

**ANÁLISES DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DE ÁGUA NO
SISTEMA ESTUARINO DO RIO PARAÍBA DO NORTE, PB**

Larissa Maia Dantas da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Oceânica,
COPPE, da Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Oceânica

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Junho de 2019

ANÁLISES DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DE ÁGUA NO
SISTEMA ESTUARINO DO RIO PARAÍBA DO NORTE, PB

Larissa Maia Dantas da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

Prof. Júlio Cesar de Faria Alvim Wasserman, D.Sc.

Dra. Lidiane dos Santos Lima, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2019

Silva, Larissa Maia Dantas da

Análise de Circulação Hidrodinâmica e de Qualidade de Água no Sistema Estuarino do Rio Paraíba do Norte, PB/
Larissa Maia Dantas da Silva. - Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 132 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Oceânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 111-116.

1. Estuário do Rio Paraíba do Norte. 2. Modelagem Hidrodinâmica Ambiental. 3. Modelagem de Qualidade de Água. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelos bons exemplos.

À minha mãe, que nunca mediu esforços em apoiar meus sonhos e me ajudar a realizá-los.

À minha avó e ao meu irmão, pelo afeto e carinho, que mesmo longe, se fazem presentes diariamente.

À Gabriele, pela parceria e amizade do início ao fim desse ciclo. Que venham os próximos!

Aos meus amigos da Engenharia Costeira, que contribuíram tanto academicamente, como espiritualmente, sempre dando ao nosso dia-a-dia leveza e alegria.

À Marise, pelos cuidados diários e por sempre torcer pelo nosso sucesso.

Ao professor e orientador Paulo Rosman, por transmitir conhecimento com louvor e exercer a profissão com excelência, sempre disposto a transformar nosso trabalho e a busca por conhecimento em um hobby.

À Patrícia, pela disposição e ajuda com os detalhes do SisBaHiA®.

À Lidiane Lima, pelas ideias, contribuições e ajuda na utilização do modelo SWAT.

À SUDEMA por disponibilizar os relatórios de monitoramento da qualidade da água utilizados neste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

**ANÁLISES DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DE ÁGUA NO
SISTEMA ESTUARINO DO RIO PARAÍBA DO NORTE, PB**

Larissa Maia Dantas da Silva

Junho/2019

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

Sistemas estuarinos são ambientes dinâmicos que estão sob constante influência antrópica. Os usos das suas margens são potenciais poluidores quando em desacordo com os padrões de qualidade. As condições climáticas, hidro biológicas e geográficas fazem o estuário do rio Paraíba do Norte e a região Nordeste se destacarem quanto ao desenvolvimento industrial nas suas margens, sendo a criação de camarões em cativeiros a atividade com maior destaque. Por tal motivo, o estudo propõe, com auxílio de modelagem computacional, estudar como um sistema estuarino que possui margens divididas entre manguezais e empreendimentos de carcinicultura reage, em termos de qualidade de água, às pressões a que está exposto. Para isso fez-se o uso dos modelos do SisBaHiA®, onde foram envolvidos estudos dos padrões de circulação hidrodinâmica, dos processos de alagamento e secamento de manguezais, e do alcance e da influência da despesca nos parâmetros de OD e DBO. As simulações consideraram cenários com variabilidade sazonal e distintas cargas de efluentes, permitindo uma análise comparativa do comportamento do estuário. A circulação do estuário é dominada pelas marés e suas correntes são mais intensas durante o período de vazante, devido a influência das planícies de maré. Quanto à sazonalidade, os resultados mostram que em períodos de cheia, as condições de OD e DBO do estuário são mais afetadas, visto que a carga dos rios chegando ao estuário é elevada. Durante as secas, os efluentes da despesca tendem a ficar aprisionados no estuário, enquanto que nas cheias permanecem também na região costeira. Espacialmente, regiões com menor circulação, como as praias e os rios Mandacaru, Tambiá e Sanhauá, apresentaram menores concentrações de OD e maiores de DBO, devido a sua reduzida taxa de renovação. Por fim, a despesca da carcinicultura, mesmo em condições críticas, não produz impacto significativo nas condições de OD e DBO, quando comparado ao do aporte fluvial.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HYDRODYNAMIC AND WATER QUALITY ANALYSIS ON THE PARAIBA DO NORTE RIVER ESTUARINE SYSTEM, PB

Larissa Maia Dantas da Silva

June/2019

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

Estuarine systems are dynamic environments that are under constant anthropic influence. The uses of its margins are potential polluters when in disagreement with quality standards. The climatic, hydro biological and geographical conditions make the Paraíba do Norte river estuary and the Northeast of Brazil stand out as to the industrial development in its margins, being the growth of shrimp in captivity the most important activity. For this reason, this study proposes, using computational modeling, to understand how an estuarine system that has a split margin between mangroves and shrimp farms reacts, in terms of water quality, to the pressures to which it is exposed. In order to do this, the models of the SisBaHiA® were used, where studies of hydrodynamic circulation patterns, mangrove flooding and drying processes, and the influence of the harvesting on OD and BOD parameters. By simulating scenarios with seasonal variability and different effluent loads, it was possible to analyze in a comparative way the behavior of the estuary. The circulation of the estuary is dominated by the tides and its currents are more intense during the ebb period, due to the influence of the tide plains. The temporal results showed that during the river flood time, the OD and BOD conditions of the estuary are more affected, since the load of these parameters reaching the estuary is high. During droughts, effluents tend to be trapped in the estuary, while in floods it also remains in the coastal region. Spatially, regions with smaller flows, such as the coastal areas and the Mandacaru, Tambiá and Sanhauá Rivers, have lower concentrations of OD and higher BOD, due to the reduced rate of renewal of these sites. Finally, shrimp farming, even under extreme conditions, does not have an impact on OD and BOD conditions comparable to river inputs.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	CONCEITOS SOBRE SISTEMAS ESTUARINOS.....	4
2.2	ÁREA DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	7
2.3	QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS ESTUARINOS	11
2.4	CARCINICULTURA: ASPECTOS TÉCNICOS, LEGISLATIVOS AMBIENTAIS	14
2.5	SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL – SisBaHiA®	19
2.5.1	MODELO HIDRODINÂMICO	19
2.5.2	MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO	24
2.5.3	MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO.....	25
2.5.4	MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA.....	27
2.6	SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT	32
3.1.1	MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO	32
3.1.2	MAPAS DE USO, OCUPAÇÃO E PEDOLÓGICO DO SOLO.....	34
3.1.3	DADOS METEOROLÓGICOS.....	37
3.2	SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL – SisBaHiA®	37
3.2.1	MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO	37
3.2.1.1	DOMÍNIO DE MODELAGEM	37
3.2.1.2	BATIMETRIA.....	39
3.2.1.3	RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO	41
3.2.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	44
3.2.2.1	CENÁRIOS DE MODELAGEM	44
3.2.2.2	DADOS OCEANOGRÁFICOS	44
3.2.3	MODELAGEM DE TRANSPORTE EULERIANA	54
3.2.3.1	TAXA DE RENOVAÇÃO	55
3.2.3.2	IDADE DA ÁGUA.....	56
3.2.4	MODELAGEM DE TRANSPORTE LAGRANGEANA	58

3.2.5	MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1	ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA MARÉ E ZONAS DE ALAGAMENTO E SECAMENTO.....	64
4.2	ANÁLISE HIDRODINÂMICA.....	69
4.3	ANÁLISE DE ASPECTOS DE QUALIDADE DA ÁGUA NO ERPN	88
4.3.1	TAXA DE RENOVAÇÃO	89
4.3.2	IDADE DA ÁGUA.....	93
4.3.3	ANÁLISE DO DESTINO DOS EFLUENTES DA CARCINICULTURA	94
4.3.4	ANÁLISE DA INTRUSÃO SALINA.....	101
4.3.5	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE OD E DBO	102
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	ANEXO I.....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Manguezais no entorno do estuário do rio Paraíba do Norte (ARAÚJO, 2014).....	9
Figura 2. Imagens aéreas da praia de Miramar, com foco no guia-correntes localizado na margem direito do estuário do rio Paraíba do Norte (PARAÍBA CRIATIVA, 2005)	10
Figura 3. Imagem aérea do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha, nas adjacências da foz do estuário do rio Paraíba do Norte (PARAÍBA CRIATIVA, 2005).....	10
Figura 4. Vista aérea da pluma de efluente da carcinicultura sendo descartada no rio da Ribeira (GOOGLE EARTH, 2019).....	16
Figura 5. Esquema dos Métodos Poroso-Rugoso – MPR e em Meio Poroso – MMP. A espessura da camada equivalente está exagerada para permitir melhor visualização (ROSMAN, 2019).	23
Figura 6. Representação esquemática do ciclo hidrológico (adaptado de NEITSCH et al., 2011).	31
Figura 7. Modelo digital do terreno do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte.....	33
Figura 8. Rede de drenagem gerada no Baixo Curso do Rio Paraíba do Norte. Vê-se a malha de elementos finitos no trecho estuarino e zona costeira adjacente que são modeladas em detalhes com o SisBaHiA. O triângulo vermelho indica a estação utilizada para calibração.	33
Figura 9. Identificação das 84 sub-bacias admitidas no modelo do ERPN.....	34
Figura 10. Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte. Nota-se os diferentes usos nas margens do estuário.....	35
Figura 11. Mapa Pedológico do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte. Nota-se a impermeabilização do solo na margem direta do estuário.	36
Figura 12. Malha de elementos finitos utilizada na discretização do domínio de modelagem. O contorno paralelo a praia delimita a região do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha. Os empreendimentos de carcinicultura estão representados de verde e com a respectiva nomenclatura adotada para este trabalho. Coordenadas UTM WGS84 setor 25M.....	39
Figura 13. Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré (METHA, 1976 apud Pinto, 1999).	40
Figura 14. Batimetria do domínio de modelagem, referenciada à Carta Náutica 830 da DHN.	41

Figura 15. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, ε . Tabela extraída da Ref. Técnica do SisBaHiA®, v. ROSMAN (2019), adaptado de ABBOTT e BASCO (1989).....	42
Figura 16. Amplitude da rugosidade equivalente de fundo do estuário do rio Paraíba do Norte utilizada no domínio de modelagem. Os manguezais e os recifes de corais apresentam rugosidade elevada.....	43
Figura 17. Comparação entre a previsão de maré e os níveis de água calculados pelo modelo hidrodinâmico no cais do Porto de Cabedelo para o mês de março (01/03 a 31/03/2017)	46
Figura 18. Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico ERA-Interim do ECMWF, nos quais foram extraídas as séries temporais de ventos utilizadas como forçantes atmosféricas para o modelo hidrodinâmico.....	47
Figura 19. Rosa dos ventos para as Estações 1, 2, 4 e 5, para o período de 365 dias (01/01/2017 a 31/12/2017) com informações sobre direção, intensidade e frequência de ocorrência de ambos.	48
Figura 20. Dados de ventos representativos do mês de março de 2017, obtidos com dados da Estação 1. As setas e os padrões de cores são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.....	49
Figura 21. Dados de ventos representativos do mês de novembro de 2017, obtidos com dados da Estação 1. As setas e os padrões de cores são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.....	50
Figura 22. Localização no domínio do SisBaHiA® dos pontos que recebem o aporte de água calculado pelo modelo SWAT.....	51
Figura 23. Séries de vazões observadas e calibradas para o período de 2004 a 2007. As demarcações em laranja representam os períodos de cheia fluvial e os demarcados em preto, as secas fluviais.....	52
Figura 24. Séries de vazões observadas e validadas para o período de 2008 a 2011. As demarcações em laranja representam os períodos de cheia fluvial e os demarcados em preto, as secas fluviais.....	53
Figura 25. Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para o cálculo da Taxa de Renovação.....	56
Figura 26. Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Idade da Água.....	57

