principal, indicando que o campo de velocidades residuais segue as formas da batimetria local, como ressaltado no estudo de Cunha et al. (2001).

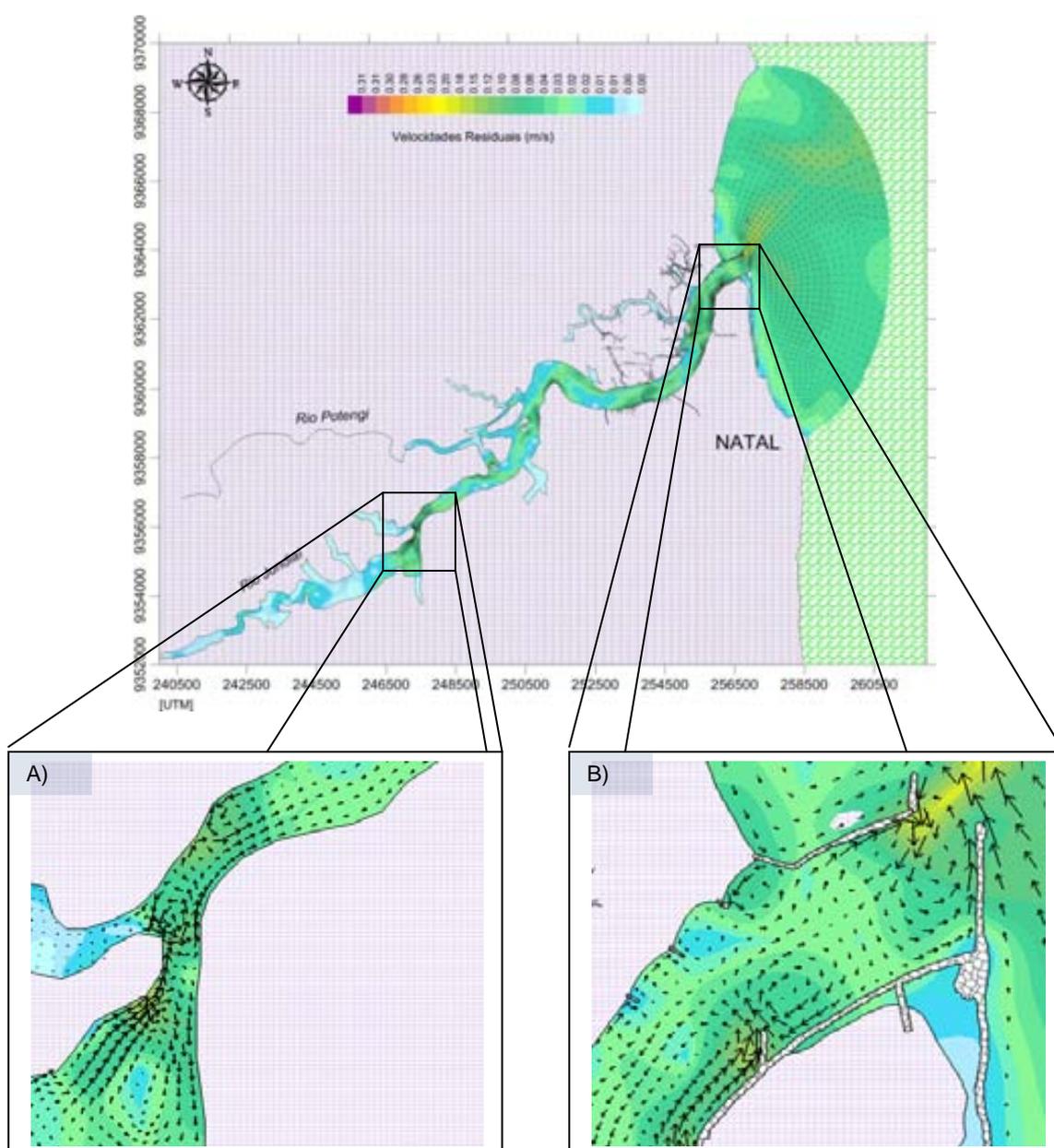


Figura 5.31: Campo de correntes residuais no domínio modelado, considerando 30 dias, do Cenário 11 (Novembro com vento). A) Proximidades do estreito do Rio Jundiáí. B) Embocadura do Estuário do Rio Potengi.

CAPITULO 6

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO

Este capítulo trata da implementação do modelo Lagrangeano do SisBaHiA[®], sendo apresentadas as considerações e os cenários de simulação do Tempo de Residência das partículas, bem como, do lançamento de efluente sanitário através de uma região localizada no interior do Estuário do Rio Potengi.

6.1 ANÁLISE DO TEMPO DE RESIDÊNCIA

Entende-se por Tempo de Residência (TR) como sendo o tempo médio de permanência de uma partícula fluida no compartimento. Usualmente, o TR é calculado pela razão entre o volume (m^3) do compartimento e o fluxo residual (m^3/s) através do compartimento (CUCCO e UMGIESSER, 2005). A determinação do tempo de residência é de maior interesse para o gerenciamento ambiental de estuários, pois a partir de seu conhecimento é possível estimar a escala de tempo transporte, e conseqüentemente determinar qual a capacidade de depurar contaminantes lançados, bem como, definir áreas de maior ou menor estagnação e regiões mais adequadas para lançamento de efluentes.

Entretanto, em corpos de água naturais há grande heterogeneidade espacial, com variadas condições de fluxos no espaço em um dado instante bem como ao longo do ano, desta forma, faz pouco ou nenhum sentido prático determinar um valor agregado definido como o “tempo de residência do compartimento”. Por conta da grande variação espacial e temporal, em corpos de água naturais faz mais sentido definir uma função Tempo de Residência variável espacialmente, para condições de fluxos característicos de diferentes forçantes hidro-meteorológicas ao longo do ano, no qual, efetivamente, seu cálculo só é viável através de modelagem computacional.

Para calcular a distribuição espacial de Tempos de Residência no Estuário do Rio Potengi, adotou-se a seguinte metodologia, desenvolvida através do SisBaHiA[®]:

[1] No instante inicial do período em consideração, o estuário é preenchido com partículas neutras. É importante ressaltar que a posição de cada partícula e o

instante de seu lançamento no estuário ficam registrados. As partículas não ocupam espaço, representam centros de pequenas massas de água e são passivamente transportadas pelas correntes onde se encontram.

[2] Após o lançamento inicial para preenchimento do estuário, inicia-se o transporte Lagrangeano, onde as partículas são transportadas via advecção e difusão turbulenta. A cada passo de tempo a posição da partícula muda, seu tempo de vida aumenta e é contabilizado.

[3] Quando uma partícula sai do estuário passando pela região de fronteira aberta, o seu tempo de vida ao sair será o seu TR. Assim, o tempo de vida que a partícula tiver ao sair do compartimento passa a ser o valor da função TR na posição inicial de lançamento da partícula dentro do estuário.

6.1.1 Cenários para análise do TR

Como ressaltado anteriormente, os principais processos de transporte das partículas através do modelo de transporte Lagrangeano são: a advecção e a difusão turbulenta.

Para a escolha dos cenários do Tempo de Residência, primeiramente foram considerados os resultados obtidos na análise do escoamento residual, Item 5.8; como as velocidades residuais obtidas foram extremamente baixas e praticamente iguais dentre os cenários analisados; adotou-se para a análise do TR os mesmos cenários considerados na análise do escoamento residual (Cenários 7 e 11); comparando assim o mês de maior, com o de menor média do módulo de velocidade 2DH para o ano de 2010, ou seja, maior e menor advecção, respectivamente.

Como os TR associados a fluxos advectivos e difusivos podem ser bastante longos, da ordem de meses, conforme ressalta Rosman (2007); neste sentido foi considerado um cenário para todos os meses do ano de 2010.

Desta forma, os Cenários para a análise do Tempo de Residência através do modelo de transporte Lagrangeano são:

- ❖ **Cenário TR1:** Neste cenário foi considerado o mês de maior média do módulo de velocidade 2DH para o ano de 2010, conforme já analisado no Item 5.3; Cenário 7 do hidrodinâmico.
- ❖ **Cenário TR2:** Neste cenário foi considerado o mês de menor média do módulo de velocidade 2DH para o ano de 2010, conforme já analisado no Item 5.3; Cenário 11 do hidrodinâmico.
- ❖ **Cenário TR3:** Neste cenário foram considerados todos os meses do ano de 2010.

6.2 LANÇAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO ATRAVÉS DE UMA REGIÃO FONTE

No lançamento de efluente em corpos d'água, o processo de mistura inicial do esgoto com a água ambiente, dá origem a duas regiões com características marcadamente distintas. A primeira ocorre no campo próximo do ponto de lançamento, na chamada zona de mistura ativa, região de intensa turbulência, onde a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação. Na medida em que se afasta, a pluma ejetada vai se misturando com a água ambiente, até tornar-se neutra. Na segunda região, então chamada de campo afastado ou zona de mistura passiva, a pluma neutra é transportada passivamente pelas correntes. Devido às diferenças de escoamento entre as zonas de mistura ativa e passiva, são adotadas metodologias de modelagem específicas para cada zona (ROSMAN e FEITOSA, 2006).