Figura 27. Localização das estações de monitoramento de qualidade de água da SUDEMA no ERPN.....	61
Figura 28. Séries temporais de elevação (m) ao longo de dois ciclos de maré em três estações ao longo do ERPN, sendo elas: Estações ‘Rio Paraíba’, ‘Saída Rio Mandacaru’ e ‘Embocadura’.....	64
Figura 29. Análise das Constantes Harmônicas M2, S2, N2, 01, K1, L2 em 5 estações ao longo do estuário.....	65
Figura 30. Séries temporais de elevação (m) e velocidade (m/s) durante dois ciclos de sizígia. O gráfico caracteriza a onda de maré estacionária atuando no ERPN nas Estações ‘Embocadura’, ‘Sul Ilha da Restinga’, ‘Saída do Rio Sanhauá’ e ‘Rio Paraíba’.....	66
Figura 31. Isolinhas de elevação (m) na PM de sizígia (à esquerda) e quadratura (à direita) durante o Cenário Representativo de Cheia. Nota-se que o alagamento das áreas de manguezais só ocorre durante a PM.....	67
Figura 32. Isolinhas de elevação (m) na BM de sizígia (à esquerda) e quadratura (à direita) durante o Cenário Representativo de Cheia. Nota-se que as áreas de mangue se encontram secas em ambos os períodos.....	68
Figura 33. Variação da elevação no Mangue à oeste do rio Tambiá. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.....	68
Figura 34. Variação da elevação no Mangue do Rio da Guia. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.....	69
Figura 35. Variação da elevação no Mangue da Ilha Tiriri. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.....	69
Figura 36. Variação da elevação no Mangue da Ilha da Restinga. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.....	69
Figura 37. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m ³ /s) durante a PM de sizígia do CNC.....	71
Figura 38. Detalhe de circulação hidrodinâmica na região norte do ERPN em PM de sizígia. Nas zonas dos manguezais as correntes mais fortes restringem-se aos canais e ficam muito fracas sobre as planícies de mangue.....	72

Figura 39. Padrão de circulação hidrodinâmica em um instante de PM de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se a presença de pequenas correntes nos manguezais alagados, com maior intensidade restrita aos canais.....	72
Figura 40. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) durante a MMV de sizígia do CNC.....	73
Figura 41. Padrão de circulação hidrodinâmica na MMV de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que, apesar das maiores velocidades nos canais principais, o nível médio da água nesse instante não alaga os manguezais, sendo suas vazões nulas. Isso ocorre também devido ao momento de vazante do estuário, que tende a secar as áreas alagáveis e a transportar a água pelos canais.....	74
Figura 42. Padrão de circulação hidrodinâmica na MMV de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que, nesse instante, a vazante na região sul ocasiona o secamento dos manguezais e consequentemente menores vazões associadas a eles.	74
Figura 43. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de sizígia do CNC.	75
Figura 44. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se novamente a influência da vazante nas velocidades mais altas dos canais principais. As baixa mares de sizígia não são capazes de alagar os manguezais.	76
Figura 45. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região sul do ERPN. ...	76
Figura 46. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de sizígia do CNC.	77
Figura 47. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que a velocidade é nula nos mangues.	78
Figura 48. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que a velocidade é nula nos mangues.	78
Figura 49. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em PM de quadratura do CNC. Nota-se a fraca intensidade das correntes nas praias adjacentes ao ERPN.....	79
Figura 50. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se a baixa intensidade das correntes durante a PM em todo o domínio, não ultrapassando 0,5 m/s nos canais principais. As PM de quadratura não desenvolvem elevações capazes de alagar toda a extensão dos manguezais.	80

Figura 51. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se a baixa intensidade das correntes durante a PM em todo o domínio, não ultrapassando 0,5 m/s nos canais principais. As PM de quadratura não desenvolvem elevações capazes de alagar toda a extensão dos manguezais.	80
Figura 52. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MMV de quadratura do CNC.....	81
Figura 53. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região norte do ERPN.....	82
Figura 54. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN.	82
Figura 55. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de quadratura do CNC.....	83
Figura 56. Padrão de circulação hidrodinâmica BM de quadratura na região norte do ERPN.84	84
Figura 57. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de quadratura na região sul do ERPN.	84
Figura 58. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de quadratura do CNC. É notável as baixas correntes nas praias do município de Lucena, a noroeste da embocadura.	85
Figura 59. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região norte do ERPN.....	86
Figura 60. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região sul do ERPN.	86
Figura 61. Velocidade em m/s do escoamento residual durante 1 ciclo de maré de sizígia, referente ao dia 28/03/2017, no CNC.....	87
Figura 62. Velocidade em m/s do escoamento residual durante 1 ciclo de maré de quadratura, referente ao dia 21/03/2017, no CNC.....	88
Figura 63. Taxa de Renovação após 1 dia de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).	90
Figura 64. Taxa de Renovação após 7 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).	90
Figura 65. Taxa de Renovação após 15 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).	91

Figura 66. Taxa de Renovação após 30 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).	91
Figura 67. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas próximas ao descarte de efluentes de despesca, durante um período de 92 dias do CNC.	92
Figura 68. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas próximas ao descarte de efluentes de despesca, durante um período de 92 dias do CNS.....	92
Figura 69. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas em áreas de manguezais durante um período de 92 dias do CNC.....	93
Figura 70. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas em áreas de manguezais durante um período de 92 dias do CNS.....	93
Figura 71. Mapa de isolinhas de Idade da Água no final da simulação de ambos os Cenários de Cheia e de Seca respectivamente.....	94
Figura 72. Comparação da persistência de passagem de plumas de todas as fazendas inseridas no modelo durante os 92 dias de simulação de cenário de cheia (CNC) à esquerda e de seca (CNS) na direita respectivamente.....	96
Figura 73. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda A durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	97
Figura 74. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda B durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	97
Figura 75. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda C durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	98
Figura 76. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda D durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	98
Figura 77. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda E durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	99
Figura 78. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda F durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	99
Figura 79. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda G durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	100
Figura 80. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda H durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.	100

Figura 81. Comparação entre os momentos de máxima salinidade observados no Cenário de Cheia (à esquerda) e no Cenário de Seca (à direita). A linha vermelha representa o limite entre águas salinas e salobras.	101
Figura 82. Comparação entre os momentos de mínima salinidade observados no Cenário de Cheia (à esquerda) e no Cenário de Seca (à direita). A linha vermelha representa o limite entre águas salinas e salobras.	102
Figura 83. Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários I e IV. Ambos representam a simulação sem o descarte do efluente da despesca. .	104
Figura 84. Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários II e V. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de OD em 5mg/l.....	104
Figura 85.Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários III e VI. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de OD de 3mg/l.....	105
Figura 86. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários I e IV. Ambos representam a simulação sem o descarte do efluente da despesca ..	106
Figura 87. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários II e V. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de DBO em 30 mg/l.....	106
Figura 88. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários III e VI. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de DBO em 200 mg/l.....	107
Figura A. 1. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m ³ /s) em PM de sizígia do CNS.	117
Figura A. 2. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se a presença de pequenas velocidades apenas em parte dos manguezais, devido a ocorrência conjunta de maiores elevações com o momento de enchente.....	118
Figura A. 3. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que os manguezais apresentam velocidades baixas ou nulas, por estarem secos.	118
Figura A. 4. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m ³ /s) em MMV de sizígia do CNS. No instante de MMV, as regiões dos manguezais encontram-se secos, não havendo correntes no local. Nota-se que as	

praias adjacentes à embocadura possuem baixas velocidades, por estarem protegidas pela formação de corais.....	119
Figura A. 5. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se maior intensidade das correntes nos canais principais do estuário devido às características da onda de maré.	120
Figura A. 6. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de sizígia na região sul do ERPN. As velocidades são nulas na maior parte dos manguezais, enquanto que os rios possuem velocidades mais altas.	120
Figura A. 7. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de sizígia do CNS. Nota-se a fraca intensidade das correntes costeiras nas praias adjacentes à embocadura do estuário, agindo o PEMAV como proteção costeira, causando a quebra das ondas ao largo.....	121
Figura A. 8. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que durante a BM, as velocidades são nulas tanto nos mangues, como em parte do próprio estuário, devido às baixas elevações característica da BM.....	122
Figura A. 9. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região sul do ERPN.	122
Figura A. 10. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de sizígia do CNS.	123
Figura A. 11. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região norte do ERPN.	124
Figura A. 12. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região sul do ERPN.	124
Figura A. 13. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em PM de quadratura do CNS.	125
Figura A. 14. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio da Guia e em seus contribuintes.	126
Figura A. 15. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio Sanhauá, Tambiá e Mandacaru.....	126
Figura A. 16. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MMV de quadratura do CNS.	127
Figura A. 17. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região norte do ERPN.	128

Figura A. 18. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN.....	128
Figura A. 19. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de quadratura do CNS.....	129
Figura A. 20. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio da Guia e em seus contribuintes.	130
Figura A. 21. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio Sanhauá, Tambiá e Mandacaru.	130
Figura A. 22. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de quadratura do CNS.	131
Figura A. 23. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região norte do ERPN.....	132
Figura A. 24. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região sul do ERPN.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos Corpos de Água segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes (CONAMA, 2005)	12
Tabela 2. Padrões e condições mínimas de qualidade para Águas Salobras Classe I conforme (CONAMA, 2005).....	14
Tabela 3. Padrões de qualidade de água para efluentes gerados por empreendimentos de aquicultura (GAA, 2017).....	18
Tabela 4. Correlação dos tipos de solo da FAO com os solos disponibilizados na plataforma INDE.....	35
Tabela 5. Localização das estações pluviométricas da ANA utilizadas para inserir os dados de precipitação no modelo SWAT.	37
Tabela 6. Tabela de constantes harmônicas da FEMAR, ordenadas por amplitude decrescente, da estação Porto de Cabedelo, e seus respectivos valores de amplitude e fase.....	45
Tabela 7. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslihim (2016) para o RSR, referente ao período de calibração e validação.	54
Tabela 8. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslihim (2016) para o NSE, referente ao período de calibração e validação.	54
Tabela 9. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslihim (2016) para o PBIAS, referente ao período de calibração e validação	54
Tabela 10. Valores medianos de concentração de OD, DBO, Temperatura e Salinidade calculados para os modelos de qualidade de água de cheia e seca.....	60
Tabela 11. Concentrações de OD e DBO em ambas as simulações inseridas no modelo.....	62
Tabela 12. Cenários adotados para analisar as concentrações de OD e DBO no Modelo de Qualidade de Água.	63
Tabela 13. Valores da distorção vertical de maré para 5 Estações ao longo do ERPN, conforme critérios de Friedrichs e Aubrey (1988) e de Pugh (1987).	65

1 INTRODUÇÃO

Dois terços da população mundial habitam em zonas costeiras, tal fato decorre dos inúmeros benefícios que essa localização propicia, dentre eles servir de base para utilização dos recursos marinhos, posicionamento estratégico para circulação intercontinental, espaço de lazer, rápida renovação de suas águas, entre outros (MORAES, 2007).

Tendo em vista que processos de colonização, na maioria das vezes, iniciaram-se a partir da costa, a ocupação não estruturada destas áreas causou e ainda causa impactos na dinâmica comportamental das zonas costeiras. Sabe-se também que tais áreas litorâneas constituem um espaço reduzido quando comparada as demais áreas do globo, tornando determinados locais urbanamente saturados.

A Lei 7.661 de 1988 que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro - PNGC define zona costeira como “o espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre” (BRASIL, 1988).