De acordo com Rosman e Feitosa (2006), na zona de mistura passiva, a distribuição de concentração dependerá principalmente dos seguintes processos, em geral altamente variáveis no tempo e no espaço:

- ❖ Advecção promovida pelas correntes responsáveis pelo transporte do contaminante em questão. A modelagem do transporte de plumas depende da qualidade do modelo hidrodinâmico que gera o campo de correntes que advecta a pluma.
- ❖ Difusão turbulenta do contaminante. Esta turbulência ambiente é gerada por tensões de atrito internos na massa d'água, tensões de atrito do fluido com o

fundo e atrito de vento na superfície livre. Em geral o transporte de plumas passivas é dominado pela advecção, mas a difusão turbulenta também é de fundamental importância.

❖ Reações cinéticas de produção ou decaimento do contaminante no meio receptor. Na modelagem do decaimento de bactérias indicadoras de contaminação fecal, a aproximação usual é simular, uma vez determinadas às concentrações de bactérias afluentes ao corpo d'água, o decaimento destes microrganismos em função de diversos parâmetros ambientais.

Segundo Feitosa (2007), a distribuição e a quantidade de bactérias de origem entérica, indicadoras de contaminação fecal no ambiente marinho, dependem da advecção e dispersão promovidas pelas correntes oceânicas e por fatores: físicos (Adsorção, Coagulação, Floculação, Sedimentação e Temperatura); físico-químicos (pH, Salinidade, etc) e bioquímico-biológicos (Níveis de Nutrientes, Predação, Bacteriófagos e Algas), podendo ocorrer entre estes fatores sinergias de efeitos osmóticos e foto-oxidação. Ainda segundo o mesmo autor, dentre todos os fatores anteriormente mencionados, a radiação solar possui o maior efeito deletério sobre as taxas de microrganismos presentes no ambiente marinho.

Na modelagem numérica de bactérias indicadoras, a taxa de decaimento é comumente representada pelo parâmetro T_{90} , que corresponde ao tempo necessário para que ocorra uma redução de 90% na população original de bactérias (ROSMAN E FEITOSA, 2006).

No presente estudo, foi considerado o lançamento de efluente sanitário através de uma região fonte, que corresponde a uma ETE localizada no interior do Estuário do Rio Potengi. As ordens de grandeza das vazões e das concentrações efluentes da ETE foram consideradas conforme estudo de Medeiros (2009). Pretende-se analisar qualitativamente a influência do parâmetro T_{90} sobre os níveis de concentração de coliformes fecais (isolinhas de concentração), bem como, a posição das partículas no Estuário do Rio Potengi.

Da mesma forma que no Tempo de Residência, para a escolha dos cenários deste estudo, se considerou os resultados obtidos na análise do escoamento residual, Item 5.8. Como as velocidades residuais, dentre os cenários analisados, foram praticamente iguais, resolveu-se manter para a análise do lançamento de

efluente o mês de menor média do módulo de velocidade 2DH para o ano de 2010, ou seja, Novembro - Cenário 11 hidrodinâmico.

Devido às baixas vazões de lançamento adotadas, considerou-se que a pluma não interfere na hidrodinâmica ambiente, não existindo assim diferenças significativas entre a quantidade de movimento do efluente e do fluido receptor, gerando assim uma zona de mistura passiva.

Quanto à região fonte, devido à escala do domínio de interesse, a mesma se comportou como sendo uma fonte pontual, de forma elíptica com dimensões de 20 x 20 metros, a uma profundidade de 0,5 metros da superfície livre, cujo centro está nas coordenadas 247643.1100 UTM longitude leste e 9356339.2300 UTM latitude sul, conforme Figura 6.1.

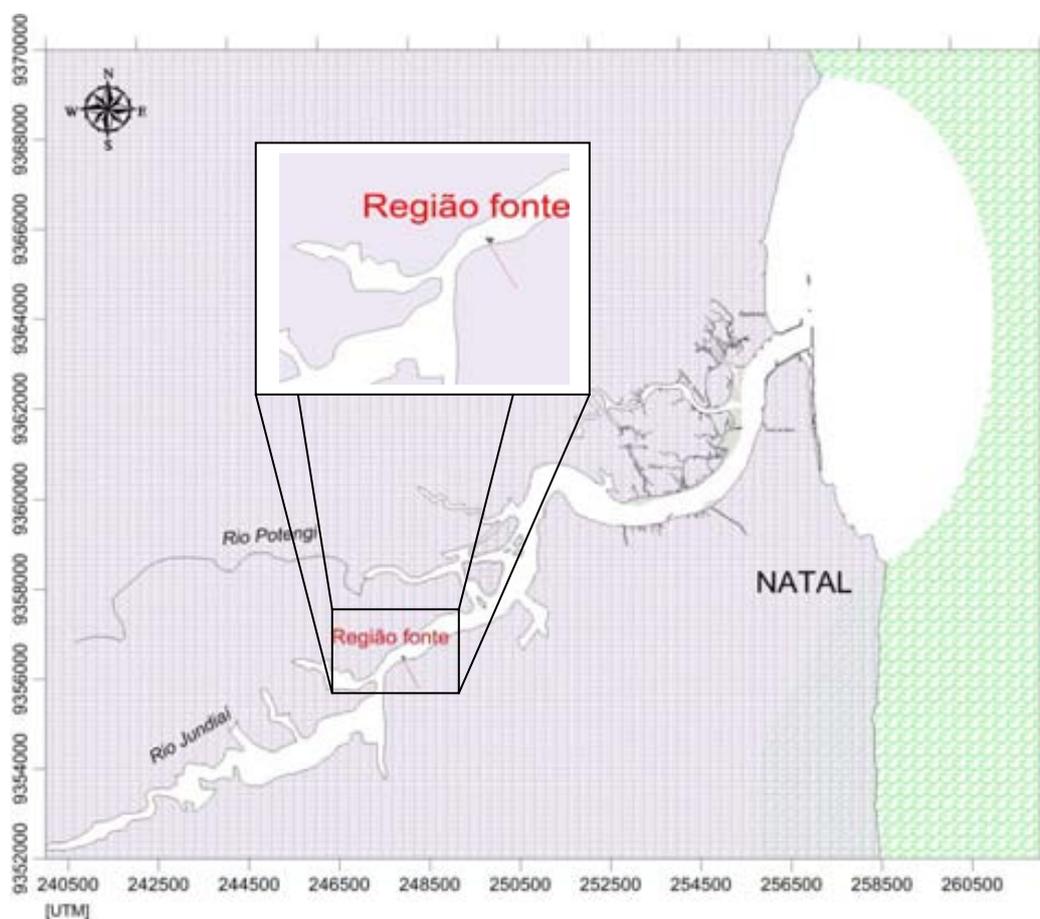


Figura 6.1: Localização da região fonte utilizada no lançamento de partículas do modelo Lagrangeano do SisBaHiA®.

6.2.1 Cenários para a análise do lançamento através de uma região fonte

Para a análise do lançamento de efluente, através de uma região fonte localizada no interior do Estuário do Rio Potengi, foram considerados quatro cenários, com suas respectivas vazões, concentrações e tempo de lançamento, conforme apresentado na Tabela 6.1.

Como citado anteriormente, a escolha das ordens de grandeza das vazões correspondem as do estudo de Medeiros (2009). Quanto à escolha do T_{90} , destaca-se que foi considerado um lançamento muito conservador, com T_{90} de vinte cinco horas, que corresponde a condições de sobrevivência bacteriana muito alta e 30 dias com bastante nebulosidade; sendo hipoteticamente, a situação mais crítica no Estuário; e um T_{90} de cinco horas, devido a se considerar um decaimento pouco conservador i.e. mais realista, com condições de sobrevivência bacteriana mais baixa.

Os valores de T_{90} considerados se enquadram dentre os sugeridos por Thomann e Mueller (1987), cujo organismo seja coliforme.

Tabela 6.1: Cenários adotados para a análise do lançamento de efluente através de uma região fonte.

Cenários	Vazão (m ³ /s)	Concentração do Efluente (NMP / 100 ml)	Tempo de Lançamento (horas)	T_{90} (horas)
Lançamento 1	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^7$	12	25
Lançamento 2	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^7$	24	25
Lançamento 3	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^7$	72 (intercaladas 12 x 12)	25
Lançamento 4	$5,0 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^7$	72 (intercaladas 12 x 12)	5

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÕES DO MODELO LAGRANGEANO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às modelagens do Tempo de Residência das partículas e do lançamento de efluente sanitário através de uma região fonte localizada no interior do Estuário do Rio Potengi. Vale ressaltar que tais resultados devem ser considerados qualitativamente, visto que não foi possível realizar a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado e vazões dos principais contribuintes constantes. No entanto, destaca-se que, como foram utilizados dados de ventos medidos através da Estação de Superfície Automática do INMET – UFRN e corrigidos para bem representar a velocidade sobre a água, marés datadas para os mesmos períodos das simulações e correções de diferença de fase da maré, comparações entre os cenários estabelecidos podem ser efetuadas.

7.1 RESULTADOS DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DAS PARTÍCULAS

O primeiro resultado a ser apresentado se refere à análise do Tempo de Residência das partículas no Estuário do Rio Potengi, no qual será comparado o Cenário TR 1 com o Cenário TR 2.