O PNGC não determina distâncias fixas para definir a zona costeira, pois acredita que cada região possui características particulares. Porém o Plano considera que, no caso de planícies costeiras muito extensas, o limite externo da faixa terrestre será o ponto até onde se faz sentir a influência do mar, observada pela intrusão da salinidade nos rios ou pela variação do nível das águas, pelo efeito das marés (BRASIL, 1990).

As regiões estuarinas são consideradas ambientes costeiros inseridos em uma região de transição com a bacia hidrográfica, estando assim sob a influência de águas fluviais e oceânicas, o que os torna ambientes aquáticos complexos e frágeis.

O Estuário do Rio Paraíba do Norte - ERPN, localizado no estado da Paraíba, está inserido em uma área urbana em contínuo crescimento, onde diversas atividades econômicas são exercidas, como o ecoturismo, a carcinicultura e atividades portuárias, enquadrando-se, portanto, na problemática desses ambientes.

De acordo com dados da AAGISA (2003 *apud* CBH/PB, 2004), a poluição hídrica na bacia é maior quando em áreas com maior concentração de população. Assim, as regiões costeiras e estuarinas encontram-se mais exposta aos impactos causados pela poluição, o que reflete principalmente na degradação dos manguezais. A AAGISA classificou as principais fontes poluidoras no Baixo Curso do Rio Paraíba, dentre elas, nos rios Sanhauá e Mandacaru a

poluição advinda de esgotos domésticos é mais acentuada, enquanto que no rio Cabocó e demais, há grande presença de poluição por agrotóxicos, oriunda da agricultura.

A água do estuário do rio Paraíba do Norte está sob influência direta dos usos que ocorrem em suas margens e dos seus afluentes. Por estarem inseridos em regiões urbanas e sob constante atividade industrial, os rios recebem elevadas cargas orgânicas. Dentre as fontes presentes na região, têm-se o efluente gerado pelo polo de tratamento de esgotos da Bacia do Rio Paraíba na Grande João Pessoa – ETEPB, do antigo Lixão do Roger, além daqueles provenientes da criação de camarões.

Dentre os usos outorgados pela Secretaria Extraordinária de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH, para o Baixo Curso do Rio Paraíba, em 2003 a carcinicultura correspondia a 42,7% do uso da água na região, totalizando um volume de 75.532.000 m³/ano, superando os 30% destinados ao abastecimento humano (SEMARH, 2001).

O processo de despesca, i.e., a drenagem dos viveiros para retirada dos camarões, é rico em nutrientes diversos, o que põe em risco a qualidade do corpo d’água que recebe este efluente, podendo vir a acarretar processos de eutrofização e sedimentação.

Utilizar modelos computacionais para simular tais ambientes costeiros é uma metodologia que permite a obtenção de resultados coerentes à realidade local. Além de simular a complexidade de um sistema estuarino quanto as forças que atuam nele, conhecer as condições hidrodinâmicas é também a base para a aplicação de outros modelos, como modelos de transporte euleriano, lagrangeano e de qualidade de água, aplicados no presente trabalho.

Assim, gerenciar adequadamente os recursos hídricos de uma região demanda conhecimento quantitativo e qualitativo destes. Muitas vezes tais conhecimentos não existem devido à escassez de dados ambientais na região. A possibilidade de interpolar e extrapolar dados por meio de modelagem computacional é um benefício para a gestão hídrica e costeira.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é caracterizar, por meio de modelagem computacional, o ambiente estuarino do rio Paraíba do Norte, com foco na circulação hidrodinâmica e na qualidade da água.

Para tal, é necessário um estudo de modelagem computacional com os seguintes objetivos específicos:

- Gerar condições de contorno a partir de uma modelagem hidrológica de médio prazo do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Norte;
- Analisar os padrões de circulação hidrodinâmica em cenários com sazonalidades distintas, bem como os processos de alagamento e secamento dos manguezais;
- Analisar a Taxa de Renovação e a Idade da Água em diferentes regiões do sistema estuarino;
- Identificar fontes de lançamento de efluentes da carcinicultura e simular processos hipotéticos de despescas no domínio, mostrando o alcance das plumas em diferentes cenários; e
- Avaliar e comparar, com um modelo de qualidade de água, as variações de concentrações de OD e DBO sob diferentes cenários que recebem ou não efluentes de carcinicultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordados os conceitos gerais sobre a dinâmica e qualidade de sistemas estuarinos, sobre os aspectos da atividade da carcinicultura, as características do ERPN, como também uma breve descrição matemática dos modelos utilizados no desenvolvimento do trabalho.

2.1 CONCEITOS SOBRE SISTEMAS ESTUARINOS

Diversos autores definem os sistemas estuarinos sob diferentes pontos de vista, sendo pela hidrologia, oceanografia ou engenharia, o seu conceito geral, envolvendo sua dinâmica essencial foi exposto por Cameron e Pritchard (1963). Os referidos autores conceituaram o estuário como um corpo d'água costeiro semi-confinado, que possui livre conexão com o mar, em que o processo de diluição da água do mar quando em contato com as águas continentais é mensurável. Dyer (1997) baseado no conceito proposto por Cameron e Pritchard, acrescenta que os estuários se estendem rio acima até o limite de influência da maré.

Esta região exposta por Dyer é denominada Limite de Influência de Maré - LIM, e representa o local em que não haverá mais influência da propagação da maré. Nela, a direção do escoamento é sempre estuário abaixo, isto é, vazante. Em estuários com relevo mais plano, o limite de influência de maré pode ocorrer a centenas de quilômetros a montante da embocadura, enquanto em regiões com relevo mais acentuado, o LIM se apresenta mais próximo a praia.

Outra região característica dos estuários, que antecede o LIM, é aquela em que não se observa mais inversão das correntes. Acima desta área há apenas fluxos de vazante, enquanto que abaixo, há correntes de vazante e de enchente, sendo o fluxo de vazante maior que o de enchente. Este local representa o Limite de Inversão de Correntes – LIC (DYER, 1997).

Quanto a presença da salinidade, o Limite de Intrusão Salina - LIS é aquele onde é possível detectar concentrações de salinidade acima de 0,5 ups. Assim, o LIS representa também o início da zona de mistura, que é a região onde ocorre a mistura da água doce proveniente da drenagem continental, com a água do oceano. Neste local há uma intensa variação longitudinal e vertical de salinidade, pois ocorre a diluição da água do mar no interior do estuário (MIRANDA *et al.*, 2002).

Todos estes limites não são fixos no espaço e no tempo e sua variação pode ocorrer em diferentes escalas temporais, como mudanças devido à ação de marés astronômicas (variação

mensal), como também devido ao ciclo hidrológico (variação anual). A mudança de posição destes limites depende da intensidade das vazões fluviais, do efeito da maré e da ação do vento. Nos ciclos de maré, durante a sizígia, a zona de mistura irá sofrer migração para montante, enquanto durante a quadratura essa zona migra para jusante. Considerando o ciclo hidrológico, nos períodos do ano em que há maior volume de água sendo drenada pela bacia, a zona de mistura é movida para montante e durante as estações secas, para jusante.

A circulação nestes ambientes é gerada por forças que atuam simultaneamente sobre o corpo d'água, são elas: o gradiente de pressão devido às diferenças de níveis, o gradiente de pressão consequente das diferenças de densidade, assim como a tensão exercida pelo vento na superfície livre (ROSMAN, 1997).

As diferenças de níveis dentro e fora do sistema estuarino é, na maioria dos casos, a principal força responsável pela circulação estuarina. Essa diferença é causada pela variação do nível do mar devido às forças gravitacionais que produzem a onda de maré, como também pelas oscilações de nível no interior do estuário devido às descargas fluviais. Tais forças gravitacionais são representadas por constituintes com frequências discretas, em que a variação temporal das suas amplitudes e fases são conhecidas.

Sabe-se que a morfologia do fundo é responsável por causar distorções no crescimento dessas amplitudes e fases. Em águas rasas, a propagação da crista (preamar) é mais rápida que a do cavado (baixa-mar), o que resulta em uma elevação do nível do mar mais rápida, quando comparada a sua descida, causando distorções na forma da onda. Assim, a onda de maré sofre alterações ao se propagar do oceano para regiões com águas rasas, como regiões estuarinas. A distorção da maré à medida que se propaga do oceano aberto para os estuários pode ser representada pelo crescimento não linear de constituintes compostos e harmônicos dos principais componentes das marés astronômicas. Como a maré é uma soma de componentes senoidais a não-linearidades irá produzir harmônicos e constituintes compostos (FRIEDRICHES E AUBREY, 1988).

Essa interação de determinados constituintes com águas rasas, geram constituintes harmônicos com períodos menores que 9 horas, denominados sobre-marés, em que sua frequência é um múltiplo exato da frequência fundamental (ROSMAN, 2019).

As alterações desses constituintes quando em águas rasas podem causar diferenças na duração dos períodos de enchente e de vazante de um estuário, resultando em uma assimetria na onda

de maré. Quando as enchentes são mais rápidas que as vazantes, há uma maior energia durante a primeira, o que resulta em velocidades mais intensas, sendo assim o estuário é dito encheante dominante. Quando as vazantes são mais curtas que as enchentes, as maiores velocidades se observam durante a vazante, o que classifica o estuário como vazante dominante (FRIEDRICHES E AUBREY, 1988).

Essa distorção observa-se também em locais com presença de grandes planícies de maré, i.e., áreas mais rasas e com baixa declividade que atuam como planícies de inundação, sendo inundadas durante as marés mais altas e ficando seca nos demais momentos. Essas regiões são responsáveis por reduzir a velocidade de propagação da onda de maré, por possuírem baixas declividades e alta rugosidade quando houver a presença de vegetação (PERILLO, 1995).

Quanto à propagação da onda de maré, de acordo com Dyer (1997) os estuários podem ser classificados por possuir onda de maré estacionária, onda de maré progressiva ou onda de maré mista.

A onda de maré é dita estacionária quando não há atrito e a onda viaja estuário adentro, onde é refletida e retorna para o oceano. Se o tempo que a onda leva para viajar pelo estuário e retornar para sua embocadura for igual ao período da maré, essa onda irá interagir com a próxima onda de maré que entra pelo estuário, e assim, desenvolve-se uma onda estacionária. As máximas velocidades são encontradas na meia maré encheante e na meia maré vazante, enquanto os momentos de estagnação ocorrem durante as preamarés e baixa-mares (DYER, 1997).

A onda de maré progressiva ocorre quando sua energia é completamente dissipada pelo atrito antes da reflexão. Ao contrário da onda estacionária, as correntes máximas ocorrem durante as preamarés e a baixa-mares. Desta forma, a estofa de encheante e de vazante estão defasadas em 90 graus da preamar e da baixa-mar, ou seja, as velocidades mínimas das estofas ocorrem nos níveis médios de maré. Por outro lado, as máximas velocidades de encheante e de vazante, ocorrem respectivamente nas preamarés e baixa-mares (DYER, 1997).

A onda de maré mista é uma composição de ondas progressivas e estacionárias. Em estuários, a amplitude onda de maré tende a aumentar rio acima, no entanto, com a dissipação da energia por atrito ou pela reflexão da onda, esta amplitude tende a diminuir. Assim, a onda mista é resultado da propagação destes dois tipos de ondas, que apresentam comportamento próximo a de uma onda estacionária só que com a crista e/ou cava deslocada no tempo angular (DYER, 1997).

Do ponto de vista sedimentológico, um estuário recebe sedimentos de diferentes fontes, que podem ser advindos do mar e de rios afluentes, da erosão eólica de dunas, de bancos sob efeito de alagamento, da decomposição de alguns organismos, ou até de fontes antrópicas, como da descarga de efluentes, sejam eles domésticos ou industriais (MOTTA, 1978).

Segundo Motta (1978) a formação morfológica dos estuários ocorre por meio de processos biunívocos entre dois grupos de variáveis. Alterações nas variáveis morfológicas, ditas dependentes, como profundidade, largura, curvatura dos meandros e posição dos bancos sedimentares provocam alterações nas variáveis formadoras de morfologia, conhecidas como independentes, como vazões de água doce e de água salgada, vazões sólidas fluviais e marinhas e erodibilidade de bancos sedimentares, e vice-versa, por meio de relações de efeito e causa. Isto ocorre devido a necessidade de se ter de volta uma situação de equilíbrio.

2.2 ÁREA DE ESTUDO: LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Norte corresponde a um terço de toda a área do estado da Paraíba, e drena uma área de 14.397,35 km², compreendendo as sub-bacias do Baixo, Médio e Alto Paraíba. A bacia do Baixo Paraíba possui 110 km de extensão, possuindo feições tipicamente estuarinas desde a região do município de Bayeux até a foz do rio, em Cabedelo, compreendendo uma distância de 20 km (NEPREMAR, 1980).

A área de estudo deste trabalho envolve a porção estuarina do Baixo Paraíba, denominada Estuário do Rio Paraíba do Norte. Este localiza-se no estado da Paraíba, entre as coordenadas 34°50'00" a 34°57'30" W e 6°55'00" e 7°7'30" S e drena uma área de 3.925,4 km² (CBH/PB, 2004). O estuário apresenta formações meândricas margeadas por manguezais e conta com a presença de várias ilhas e ilhotas, sendo as principais, a Ilha da Restinga, com aproximadamente 590 ha, a Ilha Stuart, também com aproximadamente 590 ha, e a Ilha Tiriri, com área de 513 ha. Outra característica do estuário, é a formação de croas, i.e., bancos de areia que surgem durante a baixa mar.

O ERPN é classificado como um estuário do tipo barra e sua planície fluvio-marinha é compreendida pelo rio Paraíba (canal principal), e seus afluentes: Sanhauá, Mandacaru, Tambiá, Ribeira, Caboco, Mangebeira e rio da Estiva, sendo estes os rios que mais contribuem com aporte de água doce ao estuário.

De acordo com a classificação de Köppen, na Paraíba, o clima é classificado como tipo As', correspondendo a um clima tropical quente e úmido e com uma temperatura média máxima de 28° C entre os meses de fevereiro e março, e uma temperatura média mínima de 23° C entre os meses de julho e agosto. As chuvas são características do período de outono e inverno e as precipitações médias anuais variam entre 1200 e 1800 mm. Contudo, devido a sua proximidade com o mar e a ação da massa de Ar Equatorial Atlântica, da frente polar e dos ventos alísios de Sudeste, a chuva se distribui uniforme ao longo de todo o ano (IBGE, 1985).

Conforme Guedes (2002), do ponto de vista geológico, na área de estudo predominam os terrenos sedimentares terciários e quaternários. As rochas sedimentares encontradas são representadas pelas formações do Grupo Paraíba e do Grupo Barreiras e pelas formações recentes. Enquanto que as formações quaternárias da região são representadas por sedimentos inconsolidados, como aluviões, areias de praias, mangues e terraços fluviais.

Quanto à vegetação característica das margens do estuário, os manguezais exibidos na Figura 1 são os que apresentam maior extensão territorial, ocupando terras dos municípios de João Pessoa, Cabedelo, Bayeux, Lucena e Santa Rita. A vegetação de mangue ocupa 5.500 ha das margens do estuário. No Estado da Paraíba, uma área de 11.986 ha é ocupada por este tipo de ecossistema, ou seja, 0,21% do seu território (SEMARH, 2001).

Morais (2009) descreve os manguezais como formações vegetais que se desenvolvem em regiões onde há intensa deposição, sendo os estuários, os fundos de baías e a foz de rios, exemplos de ambientes propícios a sua formação. A autora destaca que este tipo de vegetação é constantemente alagado pela ação das marés e está presente em um solo com pouco oxigênio, pouco compactado e com grande quantidade de sal e enxofre, o que o torna fisiologicamente adaptada para esse ambiente.

Os manguezais são constituídos de forma geral por sedimentos pelíticos em conjunto com restos vegetais e matéria orgânica em decomposição. Estes possuem cotas altimétricas baixas e se encontram sob influência diária dos ciclos de maré, fazendo com que sua vegetação se adapte às condições de água salgada ou salobra (GUEDES, 2002).

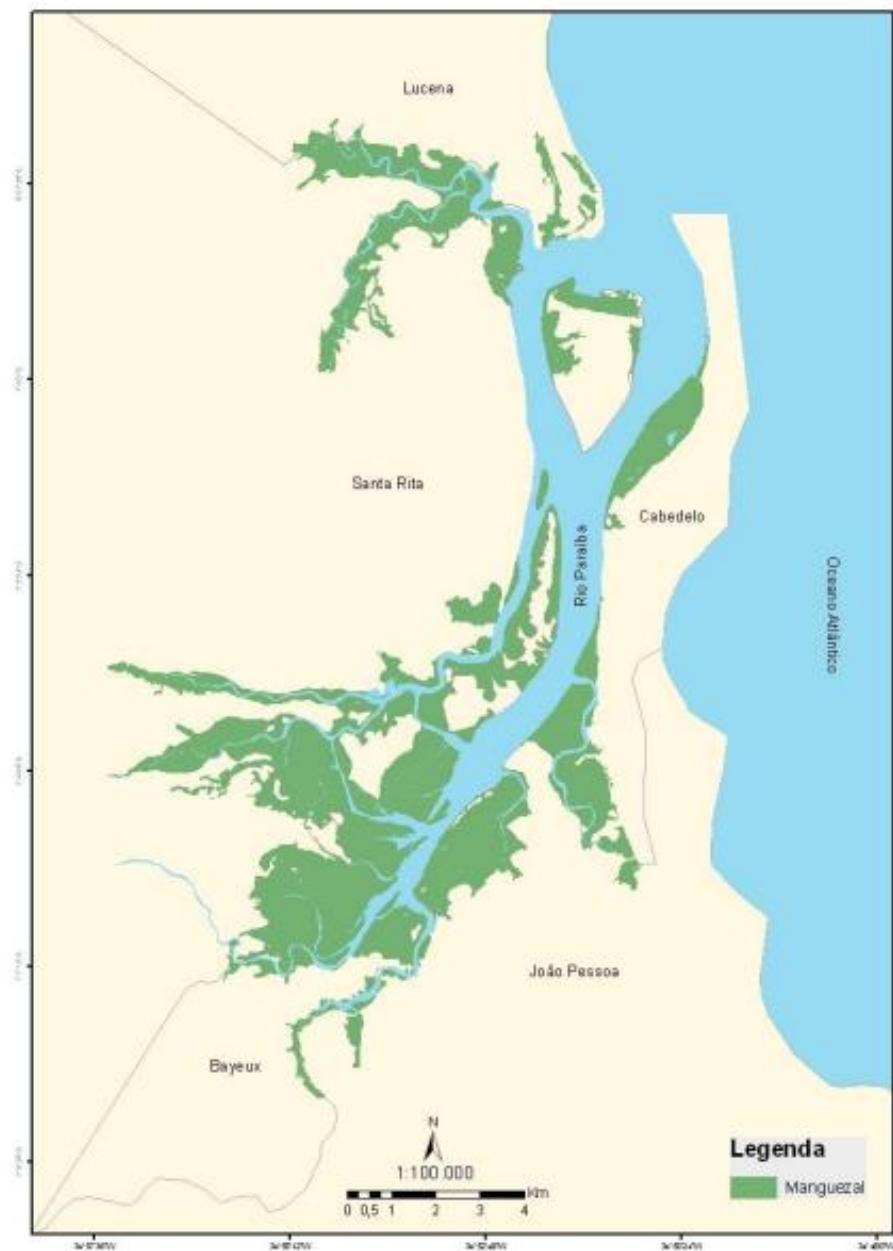


Figura 1. Manguezais no entorno do estuário do rio Paraíba do Norte (ARAÚJO, 2014).

A Figura 2 apresenta uma imagem aérea da região costeira e da foz do estuário, onde na margem direita localiza-se o Porto de Cabedelo. A entrada do estuário é protegida por um guia-correntes, que tem por função barrar o transporte de sedimentos longitudinal à linha de costa ocasionado pela arrebentação de ondas, o que impede a sedimentação no canal de acesso ao porto. Além disso, essa obra costeira evita que a região do porto sofra com problemas de agitação devido às ondulações vindas do oceano.



Figura 2. Imagens aéreas da praia de Miramar, com foco no guia-correntes localizado na margem direito do estuário do rio Paraíba do Norte (PARAÍBA CRIATIVA, 2005)

A região costeira da área de estudo (praias de Formosa e Areia Dourada) é protegida por uma formação de recifes de corais, inseridas no Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha - PEMAV, que se encontra posicionado na plataforma marítima a poucos quilômetros da cidade de Cabedelo, como exibido na Figura 3. Tais recifes agem como uma barreira de proteção, contribuindo com a dissipação da energia das ondas, pois, quando emersos, promovem a quebra das ondas vindas de leste e de sudeste.



Figura 3. Imagem aérea do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha, nas adjacências da foz do estuário do rio Paraíba do Norte (PARAÍBA CRIATIVA, 2005).

2.3 QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS ESTUARINOS

Os estuários são regiões onde há uma grande produtividade devido à maior persistência e reciclagem de nutrientes, esse caráter os torna ambientes atrativos para exploração dos seus recursos, o que pode acarretar um efeito negativo, resultante da elevada ocupação antrópica na área, como despejo de poluentes diversos, erosões nas margens, alterações em sua dinâmica, entre outros.

Outro fenômeno que interfere na qualidade da água em estuários são as alterações climáticas. A ocorrência de secas prolongadas e chuvas extremas interfere diretamente na dinâmica de renovação da água e no aporte de sedimentos, devido às mudanças no balanço hídrico. Ainda de caráter natural, a elevação do nível do mar pode vir a causar desequilíbrio em regiões de manguezais, em consequência da maior intrusão salina proveniente do oceano e consequentemente a perda de áreas com vegetação.

Diversos autores estudaram a qualidade da água do estuário do rio Paraíba do Norte e dos seus afluentes, dentre eles Sousa *et al.* (2015) fez análises físico-químicas e bacteriológicas durante as marés enchentes e vazantes em um período de um ano, em quatro pontos localizados nos rios Paraíba, Tambiá e Mandacaru. O objetivo foi avaliar as alterações da qualidade da água no rio Paraíba em consequência do despejo de efluentes da ETEPB, localizada nas margens do rio Tambiá. Os resultados revelaram elevados valores de coliformes totais, termotolerantes e nitrito na maioria das amostras coletadas. As maiores alterações na qualidade da água foram identificadas no rio Tambiá, ponto mais próximo do lançamento dos efluentes da ETEPB.

Costa (2009) avaliou a qualidade da água do estuário com o objetivo de monitorar a influência do antigo Lixão do Roger na qualidade do rio Sanhauá, onde este se localiza, e no rio Paraíba. O autor realizou coletas em quatro pontos, sendo dois a montante (no rio Sanhauá) e dois a jusante (no rio Paraíba) da região onde o antigo Lixão estava localizado.

O antigo Lixão do Roger, hoje desativado, ainda ocupa uma área de 17 ha de manguezal do rio Sanhauá. Em 2003, seu último ano de funcionamento, o lixão recebia em média 900 toneladas/dia de lixo urbano e possuía quinhentos e oito trabalhadores, o que aumentou a ocupação antrópica desregulada em áreas ribeirinhas, trazendo consigo demais problemas sanitários ao estuário. Devido à alta salinidade, má drenagem e aos altos teores de enxofre no solo local, o desenvolvimento da vegetação de mangue, que até 1970 ocupava toda a região, torna-se mais difícil (COSTA, 2009).