A simulação do Cenário TR 1 foi realizada ao longo dos 31 dias do mês de Julho (Cenário 7 – hidrodinâmico), onde foram lançadas automaticamente pelo Sistema 20.791 partículas com espaçamento 50 x 50 metros. No final da simulação restaram 3.273 partículas, que correspondem a 16 % das partículas lançadas.

Já a simulação do Cenário TR 2 foi realizada ao longo dos 30 dias do mês de Novembro (Cenário 11 – hidrodinâmico), onde foram lançadas automaticamente pelo Sistema 20.936 partículas com espaçamento 50 x 50 metros. No final da simulação restaram 2.708 partículas, que correspondem a 12 % das partículas lançadas.

Na Figura 7.1 é possível observar as regiões de isoconcentrações do Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para os Cenários TR 1 e TR 2. Verifica-se que apesar de ter a maior média do módulo de velocidade para o ano de 2010, Julho apresenta Tempos de Residência maiores que Novembro. Isto se

deve ao fato de Novembro possuir elevado módulo de velocidade na meia maré vazante nos ciclos de quadratura e sizígia, valor este que supera os de Julho (Figuras 5.4 e 5.5), levando para fora do Estuário às partículas lançadas dentro do domínio, conforme número de partículas restantes, podendo ser visualizado através da Figura 7.2.

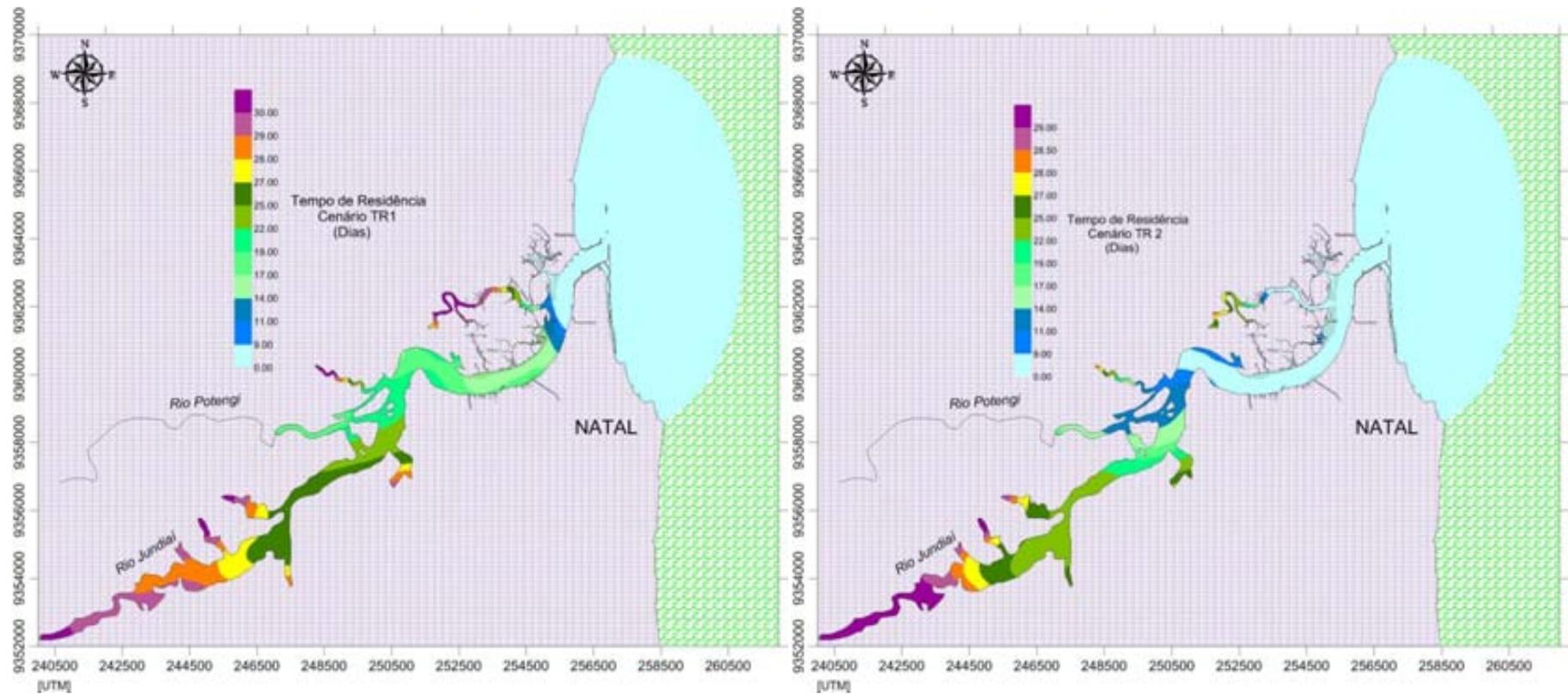


Figura 7.1: Regiões de isoconcentrações do Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®]. Quadro a esquerda para a situação do Cenário TR 1 e quadro a direita para a situação do Cenário TR 2.

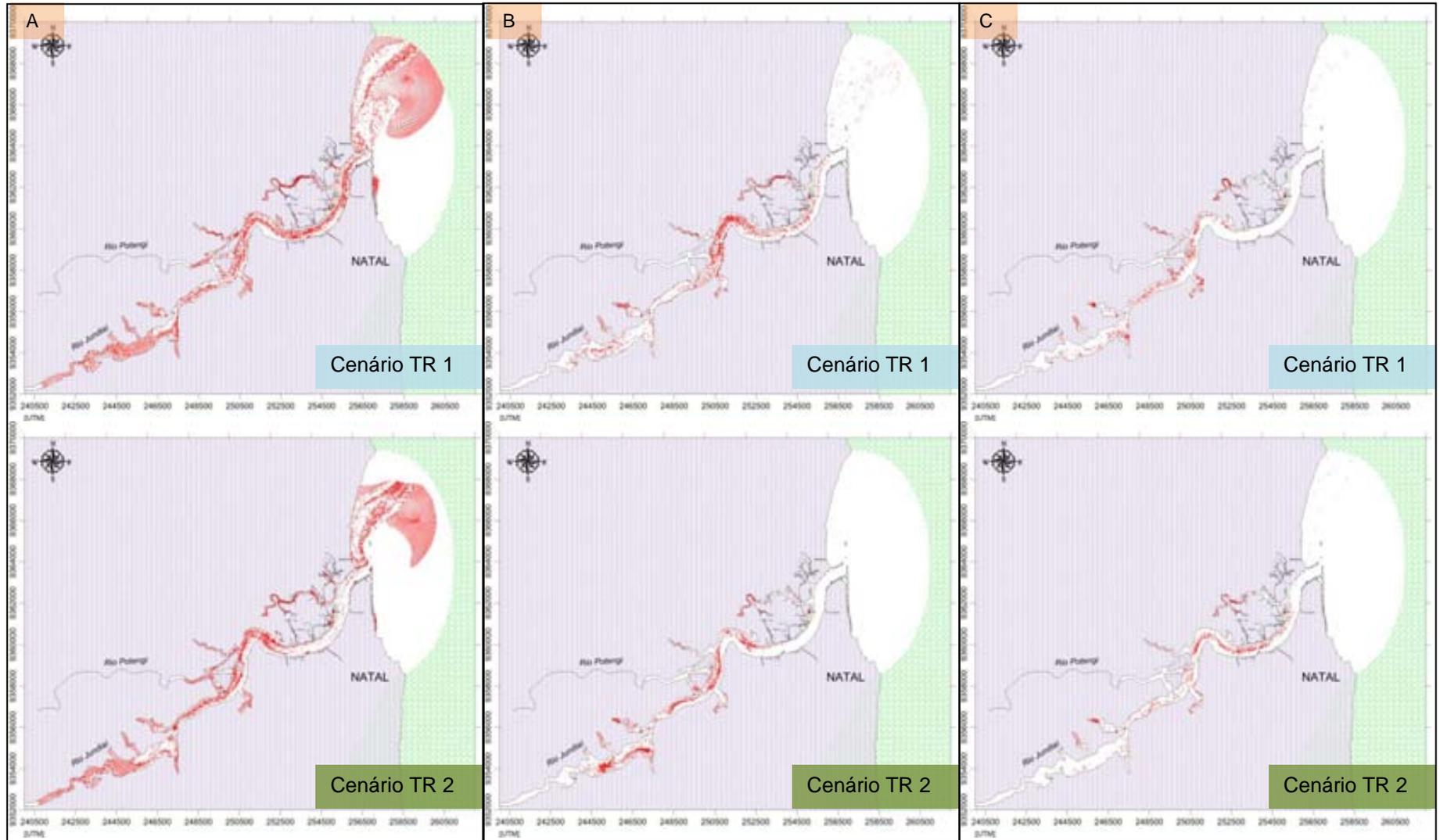


Figura 7.2: Posição das partículas obtida numericamente pelo SisBaHiA[®] no estuário do rio Potengi. A) quadros que correspondem ao instante de tempo após o primeiro dia de simulação, B) quadros que correspondem ao décimo quinto dia de simulação e C) quadros que correspondem ao trigésimo primeiro e trigésimo dia de simulação, da esquerda para a direita respectivamente.