Visto que as atividades realizadas no entorno do corpo hídrico influenciam na sua qualidade, a legislação ambiental aplicada a estes ambientes condiz com as atividades exercidas no local. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA nº 357 de 2005 e seu complemento nº 410 de 2011 dispõem sobre a classificação dos corpos de água e sobre as diretrizes ambientais necessárias para o seu enquadramento. Os padrões de qualidade de um corpo hídrico são classificados quanto à sua salinidade e quanto aos usos previstos. Águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ups são classificadas como águas doces, enquanto que águas com salinidade superior a 0,5 ups e inferior a 30 ups são ditas águas salobras e águas com salinidade igual ou superior a 30 ups são águas salinas. A classificação quanto à qualidade necessária de acordo com os usos preponderantes é dividida em 13 classes, que diferem dependendo da salinidade, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos Corpos de Água segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes (CONAMA, 2005).

Classe	Águas Doce	Águas Salobras	Águas Salgadas
Classe Especial	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;</p> <p>b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e,</p> <p>c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.</p>	<p>a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e, b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.</p>	<p>a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.</p>
Classe I	<p>a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e</p>	<p>a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>c) à aquicultura e à atividade de pesca;</p> <p>d) ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; e</p> <p>e) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de</p>	<p>a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;</p> <p>b) à proteção das comunidades aquáticas; e</p> <p>c) à aquicultura e à atividade de pesca.</p>

Classe	Águas Doce	Águas Salobras	Águas Salgadas
	e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.	parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.	
Classe II	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e e) à aquicultura e à atividade de pesca	a) à pesca amadora; e b) à recreação de contato secundário	a) à pesca amadora; e b) à recreação de contato secundário.
Classe III	a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário; e e) à dessedentação de animais.	a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.	a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.
Classe IV	a) à navegação; e b) à harmonia paisagística.		

A Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba – SUDEMA, por meio do Programa de Monitoramento dos Recursos Hídricos, classifica o rio Paraíba e seus afluentes inseridos na porção estuarina da bacia hidrográfica em rios de classe 3. No entanto, devido às atividades de aquicultura realizadas na região, neste trabalho, os corpos d’água da bacia hidrográfica do ERPN foram enquadrados como água salobra de classe 1, classe onde tal uso é previsto.

A análise da qualidade da água de um corpo hídrico varia em função das variações quantitativas dos parâmetros de qualidade de água. Estes representam suas características físicas, químicas ou biológica, exercendo a função de indicadores de qualidade. As Resoluções CONAMA nº 357 de 2005 e nº 410 de 2011 fixam limites superiores ou inferiores para os parâmetros de qualidade por ela definidos. Estes variam a depender da classe que o corpo hídrico se encontra inserido.

Alguns padrões e condições mínimas referente à classe 1 de água salobra, bem como seus respectivos limites estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Padrões e condições mínimas de qualidade para Águas Salobras Classe I (CONAMA, 2005).

Padrão ou Condição	Águas Salobras	
	Classe 1	
Oxigênio Dissolvido – OD (mg/L O ₂)	5	
Coliformes Termotolerantes ¹ (por 100 ml)	43	
pH	6,5 a 8,5	
Temperatura (º C)	40	
Nitrato (mg/L N)	0,4	
Nitrito (mg/L N)	0,07	
Fósforo Total (mg/L P)	0,124	
Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L N)	0,4	

¹ Para o cultivo de moluscos bivalves destinados à alimentação humana, a média geométrica da densidade de coliformes termotolerantes, de um mínimo de 15 amostras coletadas no mesmo local, não deverá exceder 43 por 100 mililitros, e o percentil 90% não deverá ultrapassar 88 coliformes termotolerantes por 100 mililitros. Esses índices deverão ser mantidos em monitoramento anual com um mínimo de 5 amostras.

2.4 CARCINICULTURA: ASPECTOS TÉCNICOS, LEGISLATIVOS AMBIENTAIS

A carcinicultura é a atividade que objetiva criar camarões em viveiros construídos pelo homem, estes viveiros simulam as características do ambiente natural de vida dos animais, considerando sempre a variação de parâmetros físicos e químicos da água, como a salinidade, temperatura, turbidez, presença de sólidos em suspensão, nutrientes, oxigênio disponível, pH, dentre outros fatores.

O cultivo do camarão é dividido em etapas quanto ao seu estágio de crescimento, são elas: berçário, enfermaria e engorda. A primeira visa capturar e cuidar das fêmeas férteis até que seus ovos atinjam o estágio de pós-larva. A segunda busca fortalecer as pós-larvas para que seja reduzida sua mortalidade, e por fim, a engorda é a fase de desenvolvimento do animal até sua vida adulta, visando atingir tamanho comercial almejado (CUNHA, 2006).

As partes do sistema que compõem as fazendas de carcinicultura incluem não somente os viveiros em si, mas outras estruturas essenciais ao seu funcionamento, como o sistema de abastecimento, que comporta o canal de adução e o bombeamento da água para os viveiros.

Além da captação feita por meio do bombeamento direto do corpo hídrico, algumas fazendas usam as oscilações das marés com a mesma finalidade. A depender do sistema de cultivo empregado e do estado do corpo d'água, algumas fazendas adotam esse sistema de trocas de água contínua nos viveiros (ROVERSI, 2018). Dentre os motivos adotados para fazer uso da troca de água, a retirada de quantidades excessivas de nutrientes, amônia e sal, como também o aumento do aporte de oxigênio nos viveiros são os principais. No entanto Boyd e Tucker (1998) ressaltam que apenas há redução da salinidade durante essas trocas. Os autores explicam que as trocas de água constantes nos viveiros com cultivo intensivo e semi-intensivo por vezes são ineficientes, podendo aumentar os níveis de poluição e disseminação de doenças nos viveiros.

Hopkins (1993) ao estudar a influência das trocas de água nas características do efluente em fazendas com cultivo intensivo, observou que as taxas típicas de troca de água usadas em fazendas intensivas de camarão podem ser drasticamente reduzidas, resultando em uma economia para as fazendas e em uma redução do impacto ambiental dos efluentes.

Outra parte que também constitui os empreendimentos é o sistema de drenagem, responsável pelo descarte dos efluentes e consequentemente pela despresa do camarão. A despresa é o processo de retirada do animal de dentro dos viveiros após o camarão alcançar o tamanho desejado, ocorrendo geralmente entre 90 e 120 dias de cultivo. A despresa ocorre através do sistema de drenagem, em que há a abertura das comportas dos criadouros, drenando assim a água dos viveiros. No canal de drenagem são instaladas redes responsáveis por capturar os animais. A Figura 4 exibe o momento em que ocorre uma despresa no rio da Ribeira.

Além destas, há também as estruturas responsáveis por otimizar a criação dos animais, controlando as características físicas e químicas da água. Uma delas é o uso de aeradores, que está relacionado a depleção do oxigênio dissolvido na água, essa redução do OD pode ocorrer devido à má qualidade da água captada, pela alta densidade de camarões, ou ainda para evitar a estratificação térmica dos viveiros, visto que os animais vivem no fundo destes. Outra função atribuída aos aeradores é a sua influência em manter os sólidos em suspensão, uma vez que estes se decompõem melhor estando em suspensão (CUNHA, 2006).

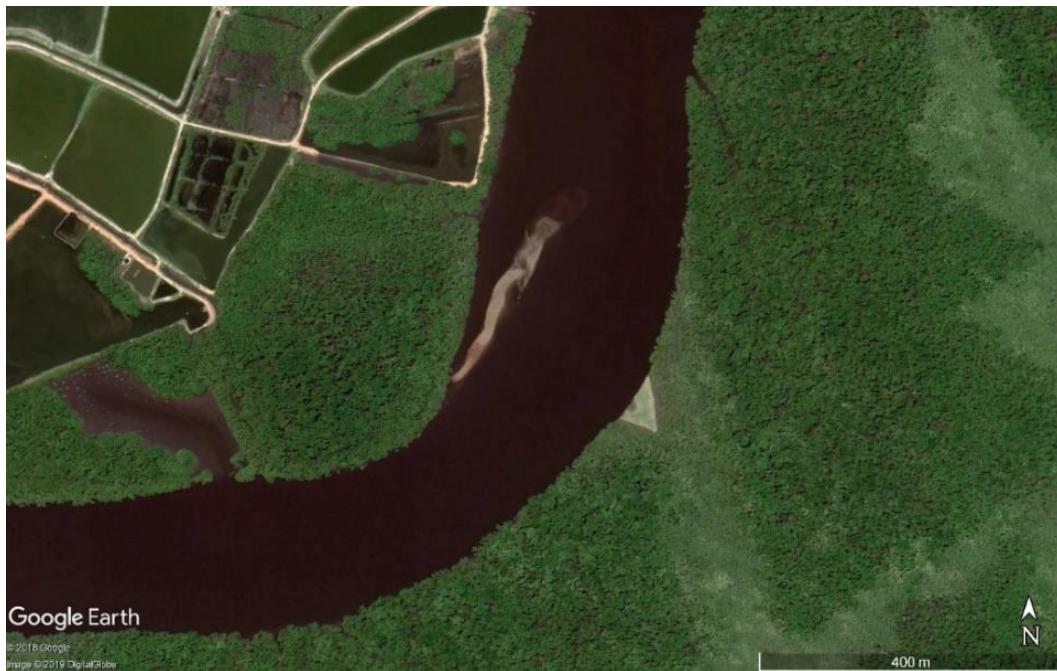


Figura 4. Vista aérea da pluma de efluente da carcinicultura sendo descartada no rio da Ribeira (GOOGLE EARTH, 2019).

O Brasil possui diversos fatores que o coloca potencialmente a frente dos demais países produtores de camarão. Sua localização estratégica para exportação, a alta produtividade de grãos, a grande oferta de áreas aptas para o cultivo, a disponibilidade hídrica, e as boas condições climáticas são características do país que se destacam quando comparado aos demais. Apesar de todo potencial disponível, atualmente o Brasil ainda representa apenas uma pequena parte da atividade mundial. Apesar do país ter vivenciado um grande aumento da sua produção em 2003, totalizando 90.360 t/ano, e sendo o 6º maior produtor mundial, atualmente, em 2017 sua produção foi reduzida em quase 40%, atingindo um valor de 58.455 t/ano (ABCC, 2018).

A maior parte do cultivo de camarão brasileiro encontra-se na região nordeste do país, representando 99,3 % da produção nacional (ABCC, 2013). No Nordeste, o estado da Paraíba ocupava em 2015 a 6ª posição quanto à produção do camarão nacional, totalizando 1.600 t/ano (ABCC, 2016). De acordo com dados do Censo da Carcinicultura de 2011, a Paraíba possuía 53 empreendimentos instalados na sua região. Destes, 64% são classificados como micro fazendas, i.e., área menor que 5 ha. Essa maioria de micro produtores é observada em todo território nacional.

Na América do Sul e Central, a espécie mais cultivada é a *Litopenaeus vannaei*, nativa do Pacífico, porém bem adaptado às condições brasileiras, inclusive em águas com baixa e alta salinidade (BOYD *et al.*, 1989).

Em todo o entorno do ERPN há a presença de empreendimentos de carcinicultura. Diferentes estudos já foram realizados nestas fazendas, dentre eles, Barros (2006) estudou o aporte de metais provenientes de produtos utilizados na engorda dos camarões, em um tanque de cultivo da Fazenda Galé. A Fazenda Galé possui uma área de criação de aproximadamente 17 ha, contendo 7 viveiros. A renovação da água realizada na fazenda ocorre conforme o nível da água durante a preamar alcança os tanques de cultivo instalados às margens do rio da Ribeira. Lúcio (2009) também realizou pesquisas na Fazenda Galé, porém este avaliou a influência da criação de camarão nas concentrações de Ca e Zn sobre os sedimentos de um trecho do rio da Ribeira.

Cavalcanti (2003) caracterizou os aspectos físicos, químicos e biológicos da água de uma região do ERPN onde está localizada a Fazenda Aquamaris. O local de estudo possui uma área de 173 ha, com vinte e oito viveiros instalados. Nesta fazenda, a água dos tanques é abastecida a partir do rio Paraíba do Norte e as descargas dos processos de despesca ocorrem nos rios Tambiá e Mandacaru, ambos afluentes do rio Paraíba do Norte.

A atividade de carcinicultura, não obedecendo a conduta legal, pode vir a causar diversos danos ao meio ambiente. Dentre eles, a supressão da vegetação de mangue pode deixar as regiões estuarinas vulneráveis à erosão de suas margens. Quanto à qualidade do efluente descartado, sabe-se que os fertilizantes utilizados na criação elevam a concentração de nitrogênio e fósforo na água, aumentando os níveis de nutrientes do corpo receptor. A ração não ingerida pelos animais é convertida em amônia, fosfato e dióxido de carbono pela degradação microbiana (NUNES, 2002), além do consumo de oxigênio dissolvido durante a respiração dos organismos decompositores.

O oxigênio dissolvido é um importante fator limitante na carcinicultura. Os camarões passam a maior parte do tempo na camada mais profunda dos viveiros, onde podem ocorrer momentos de hipóxia devido ao consumo de Oxigênio Dissolvido - OD para decompor a matéria orgânica acumulada de restos de ração e fezes, principalmente à noite. A condição de hipóxia ocorre quando o OD possui valores inferiores a 2,8 mg/L. Por consequência, o OD tem sido considerado um importante fator ambiental determinante para o sucesso da cultura do camarão. Valores de OD superiores a 5 mg/l têm sido frequentemente recomendados para cultivos intensivos de camarão (ZHANG *et al.*, 2006).

A *Global Aquaculture Alliance* – GAA possui um programa de certificação para fazendas de aquicultura. No *Best Aquaculture Practices* – BAP o *Shrimp – Specific Standards* estabelece padrões e práticas para o cultivo sustentável de camarões, dentre eles, que as trocas de água não

excedam o valor de 10% ao dia. Para controle da qualidade dos efluentes, a organização impõe padrões que devem ser seguidos, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Padrões de qualidade de água para efluentes gerados por empreendimentos de aquicultura (GAA, 2017).

Parâmetro	Valor inicial	Valor final (após 5 anos)	Frequência de coleta
pH	6,0 – 9,5	6,0 – 9,0	Mensal
Sólidos totais em suspensões (mg/L)	≤ 50	≤ 25	Trimestral
Fósforo (mg/L)	≤ 0,5	≤ 0,3	Mensal
Amônia (mg/L)	≤ 5	≤ 3	Mensal
DBO ₅ (mg/L)	≤ 50	≤ 30	Trimestral
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	≥ 4	≥ 5	Mensal
Cloreto (mg/L)	≤ 800	≤ 550	Mensal

A Resolução CONAMA nº 312, de 10 de outubro de 2002 dispõe sobre o licenciamento ambiental dos empreendimentos de carcinicultura na zona costeira. Em seu art. 2º é vedada a atividade de carcinicultura em regiões de manguezais. Como o efluente de despesca é rico em nutrientes, material orgânico e sólidos em suspensão, o controle da qualidade da água é de caráter fundamental. Essa mesma resolução determina que os empreendimentos devem tratar e controlar o lançamento dos efluentes gerados pela atividade, além de ressaltar que os mesmos devem retornar ao corpo d’água em condições que estejam de acordo com sua respectiva classe, conforme CONAMA nº 357/2005.

Durante as etapas do licenciamento ambiental, o empreendimento – a depender do seu porte, deve apresentar o Plano de Controle Ambiental – PCA e o Plano de Monitoramento Ambiental – PRA. O primeiro avalia os impactos ambientais da atividade e propõe medidas de mitigação para eles. O PRA trata do monitoramento dos parâmetros de qualidade de água. Neste último são determinados os locais para monitoramento, são eles: nos viveiros, no ponto de captação da água, no canal de drenagem, e a 100 metros à montante e à jusante do ponto de lançamento dos efluentes da drenagem dos viveiros. O PRA também determina a periodicidade que tal monitoramento deve ser efetuado e os parâmetros que devem ser analisados. A frequência mínima de coleta é de três meses e os seguintes parâmetros devem ser monitorados: material em suspensão (mg/l), transparência (Disco de Secchi - m), temperatura (°C), salinidade (ups), OD (mg/l), DBO, pH, amônia-N (mg/l), nitrito-N (mg/l), nitrato-N (mg/l), fosfato-P (mg/l) e silicato-Si, clorofila “a” e coliformes totais.

Apesar da proibição de instalação em áreas de manguezais, a Lei nº 12.651 de 2012, que instituiu o novo Código Florestal, estabelece em seu Capítulo III-A, que em regiões de apicuns

e salgados pode haver instalações de empreendimentos de carcinicultura, porém deve ser respeitado o limite de ocupação máximo de 35% da flora típica da região, e de 10% para o bioma amazônico. O Novo Código Florestal abre exceções para empreendimentos que tenham se instalado anteriormente a 22 de julho de 2008 e assegura sua regularização. O art. 3º desta mesma lei, determina a apresentação do EPIA/RIMA para empreendimentos com mais de 50 ha de área ocupada, ou com áreas menores, desde que sejam considerados potencialmente causadores de degradação ambiental, ou àqueles localizados em regiões com adensamento de fazendas de carcinicultura.

Visto que o novo Código Florestal não define o tipo de tratamento e disposição que deve ser realizado com os efluentes, a Lei nº 11.180 de julho de 2018, que dispõe sobre o desenvolvimento sustentável da carcinicultura no Estado da Paraíba, determina em seu art. 7º a obrigatoriedade da implantação de bacia de sedimentação para empreendimentos de médio, grande e excepcional porte. A Lei também dá diretrizes para a caracterização das áreas de apicuns ou salgado, ficando determinado que a caracterização será feita através de levantamento topográfico em relação às tábuas de marés e por laudos de salinidade do solo.

2.5 SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL – SisBaHiA®

Os modelos computacionais adotados para o desenvolvimento do trabalho fazem parte do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental - SisBaHiA®. O SisBaHiA® é um sistema que abrange diversos modelos envolvendo corpos d'água naturais. A formulação matemática e numérica detalhada pode ser consultada na Referência Técnica do SisBaHiA® (ROSMAN, 2019), disponível em www.sisbahia.coppe.ufrj.br. Nas seções a seguir são dadas breves explicações sobre os modelos utilizados no estudo, baseadas na Referência Técnica do modelo citada anteriormente.

2.5.1 MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA® é chamado de FIST3D (*filtered in space and time 3D*). Esta linhagem permite simular o comportamento hidrodinâmico de corpos d'água naturais ao resolver as equações de Navier-Stokes considerando as aproximações de águas rasas (aproximação de pressão hidrostática) e a aproximação de Boussinesq.

O modelo hidrodinâmico é composto por dois módulos: um 3D, calculando campos de velocidade tridimensional, e um módulo 2DH, que resolve as componentes das velocidades

médias promediadas na vertical e a elevação da superfície livre ao longo do domínio modelado. Nesse trabalho foi utilizado o módulo 2DH, que pode ser executado independente do módulo 3D, com o objetivo de gerar padrões de circulação hidrodinâmica.

Para resolver um escoamento com regime turbulento, usam-se as equações de Navier-Stokes, que são baseadas no princípio da conservação da quantidade de movimento, juntamente com a equação da continuidade (do volume), uma equação de estado e equações de transporte para cada constituinte da equação de estado. Estas equações possibilitam representar o movimento hidrodinâmico em qualquer corpo d'água natural. Assim para calcular a circulação no módulo 2DH, as seguintes equações são utilizadas:

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q = 0 \quad (1)$$

Onde:

$\frac{\partial(\zeta + h)}{\partial t}$ = Variação da coluna d'água no tempo.

$\frac{\partial UH}{\partial x}$ = Variação da vazão através da coluna d'água na direção x.

$\frac{\partial VH}{\partial y}$ = Variação da vazão através da coluna d'água na direção y.

Equação da quantidade de movimento 2DH para um escoamento integrado na vertical, na direção x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S - \tau_x^B - \tau_x^E) \\ - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - 2\Phi \operatorname{sen}(\theta) V - \frac{U}{H} \sum q \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = & -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_o H} (\tau_y^S - \tau_y^B - \tau_y^E) \\
& - \frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + 2\Phi \sin(\theta) U - \frac{V}{H} \sum q
\end{aligned} \tag{3}$$

Os termos utilizados das equações de (2) e (3) são semelhantes, havendo mudança apenas quanto a direção. A seguir estão explicados os termos para a direção x.

$\frac{\partial U}{\partial t} =$	Aceleração local do escoamento 2DH, em escoamentos permanentes, esse termo é igual a zero.
$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} =$	Aceleração advectiva do escoamento 2DH, em escoamentos uniformes, esses termos são iguais a zero.
$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} =$	Variação da pressão hidrostática na direção x, devido à declividade da superfície livre na direção x. Este termo força escoamentos de lugares onde o nível de água é mais alto para onde o nível de água é mais baixo.
$-g \frac{H}{2} \frac{\partial(\rho/\rho_o)}{\partial x} =$	Variação da pressão hidrostática na direção x, devido às diferenças de densidade (ρ/ρ_o) da água na direção x. Este termo força o escoamento de lugares com maior densidade para locais com menor densidade.
$\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) =$	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 áreas, e de quantidade de movimento na direção x, por unidade de massa.
$\frac{1}{\rho_o H} (\tau_x^S) =$	Tensão do vento na superfície livre por unidade de massa. Se o vento estiver na mesma direção do escoamento, esse termo irá acelerar o escoamento, se estiver oposto, irá retardar o escoamento.
$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^B) =$	Tensão de atrito no fundo atuando no escoamento 2DH por unidade de massa. Este termo tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.
$\frac{1}{\rho_o H} (-\tau_x^E) =$	Tensão de atrito devido a efeito de estruturas inseridas no campo de escoamento 2DH por unidade de massa. Este termo sempre

tende a desacelerar o escoamento. É sempre oposto ao escoamento.

$$-\frac{1}{\rho_o H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) =$$

Efeito das tensões de radiação devido a ondas de curto período capazes de gerar correntes litorâneas. Tais termos só tem efeito relevante quando as ondas estão em águas relativamente rasas, e.g., quando a profundidade local é inferior a 10% do comprimento da onda.

$$2\Phi \sin(\theta) V =$$

Aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da Terra. Este termo é irrisório próximo ao equador, i.e., em baixas latitudes, e pouco relevante em corpos de água relativamente pequenos.

$$-\frac{U}{H} \sum q =$$

Efeitos na quantidade de movimento devido a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação, evaporação e infiltração.

As soluções destas equações dependem da inserção de condições iniciais e de contorno coerentes para o modelo. Assim é necessário fornecer no instante inicial de simulação, valores de níveis de água e das componentes de velocidade U e V.

Áreas que sofrem alagamento e secamento são calculadas pelo modelo em função da variação do nível da água por meio de três métodos, são eles:

- Método Poroso-Rugoso (MPR);
- Método de Meio Poroso (MMP);
- Método do Filme Superficial (MFS).