Os resultados das regiões de isoconcentrações do TR quando analisados conjuntamente com a posição das partículas mostradas na Figura 7.2, dão indicativos de locais propensos à acumulação de substâncias dissolvidas na massa de água. Verifica-se que enquanto o TR cresce para a região mais interna do estuário, após algum tempo, as partículas passam a ocupar apenas os dendritos e reentrâncias do estuário. Os resultados para o Cenário TR 2 mostram que, após 15 dias de simulação, o leito principal do Estuário do Rio Potengi do trecho compreendido entre o Canal do Baldo a entrada do estuário, apresenta um número muito pequeno de partículas.

No final da simulação, para ambos os Cenários, verifica-se que as partículas se concentram principalmente da ponte de Igapó para a parte mais interior do Estuário, bem como, em dendritos e reentrâncias sendo possível afirmar que estas regiões são propícias à estagnação; e conseqüentemente podem apresentar problemas relacionados à qualidade da água.

Observa-se também através da Figura 7.1 que o Estuário do Rio Potengi apresenta Tempos de Residência que correspondem a escala máxima do período simulado, por este motivo, são importantes os resultados obtido no Cenário TR 3, doravante mencionados.

A simulação do Cenário TR 3 foi realizada ao longo dos 365 dias do ano de 2010, na qual foram lançadas pelo Sistema 20965 partículas com espaçamento 50 x 50 metros. No final da simulação restaram 2368 partículas dentro do domínio modelado, que correspondem a 11 % das partículas lançadas.

A partir da Figura 7.3 é possível observar o resultado das regiões de isoconcentrações do Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para os Cenários TR 3. Para as condições simuladas, verifica-se que o Estuário do Rio Potengi possui tempo de residência que variam de 38 a 343 dias, sendo os dendritos e reentrâncias as regiões de maior estagnação cujo TR varia de 173 a 343 dias.

Observa-se também que o canal principal do estuário pode ser dividido em três regiões distintas (A), (B) e (C), como mostrado na Figura 7.3. A reta (A) compreende a região que vai da embocadura do estuário a proximidade do Porto, onde o TR varia de 38 a 52 dias. A reta (B) compreende os trechos entre a proximidade do Porto e Felipe Camarão, cujo TR varia de 69 a 114 dias. Por fim a

reta (C), de Felipe camarão a parte mais interna do Estuário, com TR que varia de 142 a 173 dias.

Na Figura 7.3 é possível também visualizar as regiões de isoconcentrações do TR obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], bem como, os principais locais de lançamento de efluente e as áreas de carcinicultura (MEDEIROS, 2009). Nota-se a localização inadequada, do ponto de vista de Tempo de Residência, de alguns destes lançamentos, dando-se destaque ao fato de que também pode haver sobreposição de plumas quando ocorrerem lançamentos simultâneos.

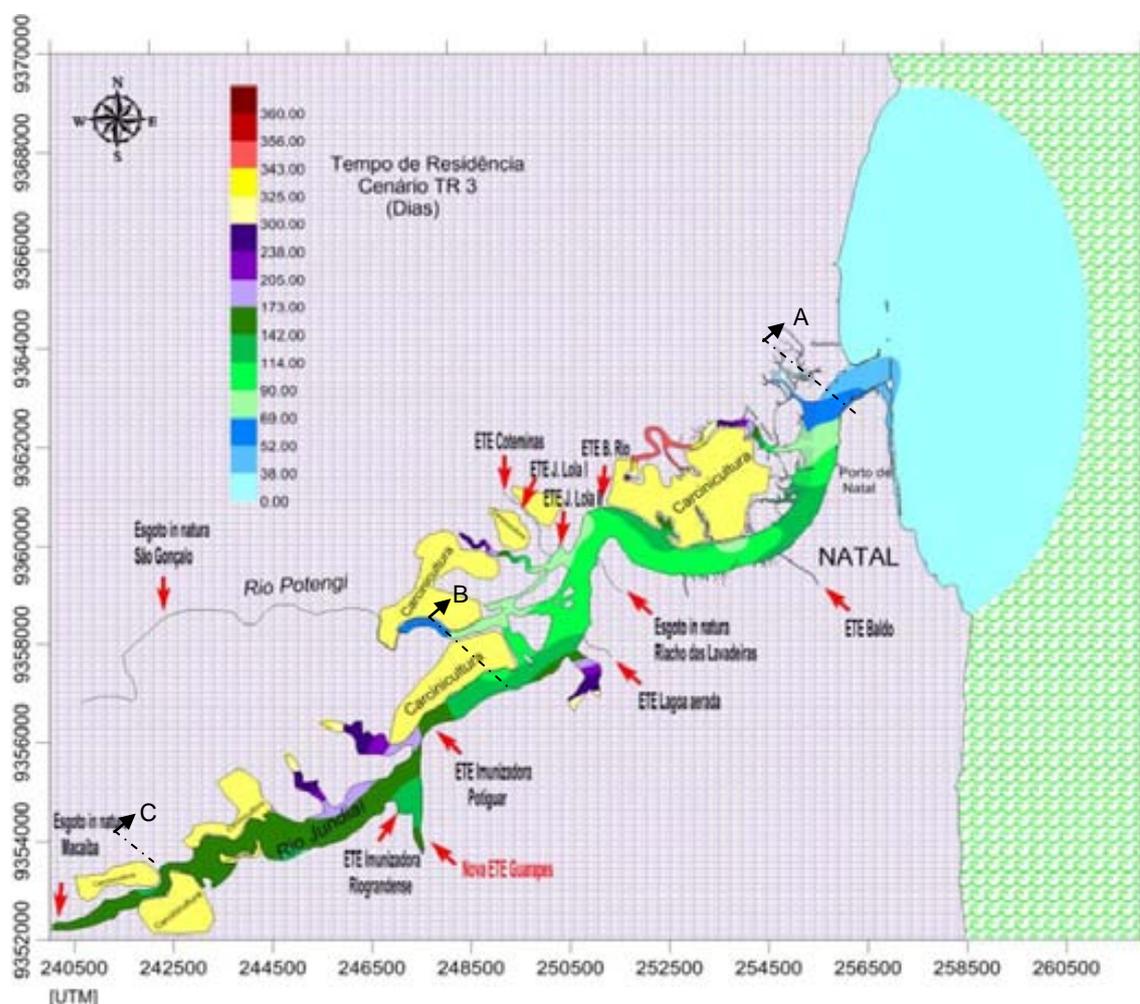


Figura 7.3: Regiões de isoconcentrações do Tempo de Residência obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para a situação do Cenário TR 3, durante os 365 dias do ano de 2010. Setas em vermelho indicam os principais lançamentos de efluentes e as áreas em amarelo indicam os locais de carcinicultura. Retas tracejadas demarcam três regiões distintas, (A) que vai da embocadura do Estuário a proximidade do Porto, (B) da proximidade do Porto a Felipe Camarão e (C) de Felipe Camarão a parte mais interna do Estuário.

7.2 RESULTADOS DO LANÇAMENTO DE EFLUENTE SANITÁRIO ATRAVÉS DE UMA REGIÃO FONTE

Os resultados das regiões de isoconcentrações, bem como, a posição das partículas obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], são mostrados primeiramente para o Cenário Lançamento 1 e Lançamento 2, ambos simulados ao longo dos 30 dias do mês de novembro de 2010 (Cenário 11 – hidrodinâmico), cujo o T_{90} utilizado para ambos os cenários foi de 25 horas, constante.

O início da simulação do Cenário Lançamento 1 se deu às 22:00 hs do dia 05/11/2010, no instante de baixa-mar de sizígia e terminou às 10:00 hs do dia 06/11/2010 no instante de meia maré vazante de sizígia. A vazão lançada foi de 0,005 m³/s a uma concentração de $2,0 \times 10^7$ NMP de coliformes fecais/100 ml.

A simulação do Cenário Lançamento 2 também teve início às 22:00 hs do dia 05/11/2010, no instante de baixa-mar de sizígia, terminando às 22:00 hs do dia 06/11/2010 no instante de preamar de sizígia. A vazão lançada foi metade da do Cenário Lançamento 1, ou seja, 0,0025 m³/s a uma concentração de $2,0 \times 10^7$ NMP de coliformes fecais/100 ml.

Na Figura 7.4 é possível observar a posição das partículas e as regiões de isoconcentrações de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 1. Observa-se através do quadro (A), que seis horas após o início do lançamento a concentração atinge valores que vão de 21 a 174 NMP de coliformes/100ml, do ponto de lançamento a foz do Estuário. Decorridas doze horas do início da simulação, ou seja, no instante final de lançamento, observa-se que mesmo estando em meia maré vazante de sizígia as partículas lançadas não atingem a foz do Estuário do Rio Potengi, se limitando as proximidades do Canal do Baldo. Às 04:00 hs do dia 07/11/2010, ou seja, após dezoito horas do fim do lançamento é possível notar, na parte mais interna do estuário, que as concentrações de coliformes não são nulas, e apresentam valores entre 0,2 a 11,02 NMP de coliformes/100ml.