O MPR e o MMP possuem características semelhantes, ambos consideram a existência de uma camada de meio poroso sob a superfície do terreno ou do fundo (quando coberto por água), onde há um fluxo restrito de água. No entanto, a simulação considera um efeito equivalente em que a água é forçada a escoar pela camada com pequena espessura e grande rugosidade, ao invés de uma simulação em meio poroso propriamente dita. A espessura dessa camada varia em 1% a 10% da altura do nível da água. Enquanto que a rugosidade possui uma variação de 1 a 5 vezes a espessura da camada equivalente, o que faz com que o escoamento sofra extrema resistência.

Essa camada equivalente está sempre presente no MMP e é limitada pelo nível da água quando este estiver acima da cota do fundo. Em contrapartida, no MPR, só haverá fluxo na camada

rugosa-porosa quando o nível da água for inferior à cota do terreno e à espessura da camada equivalente. Na Figura 5 é possível observar tais limites e espessuras.

No MFS, supõe-se que a superfície livre age como um filme que adere sobre a superfície do fundo à medida em que ocorre o secamento da região. No entanto, esse método se torna muito exigente em termos de estabilidade numérica, não sendo recomendado para regiões grandes onde há alagamento e secamento e com grande variação batimétrica da planície de maré.

Neste trabalho, optou-se por usar o MPR, devido à vantagem de o mesmo não interferir na celeridade da onda, ao contrário do MMP.

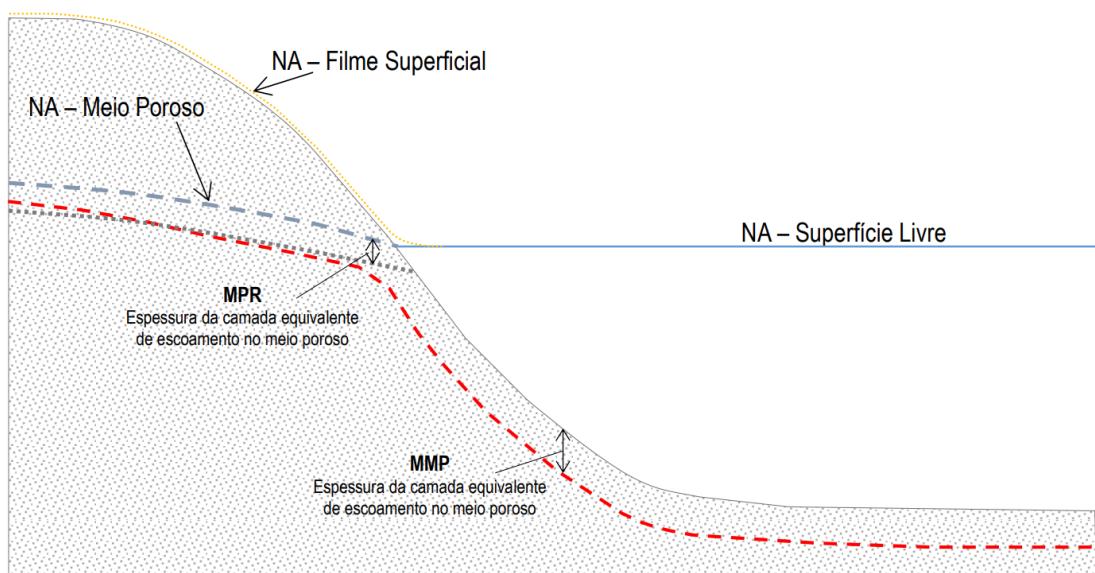


Figura 5. Esquema dos Métodos Poroso-Rugoso – MPR e em Meio Poroso – MMP. A espessura da camada equivalente está exagerada para permitir melhor visualização (ROSMAN, 2019).

2.5.2 MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO

O modelo euleriano do SisBaHiA® é um modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical cujo objetivo é simular a distribuição de substâncias ou escalares passivos e ativos, isto é, aqueles que não interferem na hidrodinâmica local, e aqueles que interferem na hidrodinâmica, respectivamente.

Quando o escalar estudado possui comportamento ativo, como o sal, o modelo se torna acoplado ao modelo hidrodinâmico, devido a sua presença gerar gradientes de densidade que irão interferir no escoamento. No entanto, quando a substância analisada possui comportamento passivo, o modelo roda desacoplado do hidrodinâmico, por não haver interferência na circulação.

No modelo de transporte euleriano o transporte de cada constituinte é calculado considerando que não há interferência de outras substâncias, ou seja, só é possível fazer simulações independentes, sem interação entre duas substâncias (sem sinergia nas reações cinéticas).

O princípio da conservação de massa determina o transporte bidimensional, promediado na vertical, de um determinado constituinte em um corpo d'água natural. No modelo de transporte euleriano a equação abaixo representa tal princípio, que também é conhecida como equação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = -\frac{C}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \sum R \\ + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \\ + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x} + H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial y} + H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \frac{\partial C}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde,

- C = Concentração da substância de interesse.
- q_P, q_E, q_{Ia} = Valores dados de vazões de precipitação, evaporação e infiltração, respectivamente, por unidade de área, e.g., $[m^3/s/m^2]$.
- D_{ij} = Representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal. Escalas de largura de filtragem local na dimensão e são parâmetros de calibração. O valor x calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem.
- $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$ =

2.5.3 MODELO DE TRANSPORTE LAGRANGEANO

O modelo de transporte lagrangeano simula o transporte de um constituinte utilizando o conceito de traçadores, ou seja, se baseia em observar a trajetória de uma partícula no domínio. Este modelo é ideal para simular o transporte de plumas que estão flutuando, misturadas ou apenas ocupando uma camada da coluna d'água. É indicado também para representar fenômenos em que as fontes são pequenas em relação ao domínio modelado.

O modelo possibilita analisar o aporte de diferentes constituintes na água, computando sua dispersão no corpo d'água, sendo o lançamento de qualquer forma: instantâneo, com intervalos especificados ou contínuo e com vazões variáveis.

A metodologia para simular a dispersão de manchas do modelo de transporte do tipo lagrangeano considera que a pluma do contaminante é gerada a partir de uma fonte, sendo representada por uma nuvem de partículas, onde a posição de cada partícula da mancha no espaço é computada pelo modelo. Apenas quando se deseja calcular a concentração da substância, é gerada uma malha mais refinada no entorno da nuvem de partículas, possibilitando resultados com maior precisão.

O modelo lagrangeano pode ser determinístico ou probabilístico. O primeiro, explicado anteriormente, calcula o transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas em camadas do escoamento. O modelo probabilístico é acoplado ao anterior e possibilita obter resultados probabilísticos a partir de diferentes eventos ou de resultados ao longo de um período específico, como a probabilidade da passagem de uma mancha com concentrações superiores a um limite determinado.

Para representar o movimento da nuvem de partículas no domínio, considera-se que a posição de qualquer partícula no instante P^{n+1} , é determinada por meio da expansão em série de Taylor a partir da posição anterior já conhecida P^n , conforme a Equação 5. As partículas sofrem advecção à medida que as correntes do modelo hidrodinâmico são computadas.

$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{\Delta P^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + T.A.D \quad (5)$$

Onde T.A.D. são termos de alta ordem desprezados. Com o campo de velocidades hidrodinâmico resolvível são calculadas as derivadas temporais de P , conforme a Equação 6.

$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w) \quad (6)$$

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

Onde na escala resolvível, a velocidade responsável pelo transporte advectivo das partículas, dada por $\vec{V}(u, v, w)$ é igual a velocidade obtida com o modelo hidrodinâmico. A quantidade de massa M do contaminante em cada partícula no meio é dada pela Equação 7 abaixo.

$$M_a = \frac{QC_a \times \Delta\tau}{N_p} \quad (7)$$

Onde,

$$\begin{aligned} Q &= \text{Descarga oriunda da fonte.} \\ C_a &= \text{Concentração de um determinado contaminante presente na descarga.} \\ N_p &= \text{Número de partículas que irá entrar no domínio de modelagem por intervalo de tempo } \Delta\tau. \end{aligned}$$

Cada partícula representa o centro de massa de uma mancha de contaminantes, possuindo uma distribuição de concentração $C(x, y, z, t)$, sendo a distribuição total do contaminante no domínio representada pelo somatório de todas as manchas de partículas. Assim, a quantidade de massa de uma partícula, com centro na posição (x, y, z) i distribui-se em uma determinada célula i que faz parte da malha de concentração do modelo, calculada pela equação abaixo.

$$m_{ai}(x, y, z) = \frac{M_a R(t_v) f}{\sum_{n=1}^{NP} f_n} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f &= \text{Representa a função de distribuição espacial.} \\ R(t_v) &= \text{Função cinética da reação.} \\ t_v &= \text{Tempo de vida ou idade da partícula.} \\ NP &= \text{Número de partículas que contribuem para a quantidade de massa em uma célula da malha de concentrações.} \end{aligned}$$

Assim, para obter a concentração em cada célula do contaminante, divide-se o somatório de todas as parcelas de massa da substância na célula pelo volume da mesma.

2.5.4 MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA

A modelagem de qualidade de água simula as variações da concentração de determinados constituintes, considerando processos químicos, físicos e biológicos ao longo do tempo. Para isso, o modelo resolve a equação do balanço de massa para vários constituintes, ou seja, é um conjunto de modelos de transporte euleriano que simula 11 parâmetros de qualidade de água, considerando as reações do constituinte com o corpo d'água ou com outro constituinte.

O padrão de circulação utilizado pelo modelo de qualidade da água provém do modelo hidrodinâmico. Assim, com os resultados das velocidades e dos níveis, é aplicada a equação de transporte advectivo-difusivo juntamente com os processos resultantes das reações cinéticas de produção e consumo.

Os seguintes parâmetros de qualidade de água são simulados pelo SisBaHiA®: Oxigênio Dissolvido (mg/L O₂), Salinidade (ups), Temperatura (°C), Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L O₂), Amônia (mg/L NA), Nitrato (mg/L NI), Nitrogênio Orgânico (mg/L NO), Fósforo Inorgânico (mg/L P), Fósforo Orgânico (mg/L PO), Clorofila (µg/L Chla) e Zooplâncton (µg/L Z). Além destes, é possível também fazer análises com o agrupamento de alguns parâmetros, como Nitrogênio Total (Amônia + Nitrato + Nitrogênio Orgânico), Nitrogênio Kjeldahl (Amônia + Nitrato) e Fósforo Total (Fósforo Inorgânico + Fósforo Orgânico).

Com exceção da temperatura e da salinidade, os parâmetros utilizados no modelo são considerados como contaminantes passivos, ou seja, não afetam a hidrodinâmica da região, tornando possível que ambos os modelos, de qualidade e hidrodinâmico, rodem desacoplados.

Cada parâmetro de qualidade de água possui reações cinéticas distintas nos processos de transformação. A seguir são apresentados os processos cinéticos referente ao ciclo de oxigênio.

Durante o ciclo do oxigênio é possível determinar a Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO e o Oxigênio Dissolvido – OD no meio. Como há uma interação entre os processos envolvidos nas duas incógnitas, é necessário que estes sejam resolvidos de forma acoplada. Os seguintes processos cinéticos são envolvidos no cálculo dessas duas incógnitas:

- OD: reaeração, decomposição, nitrificação, fotossíntese, respiração de fitoplâncton, respiração de zooplâncton, demanda de oxigênio no sedimento.

Os gases dissolvidos presentes na água, como o oxigênio, permitem que ocorra a fotossíntese e a respiração aeróbia no corpo d'água. Com a presença de matéria orgânica no meio, organismos

aeróbios irão fazer a sua decomposição, o que acarreta no consumo do OD durante seus processos respiratórios. Em situações onde o consumo de OD é alto e a capacidade de repor o OD no meio é reduzida, a existência de vida no corpo d'água é comprometida. A recuperação do OD na água ocorre por meio da reaeração, i.e., da adição natural do OD por meio de trocas com a atmosfera ou então pela fotossíntese (BRAGA *et al.*, 2005).