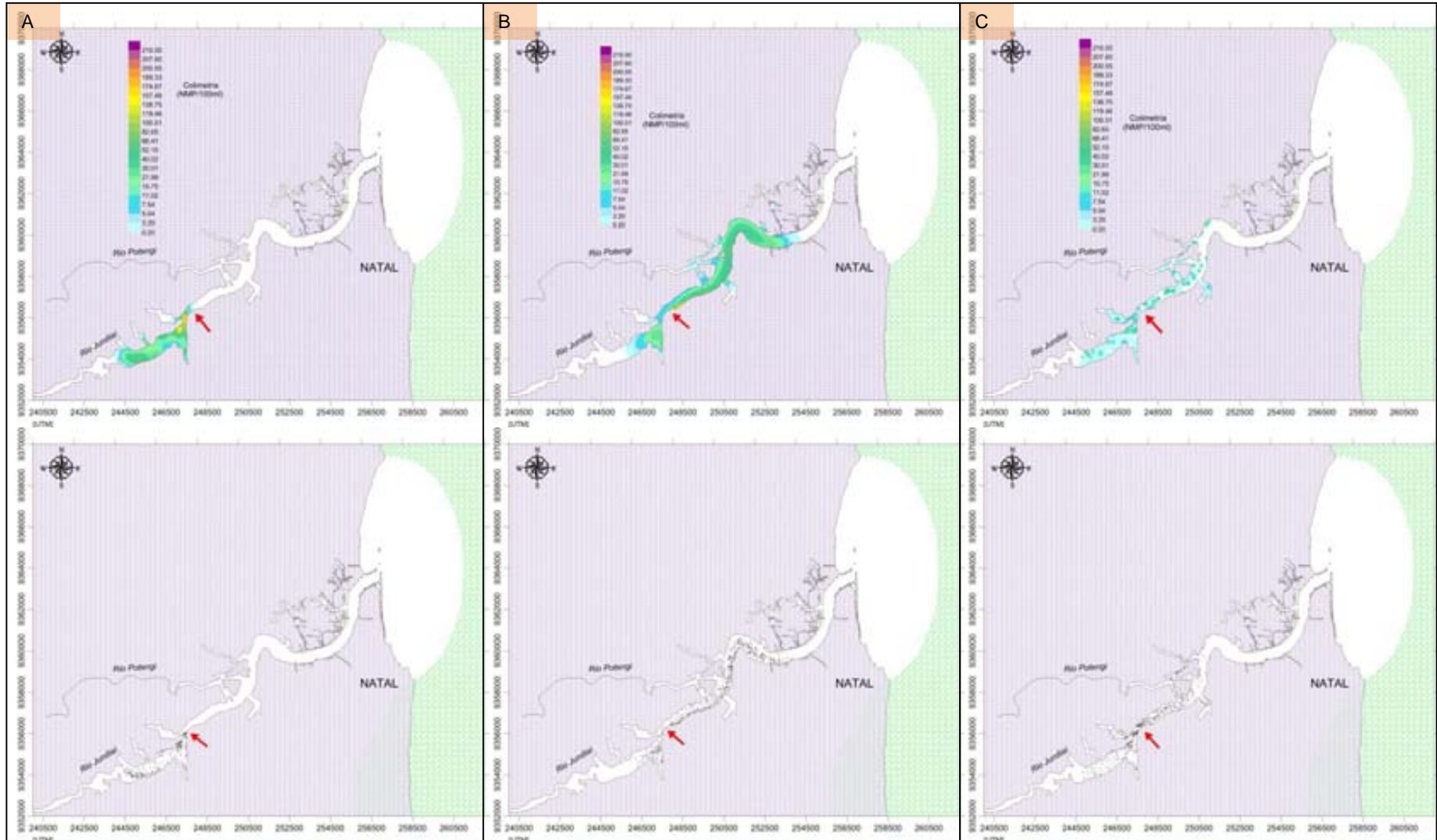


Figura 7.4: Posição das partículas e regiões de isoconcentrações de coliformes fecais (NMP/100m) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 1. Quadro (A) se refere ao instante das 04:00 hs do dia 06/11/2010 (6 horas após o início lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 06/11/2010 (12 horas após o início lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 04:00 hs do dia 07/11/2010 (30 horas após o início lançamento).

Através da Figura 7.5 é possível verificar a posição das partículas e as regiões de isoconcentrações de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 2, cuja vazão foi reduzida a metade e a duração do lançamento foi duplicada. Quando comparamos o instante de seis horas após o início de lançamento do Cenário Lançamento 1 com o instante de seis horas após o início de Cenário Lançamento 2, nota-se uma redução da concentração de coliformes fecais neste último. Fato este que se repete no instante doze horas após o início do lançamento. Já para o instante das 04:00 hs do dia 07/11/2010, ou seja, após seis horas do fim do lançamento do Cenário Lançamento 2, nota-se que as concentrações presentes no estuário são superiores aquelas encontradas no Cenário Lançamento 1. Verifica-se também que mesmo duplicando a duração do lançamento, as partículas lançadas não atingem a foz do Estuário do Rio Potengi.

De maneira geral, observa-se que quando a vazão é reduzida a metade e o lançamento ocorre em um espaço de tempo maior, como no caso do Lançamento 2, apesar do Estuário concentrar por mais tempo as substâncias lançadas, os níveis de concentração são menores, causando com isto, um menor impacto a qualidade das águas deste corpo.

As Figuras 7.6 e 7.7, tratam dos resultados das regiões de isoconcentrações, bem como, a posição das partículas obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para os Cenários Lançamento 3 e Lançamento 4, ambos simulados ao longo dos 30 dias do mês de Novembro de 2010 (Cenário 11 – hidrodinâmico), cujo T_{90} variou de um cenário para outro, sendo de 25 horas para o Cenário Lançamento 3 e de 5 horas para o Cenário Lançamento 4, ambos constantes.

O início da simulação do Cenário Lançamento 3 se deu às 10:00 hs do dia 06/11/2010, no instante de meia maré vazante de sizígia e terminou às 22:00 hs do dia 11/11/2010, no instante de preamar de quadratura, totalizando setenta e duas horas de lançamento intercaladas doze por doze, ou seja, seis lançamentos com duração de doze horas. A vazão lançada foi de 0,005 m³/s, e a concentração foi de $2,0 \times 10^7$ NMP de coliformes fecais/100 ml. Destaca-se que o parâmetro T_{90} utilizado foi de vinte cinco horas, considerando um decaimento muito conservador, ou seja, condições de sobrevivência bacteriana muito alta e 30 dias com bastante nebulosidade; sendo hipoteticamente, a situação mais crítica no Estuário.

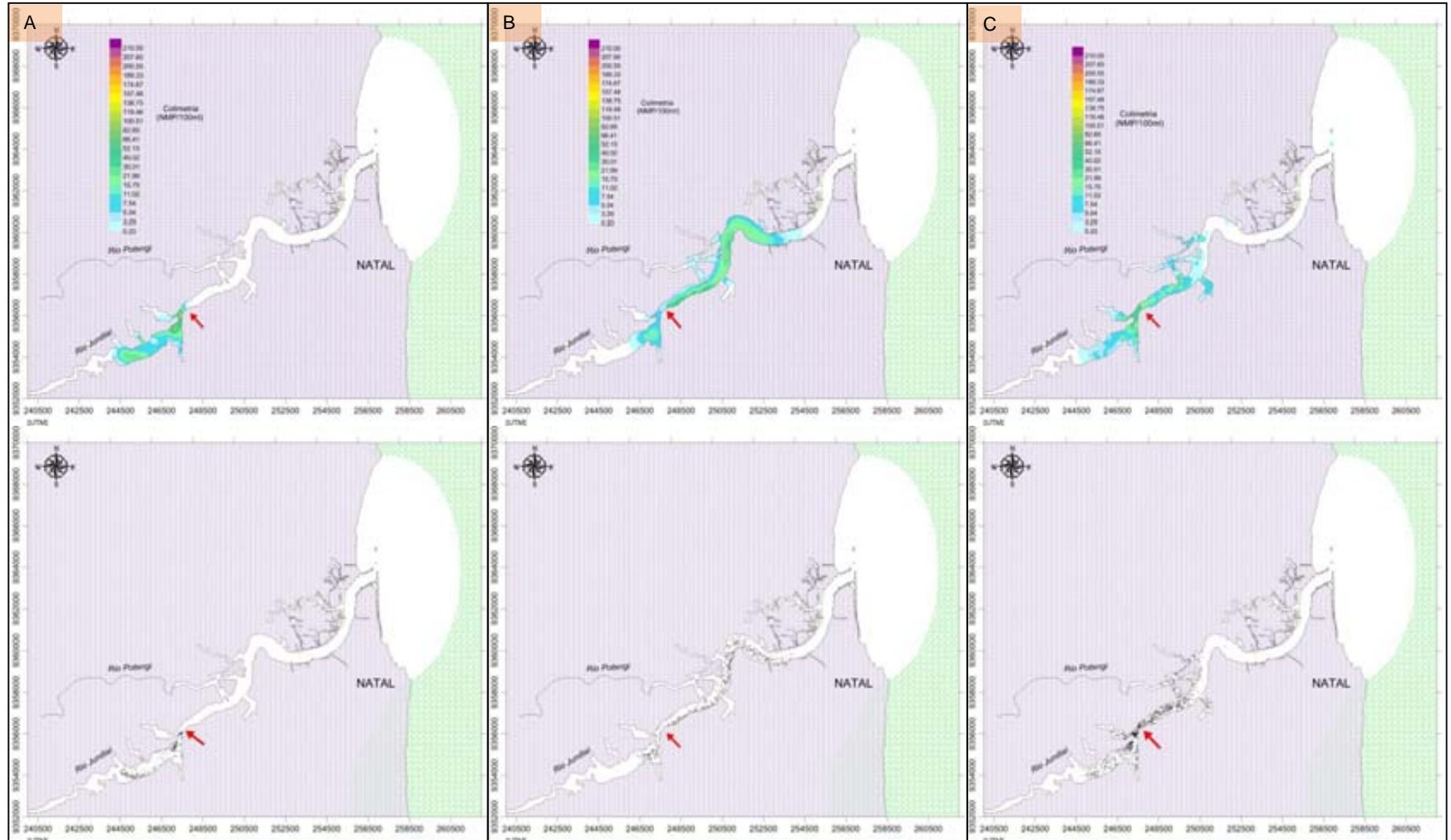


Figura 7.5: Posição das partículas e regiões de isoconcentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 2. Quadro (A) se refere ao instante das 04:00 hs do dia 06/11/2010 (6 horas após o início lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 10:00 hs do dia 06/11/2010 (12 horas após o início lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 04:00 hs do dia 07/11/2010 (30 horas após o início lançamento).

Já para o Cenário Lançamento 4, o início ocorreu às 10:00 hs do dia 06/11/2010, no instante de meia maré vazante de sizígia e terminou às 22:00 hs do dia 11/11/2010 no instante de preamar de quadratura, totalizando setenta e duas horas de lançamento intercaladas doze por doze, ou seja, seis lançamentos com duração de doze horas. A vazão lançada foi de $0,005 \text{ m}^3/\text{s}$, e a concentração foi de $2,0 \times 10^7$ NMP de coliformes fecais/100 ml. Destaca-se que o parâmetro T_{90} utilizado foi de cinco horas, considerando um decaimento pouco conservador i.e. mais realista, com condições de sobrevivência bacteriana mais baixa e 30 dias com pouca ou nenhuma nebulosidade; sendo hipoteticamente, a situação mais favorável para o Estuário.

Na Figura 7.6 é possível observar a posição das partículas e as regiões de isoconcentrações de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 3. Observa-se através do quadro (A), que sessenta horas após o início do lançamento a concentração atinge valores que vão de 16 a 101 NMP de coliformes/100ml, bem como, nota-se que algumas partículas saíram do estuário atingindo a porção norte do domínio. Decorridas cento e trinta e duas horas do início da simulação, ou seja, no final do lançamento, observa-se que a colimetria teve um considerável aumento, chegando a valores de 266 NMP de coliformes/100ml. Às 02:00 hs do dia 12/11/2010, ou seja, após quatro horas do fim do lançamento é possível notar que as concentrações de coliformes fecais ainda estão presentes na parte mais interna do estuário, com valores entre 24 a 80 NMP de coliformes fecais/100ml.

Já na Figura 7.7, com a redução do parâmetro T_{90} de vinte e cinco para cinco horas, nota-se que as concentrações do Cenário Lançamento 4 são menores que as apresentadas no Cenário Lançamento 3. Verifica-se também que decorridas sessenta horas do início do lançamento, as partículas não atingem a foz do Estuário do Rio Potengi. Após quatro horas do fim do lançamento é possível notar que as concentrações de coliformes fecais reduziram a valores entre 0,2 a 7,68 NMP de coliformes fecais/100ml.

Através dos cenários simulados foi possível observar que o parâmetro T_{90} quando utilizado de maneira mais conservadora, faz com que os coliformes se concentrem por mais tempo dentro do Estuário, de modo que quando o lançamento subsequente se processa, ainda existe um nível alto de concentração do lançamento anterior.

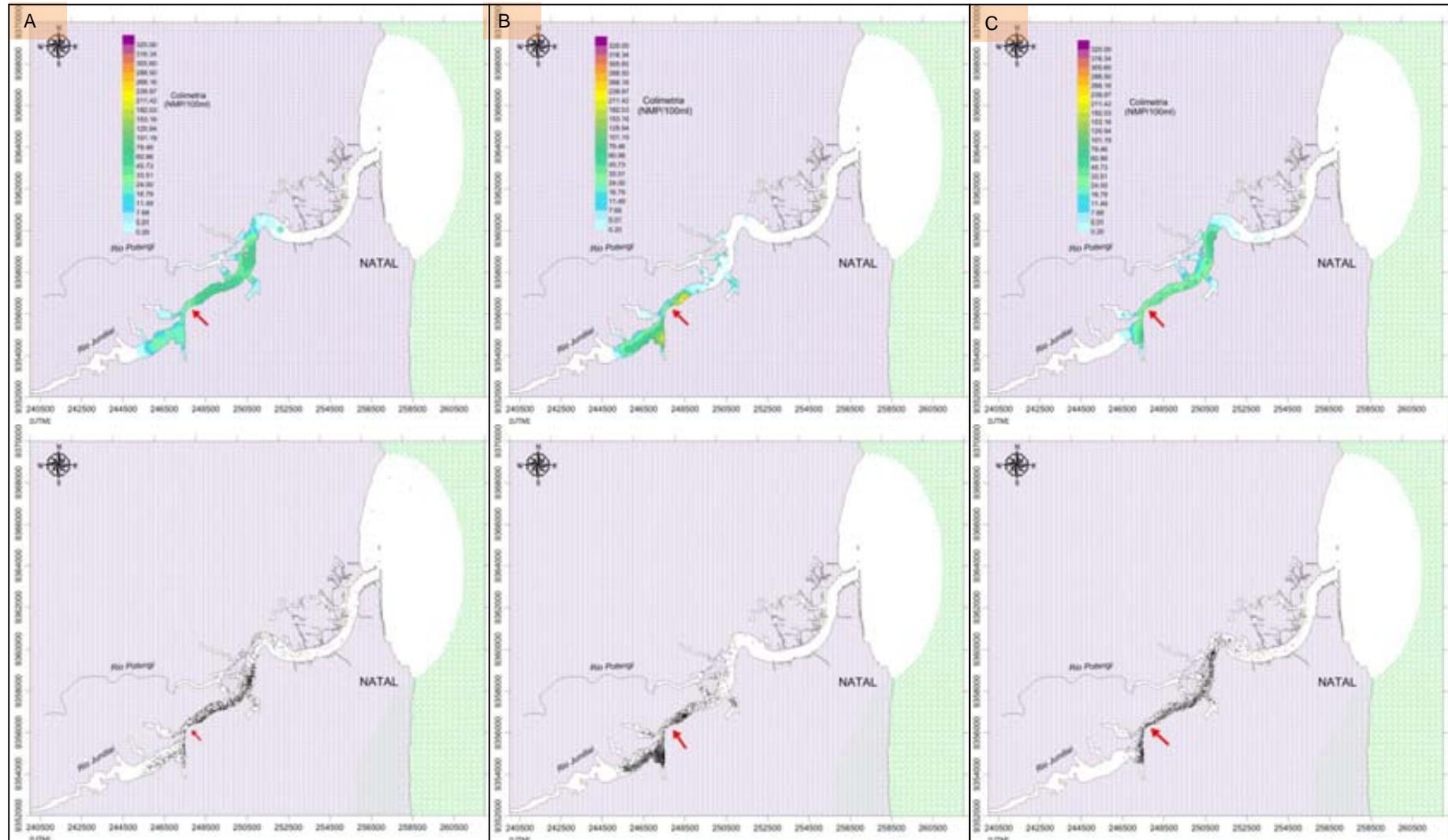


Figura 7.6: Posição das partículas e regiões de isoconcentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 3. Quadro (A) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 08/11/2010 (60 horas após o início do primeiro lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 11/11/2010 (132 horas após o início do primeiro lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 02:00 hs do dia 12/11/2010 (04 horas após o fim do último lançamento).

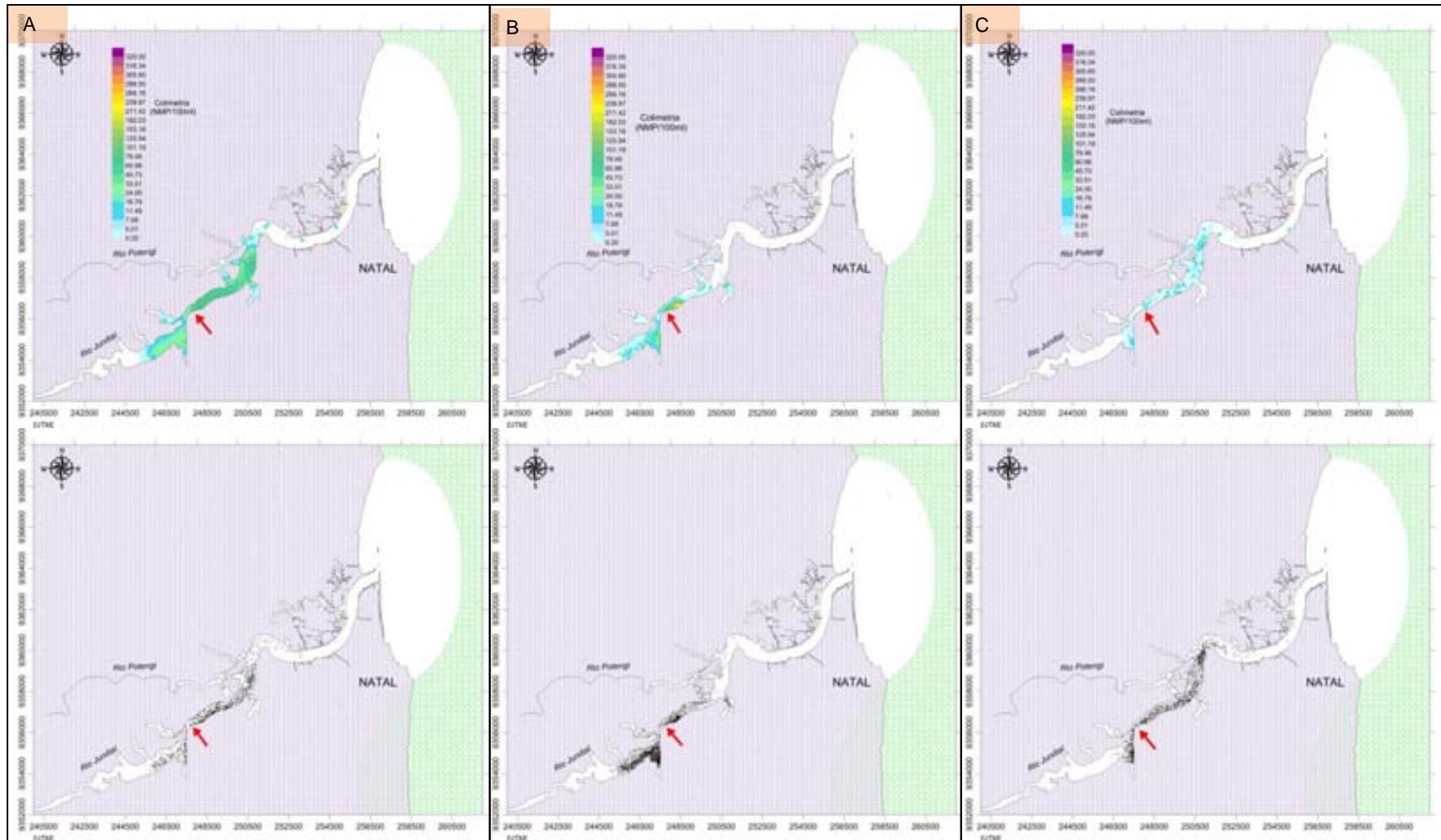


Figura 7.7: Posição das partículas e regiões de isoconcentração de coliformes fecais (NMP/100ml) obtidas numericamente através do SisBaHiA[®], para o Cenário Lançamento 4. Quadro (A) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 08/11/2010 (60 horas após o início do primeiro lançamento). Quadro (B) se refere ao instante das 22:00 hs do dia 11/11/2010 (132 horas após o início do primeiro lançamento) e quadro (C) referente ao instante das 02:00 hs do dia 12/11/2010 (04 horas após o fim do último lançamento).

CAPÍTULO 8

8.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou a influência do vento na circulação hidrodinâmica 2DH do Estuário do Rio Potengi, bem como, o Tempo de Residência das partículas e o lançamento de efluente sanitário através de uma região fonte, ambos ao longo do mês de maior e menor média do módulo de velocidade, do ano de 2010. Para isto lançou-se mão dos módulos hidrodinâmico e Lagrangeano do SisBaHiA[®].

Os resultados apresentados mostram que as simulações numéricas utilizadas tanto no módulo hidrodinâmico quanto no Lagrangeano no Estuário do Rio Potengi são adequadas e podem ser usadas de forma qualitativa. Os resultados de elevação obtidos, quando são comparados com valores previstos pela DHN, mesmo considerando que o modelo não tenha sido calibrado, mostram que o sistema apresentado é capaz de responder aos objetivos deste trabalho.

Quanto aos módulos de velocidade nos instantes de meia maré vazante, meia maré enchente, preamar e baixa-mar, dentre os meses do ano de 2010, observa-se que o Estuário apresenta intensidades de correntes mais elevadas dentre os meses de Março a Julho, mas que a partir de Agosto decrescem; tendendo a se elevar apenas em Dezembro.

No que tange a influência dos ventos quanto à mudança de direção do vetor velocidade, observa-se que a partir dos cinco graus, a frequência das diferenças é bastante reduzida; ocorrendo principalmente nos instantes de baixa intensidade de corrente, ou seja, na preamar e na baixa-mar nos ciclos de quadratura e sizígia, bem como, nas regiões de baixa profundidade, como no caso da margem esquerda do Estuário devido à presença de bancos de areia. De maneira geral, para os cenários simulados, nota-se que os ventos pouco interferem na mudança de direção do vetor velocidade.

A análise da Fatia IA serviu para mostrar, conforme parâmetros simulados, que o vento não exerce influência significativa sobre o módulo de velocidade, tão pouco sobre a elevação. De acordo com o Item 5.5, a maior diferença entre o

cenário com vento e o cenário sem vento para o módulo de velocidade é de 0,03 m/s e ocorre na Estação B, ou seja, fora do Estuário.

Através da análise do padrão espacial das correntes, Item 5.6, é possível observar que as velocidades máximas encontradas no estuário são da ordem de 1,06 m/s no ciclo de maré de sizígia e de aproximadamente 0,48 m/s no ciclo de quadratura. Também se observa que as velocidades médias promediadas na vertical são maiores em meia maré vazante e em meia maré enchente nos ciclos de sizígia e quadratura, em ambos os cenários simulados, tendendo ao quadrante NE do domínio modelado; com isto é possível observar que, caso ocorra algum evento associado à contaminação da água dentre os meses de Julho e Novembro, a dispersão de tal pluma se processará para as áreas adjacentes do quadrante NE, ou seja, praia da Redinha e praia de Santa Rita.

Quanto à análise hodográfica, para os cenários comparados, observa-se que não existe influência significativa quanto à ação do vento nas intensidades e direções das componentes U e V. Também é possível destacar que na Estação E, a direção principal do fluxo tende a se alinhar com o eixo X, ou seja, transversalmente a margem do Porto de Natal. Na Estação H, nota-se um aumento de velocidade nas componentes U e V, fato este devido ao estreitamento do Rio Jundiá que gera correntes com maior intensidade nesta região.

No que se refere ao campo de velocidades residuais, verifica-se que apesar do módulo de velocidade de Julho ser maior que o de Novembro, as diferenças das correntes residuais entre os cenários foram de apenas 0,01 m/s. Nota-se também que o campo de velocidades residuais é caracterizado por velocidades extremamente baixas e pela presença de vórtices próximos aos estreitamentos do Estuário.

Com relação ao Tempo de Residência das partículas, observa-se que o Estuário do Rio Potengi apresenta valores de TR que variam de 38 a 343 dias; sendo os dendritos e reentrâncias as regiões de maior estagnação, que conseqüentemente podem apresentar problemas relacionados à qualidade da água. Quanto aos cenários comparados, observa-se que apesar de ter a maior média do módulo de velocidade para o ano de 2010, Julho apresenta Tempos de Residência maiores que Novembro; fato que se deve a Novembro possuir elevado módulo de velocidade na meia maré vazante nos ciclos de quadratura e sizígia, levando para fora do Estuário às partículas lançadas dentro do domínio.

Quanto aos lançamentos de efluentes através de uma região fonte ocorridos com uma duração de doze e vinte e quatro horas, para as vazões de 0,05 e 0,025 m³/s e T_{90} de vinte cinco horas, verifica-se que em ambas as simulações o efluente não atingiu a foz do Estuário do Rio Potengi. Nota-se também que as regiões de isoconcentrações apresentam valores menores para o lançamento cuja vazão foi reduzida a metade (Cenário Lançamento 2), indicando que este modo de lançamento é menos impactante que o do Cenário Lançamento 1.

No que se refere aos Cenários Lançamento 3 e 4, apesar de se entender que a distribuição e a quantidade de bactérias indicadoras de contaminação fecal no ambiente marinho dependem da advecção e difusão turbulenta promovidas pelas correntes e por fatores físicos, físico-químicos e bioquímico-biológicos, as simulações dos Lançamentos 3 e 4 através do módulo de transporte lagrangeano do SisBaHiA[®] serviram para mostrar que o parâmetro T_{90} exerce muita influência sobre os níveis de concentrações de coliformes. Observa-se que o parâmetro T_{90} , quando utilizado de maneira mais conservadora, i.e., alta nebulosidade e condições de sobrevivência muito alta, a pluma do contaminante permanece por mais tempo dentro do Estuário do Rio Potengi, de modo que quando o lançamento subsequente se processa, o Estuário ainda possui um nível alto de concentração decorrente do lançamento anterior. Comparando os resultados dos Cenários, nota-se que a situação mais favorável à qualidade das águas do Estuário ocorre quando o T_{90} é utilizado de maneira mais realista.

Sugere-se, para futuros estudos, a adoção de campanhas de campo cujo objetivo seja monitorar os intervenientes físicos, i.e., vento, correntes, marés, etc, bem como, a realização de levantamentos batimétricos, a fim de calibrar o modelo hidrodinâmico do SisBaHiA[®]. Estes dados visam fornecer maiores subsídios para uma melhor compreensão a variação do nível d'água e dos padrões de correntes do estuário do Rio Potengi. Igualmente importante é a realização de programas de monitoramento da qualidade da água do Estuário do Rio Potengi, aliados a caracterização das cargas afluentes, bem como, estudos que utilizem o parâmetro T_{90} variável e lançamentos de múltiplas fontes; pois tais informações contribuirão para a gestão ambiental do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. *Computational fluid dynamics, an introduction for engineers*. Longman Group: New York, 1989. 413 p.
- ABCC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE CAMARÃO. In: *Estatísticas*. Disponível em: <<http://www.abccam.com.br/estatisticasnacionais>>. Acesso em: 10 de setembro de 2010.
- ARAÚJO, A. G. de. *Avaliação da poluição por metais pesados no estuário do rio Potengi – Natal/RN*. 2005. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2005.
- CAMPOS, E. J. D.; BUSALACCHI, A.; GARZOLI, S. L.; LUTJEHARMS, J.R.E.; MATANO, R. P.; NOBRE, P. ; OLSON, D.; PIOLA, A. R.; TANJURA, C.; WAINER, I. . Important aspects of the South Atlantic to the understanding of the global climate. In: KOBLINSKY, C. J.; SMITH, N. R. (Editores.). *Observing the oceans in the 21st Century*. Melbourne: Bureau of Meteorology, 2001, v. 1, p.453 - 472.
- CORREA, T. de L. *Impactos geoquímicos e sócio-ambientais no Estuário do Rio Potengi – região metropolitana da grande Natal / RN*. 2008.102 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2008.
- COSTA, E. C. T. de A. *Diagnóstico ambiental das águas do estuário do rio Potengi pela determinação dos índices de qualidade da água e toxidez*. 2008. 133 f. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2008.
- CUCCO, A.; UMGIESSER, G. Modeling the Venice Lagoon Residence Time. *Ecological Modelling*. v. 193, n.193, p. 34 – 51, 2005.
- CUNHA, C. de L. da N.; ROSMAN, P. C. C.; MONTEIRO, T. C. do N. Caracterização da circulação hidrodinâmica bidimensional da Baía de Sepetiba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, XIV., V, 2001, Aracajú. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa*. Aracajú: ABRH, 2001. p.1 -20.
- CUNHA, E. M. S. *Evolución actual del litoral de Natal – RN (Brasil) y sus aplicaciones a la gestión integrada*. 2004. 384 f. Tese (Doutorado em Ciência do Mar). Universidade de Barcelona, Barcelona. 2004.
- CUNHA, C. de L. da N.; ROSMAN, P. C. C. A semi-implicit finite element model for natural water bodies. *Water Research*. v.39, n.10, p.2034 – 2047, 2005.

- CUNHA, C. de L. da N.; ROSMAN, P. C. C.; FERREIRA, A. P.; MONTEIRO, T. C. do N. Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research*. v.26, n.16, p.1940–1953, 2006.
- CUNHA, C. de L. da N.; SCUDELARI, A. C.; RIBEIRO, A. A.; ROSMAN, P. C. C. Estudo preliminar do impacto ambiental pela ação de efluentes sanitários no estuário do rio Potengi, Natal/RN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX., 2011, Maceió. *Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió: ABRH, 2011. p.1 -20.
- DANTAS, A. S. *Análise de sedimento de fundo: uma amostragem representativa do estuário Potengi/RN*. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.
- DHN – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. (BRASIL). *Carta Náutica da DHN nº 810 - Proximidades do porto de Natal*. Escala 1:50000, 1ª Edição. 1972.
- DHN – DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. (BRASIL). *Carta Náutica da DHN nº 802 - porto de Natal*. Escala 1:8500, 7ª Edição. 2000.
- FEITOSA, R. C. *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável – aplicações em emissários submarinos*. 2007. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.
- FEMAR – FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR. (BRASIL). *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras – Porto de Natal nº108*. Disponível em <www.femar.com.br>. Acessado em 08/02/2010.
- FERNANDES, R. D. *Formação e evolução dos bancos de areia da foz do rio Amazonas*. 2010. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010.
- FIGUEIRÊDO, L. R. R. de. *Estudo da circulação hidrodinâmica do estuário do Rio Potengi, Natal/RN*. 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2007.
- FRAZÃO, E.P. *Caracterização hidrodinâmica e morfosedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes: Subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto*. 2003. 195 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2003.
- GÓIS, D. M. M. de. *Estudo da circulação hidrodinâmica e da dispersão de manchas de óleo na zona costeira entre Macau e Galinhos*. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2008.

- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (BRASIL). *Censo geográfico e estatístico 2010*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 23 de fevereiro de 2011.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (BRASIL). *Pesquisa nacional de saneamento básico 2008*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em: 23 de Outubro de 2010.
- IDEMA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. (RIO GRANDE DO NORTE). In: *ETE Jundiáí/Guarapes deve beneficiar 44% da população natalense com esgoto tratado*. Disponível:< http://www.idema.rn.gov.br/contentproducao/aplicacao/searh_escola/imprensa/enviados/noticia_detalhe.asp?nImprensa=0&nCodigoNoticia=27267> Acesso em: 02 de janeiro de 2011.
- IDEMA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. (RIO GRANDE DO NORTE). In: *Perfil do Estado do Rio Grande do Norte*. Disponível em <<http://www.idema.rn.gov.br>>. Acesso em 21 novembro 2010.
- LEITE, F. S. *Análise da influência do cisalhamento eólico sobre a circulação na região costeira de Guararé-RN, Brasil*. 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007.
- MARTINS, R. P.; VILELA, C. P. X.; ROSSO, T. C. de A. Hydrodynamic numeral modeling of Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brasil: a preliminary calibration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE LITTORAL, 6th., Porto, 2002. *Anais 6th International conference littoral*. Porto, 2002. p. 329 - 335.
- MEDEIROS, M. L. de. *Estudo multitemporal da dinâmica espacial do estuário Potengi/RN, utilizando como base os dados de sensoriamento remoto*. 2009. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.
- MEDEIROS, D. D. V. *Avaliação da eficiência de lagoas de estabilização no tratamento de resíduos esgotados de fossas sépticas*. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2009.
- MOURA, J. E. de. *Influência dos modelos digitais de terreno na modelagem de circulação hidrodinâmica 2DH: Um Estudo de Caso*. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.
- NASCIMENTO, M. F. do. *Estudo numérico da propagação para águas rasas de ondas geradas por embarcações*. 2007. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

- NICODEMO, S. C. T. e S. *Diagnóstico ecotoxicológico dos efluentes lançados no complexo estuarino do Jundiá/Potengi, Natal – RN*. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2010.
- ROSMAN, P. C. C. *Modeling shallow water bodies via filtering techniques*. 1987. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts. 1987.
- ROSMAN, P. C. C. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. In: SILVA, R. C. V. de (Editor). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 229 – 343.
- ROSMAN, P. C. C.; FEITOSA, R. C. Modelagem computacional do lançamento conjunto dos efluentes dos emissários submarinos de esgotos da barra da Tijuca, Ipanema e Icaraí (Rio De Janeiro). In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, II., 2006, Rio Grande. *Anais II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. Rio Grande, 2006. p. 1 – 11.
- ROSMAN, P. C. C. *Modelagem da circulação e qualidade das águas nos reservatórios de Furnas e Três Marias – MG, para planejamento de aquíicultura*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC; 2007 Maio. PENO – 8931.
- ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBaHiA*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2010. 241p.
- ROSSO, T.C. de A.; ROSMAN, P. C. C. Modelo hidrodinâmico para as baías de ilha grande e Sepetiba, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XI., 1995, Recife. *Anais XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Recife: ABRH, 1995. p. 361 - 365.
- RESIO, D. T.; VINCENT, C. L. Estimation of winds over the great lakes. *Journal of Waterways, Harbors and Coastal*, ASCE. v. 102, p. 263 – 282, 1977.
- RIBEIRO, A. A.; CUNHA, C. de L. da N.; SCUDELARI, A. C.; ROSMAN, P. C. C. Caracterização preliminar do tempo de residência no estuário do rio Potengi, Natal, RN. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX., 2011, Maceió. *Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió: ABRH, 2011. p.1 -20.
- SERHID – SECRETARIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO RN. (RIO GRANDE DO NORTE). *Mapa das Bacias hidrográficas do RN*. Disponível em <<http://www.serhid.rn.gov.br/consulta/cBacia.asp>>. Acesso em: 15/03/2010
- STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R.G. Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20 °S. *Oceanographic Research*. v. 37, n.12, p.1875 - 1886, 1990.

- SOUZA, F. E. S.; SILVA, C. A. R. Ecological and economic valuation of the Potengi estuary mangrove wetlands (NE, Brazil) using ancillary spatial data. *Journal of Coastal Conservation*. v. 15, n.1, p.195 – 206, 2011.
- SOUZA, E. M. S. V. de. *Os métodos de cálculo do transporte litorâneo e suas aplicações ao litoral de Natal – RN*. 1980. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1980.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. – *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper Collins Publishers. 1987. 644 p.
- WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: A synthesis. *Journal Marine Geology*. v.56,n.1 - 4, p. 93 – 118, 1984.