Além da respiração, outros processos também são considerados na quantificação do OD no meio, como o consumo de OD nos sedimentos, chamado de demanda bentônica, e a nitrificação, que é o processo de oxidação da amônia em nitrato, onde também há consumo de oxigênio.

A Equação 9 representa os processos cinéticos considerados na determinação do OD.

$$\sum R_6 = k_a(O_s - C_6) - k_D C_5 - r_{on} k_{12} C_1 + r_{oc} r_{ca} k_g C_9 - r_{oc} r_{ca} k_{ra} C_9 - r_{oc} k_{rz} C_4 - \frac{SOD}{H} \quad (9)$$

- DBO: decomposição, sedimentação, desnitrificação, fonte através de detritos da herbivoria, da mortalidade não-predatória de fitoplâncton e da mortalidade não-predatória de zooplâncton.

Conforme Braga *et al.* (2005), a DBO representa a quantidade de OD necessária durante a decomposição da matéria orgânica presente na água. Como a decomposição ocorre durante um determinado intervalo de tempo e varia em função da temperatura, a quantificação da DBO é feita considerando um período de 5 dias, à uma temperatura de 20 °C. Assim, o valor da DBO_{5,20} será definido a partir da diferença entre o OD consumido desde o momento inicial, até o final, no caso ao final de 5 dias.

Outros processos de consumo também são considerados, são eles a sedimentação, a desnitrificação e os detritos da herbivoria e do fitoplâncton e zooplâncton. A sedimentação considerada no cálculo da DBO representa a parcela particulada da matéria orgânica que irá sedimentar. A desnitrificação é um dos processos que ocorrem durante o ciclo do nitrogênio, neste há a conversão de nitrato em nitrogênio molecular. Os detritos decorrentes da parte da biomassa do fitoplâncton que não é consumida são transformados em DBO. Assim como a herbivoria, a mortalidade não predatória do fitoplâncton e zooplâncton é também transformada em DBO.

$$\sum R_5 = -k_D C_5 - \frac{v_{s3}(1-f_{D5})}{H} C_5 - r_{on} k_{12} C_5 + r_{oc} r_{ca} (1-E_z) k_{gz} C_9 + r_{oc} r_{ca} k_{ea} C_9 + r_{oc} k_{ez} C_4 \quad (10)$$

Onde, para ambas as Equações 9 e 10,

- k_D = Taxa de decomposição da DBO
 k_a = Coeficiente de reaeração
 O_s = Concentração de saturação do oxigênio
 r_{on} = Razão de oxigênio consumido por unidade de massa de nitrogênio oxidado no processo total de nitrificação
 k_n = Taxa de nitrificação
 k_g = Taxa de crescimento do fitoplâncton
 k_{ra} = Taxa de perdas de fitoplâncton devido à respiração e excreção
 r_{ca} = Razão entre carbono e clorofila no fitoplâncton
 E_z = Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas
 k_{gz} = Taxa de predação do zooplâncton sobre algas
 r_{oc} = Quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico
 V_{s3} = Velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas
 f_{D5} = Fração da DBO dissolvida
 H = Altura da coluna de água

2.6 SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT

O SWAT é um modelo matemático que simula por longo ou curto prazo os impactos da agricultura em tipos de solos distintos e das suas práticas sobre águas superficiais e subterrâneas, sobre assoreamentos e erosões, e também sobre a qualidade da água, em bacias hidrológicas. O modelo foi criado pelo *Agricultural Research Service* – Serviço de Pesquisa na Agricultura, e pela Universidade Texas A&M, e continua sendo desenvolvido pelos mesmos. Suas aplicabilidades são diversas, englobando bacias hidrográficas de vários tamanhos, podendo simular a hidrologia, sedimentos, nutrientes e carga de poluentes (LIMA, 2016).

Simular a hidrologia com o SWAT requer passar por duas fases: a fase terrestre e a fase de trajeto da água no ciclo hidrológico. Uma breve explicação destas duas fases é feita abaixo, baseada na Documentação Técnica do Modelo SWAT Versão 2009 (NEITSCH *et al.*, 2011).

A fase terrestre simula a quantidade de água, sedimento, nutrientes e contaminantes que chegam no curso d’água principal de cada sub-bacia. Assim, com base em dados de solo, declividade, uso da terra e climatologia, é calculado o balanço hídrico pela seguinte equação:

$$sw_t = sw_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (11)$$

Onde,

- sw_t = Volume final de água contida no solo (mm).
- sw_o = Volume inicial de água contida no solo no dia i (mm).
- t_y = Tempo em dias.
- R_{day} = Volume de precipitação no dia i (mm).
- Q_{surf} = Volume de escoamento superficial no dia i (mm)
- E_a = Volume que escapa por evapotranspiração no dia i (mm)
- W_{seep} = Volume que infiltra na zona insaturada do solo no dia i (mm)
- Q_{gw} = Volume que atinge as zonas de recarga no dia i (mm)

Nesta fase, diversos parâmetros de entrada são dados ao modelo, são eles: clima, hidrologia, cobertura do terreno/crescimento vegetal, erosão, nutrientes e contaminantes.

A fase de trajeto da água no ciclo hidrológico simula a hidrodinâmica do corpo hídrico, ou seja, o movimento da água, dos sedimentos e etc., pela bacia hidrográfica até sua descarga, sendo esta a força motora principal do modelo, conforme exibido na Figura 6. A propagação da água no canal é dividida em quatro áreas: água, sedimento, nutrientes e produtos químicos orgânicos.

A propagação da água no modelo considera as perdas por evaporação e percolação, além de incluir a perda referente à remoção da água para uso agrícola e humano. Contudo pode haver ganhos no fluxo, onde é considerada a precipitação e o fluxo de fontes pontuais de descargas.

Neste trabalho o SWAT foi utilizado com o objetivo de obter condições de contorno para o SisBaHiA®, referentes às séries de vazões dos rios afluentes ao Estuário do Rio Paraíba do Norte, devido ao déficit destes dados na região.

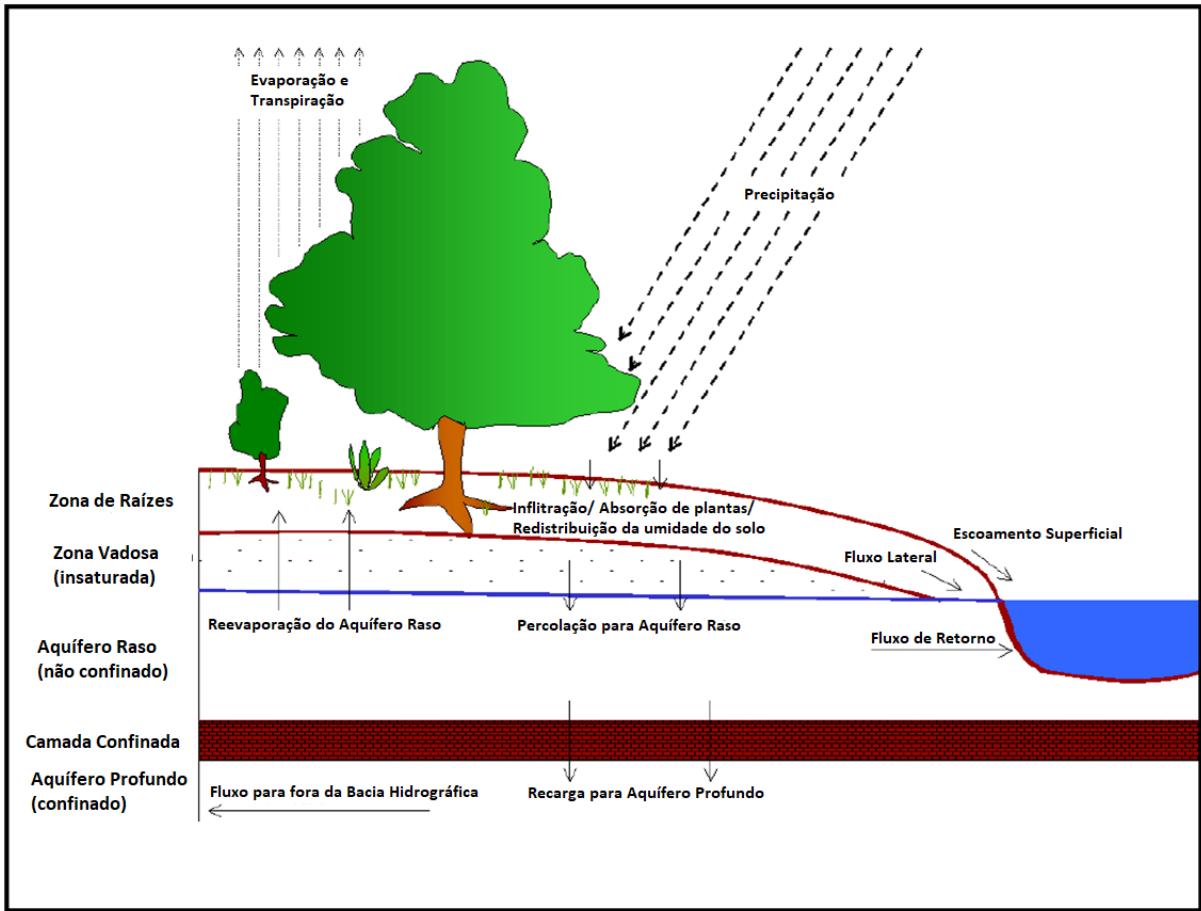


Figura 6. Representação esquemática do ciclo hidrológico (adaptado de NEITSCH et al., 2011).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se o desenvolvimento necessário para a aplicação dos modelos computacionais utilizados. Mostra-se como foi feita a aquisição e processamento dos dados ambientais e sua utilização na construção dos modelos.

3.1 SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT

O déficit de dados fluviométricos na região do ERPN relaciona-se ao fato de que, historicamente, o principal objetivo de se medir dados fluviométricos era para avaliar o potencial hidro energéticos dos rios, contudo, a maioria dos cursos d’água do Nordeste possuem regime intermitente e com baixo rendimento hídrico, fazendo com que os números de postos de medição sejam reduzidos, tendo assim poucos dados disponíveis. A disponibilidade destas séries de vazões fluviais com mais de 25 anos e sem falhas, são raras. Por outro lado, existem abundantes séries pluviométricas com mais de 80 anos de dados (SEMARNH, 2011).

A fim de estimar as descargas líquidas afluentes ao ERPN, o modelo hidrológico SWAT foi utilizado para simular um período de dez anos, abrangendo os anos de 2001 a 2011, devido à disponibilidade dos dados de entrada necessários ao modelo. A escolha de um modelo hidrológico frente às demais formas de estimativa de vazões, como modelos chuva-vazão, é a maior fidelidade à realidade, visto que características como uso, ocupação, tipo e declividade do solo são consideradas, bem como os principais processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Além disso, a intermitência dos rios dificulta a aplicação de modelos chuva-vazão, por não haver uma vazão de base.

Detalha-se a seguir o desenvolvimento da modelagem considerando etapas distintas do seu processo, como a modelagem digital do terreno, os dados referentes ao uso e ocupação do solo e as informações pedológicas e meteorológicas.

3.1.1 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

Determinar as características da superfície do terreno é o primeiro passo para a construção do modelo. Para esse estudo foram inseridos dados de elevação de terreno disponibilizados pela *United States Geological Survey – Earth Explorer - USGS*. A Figura 7 ilustra o mapa do modelo digital do terreno, utilizando o software Surfer 15.

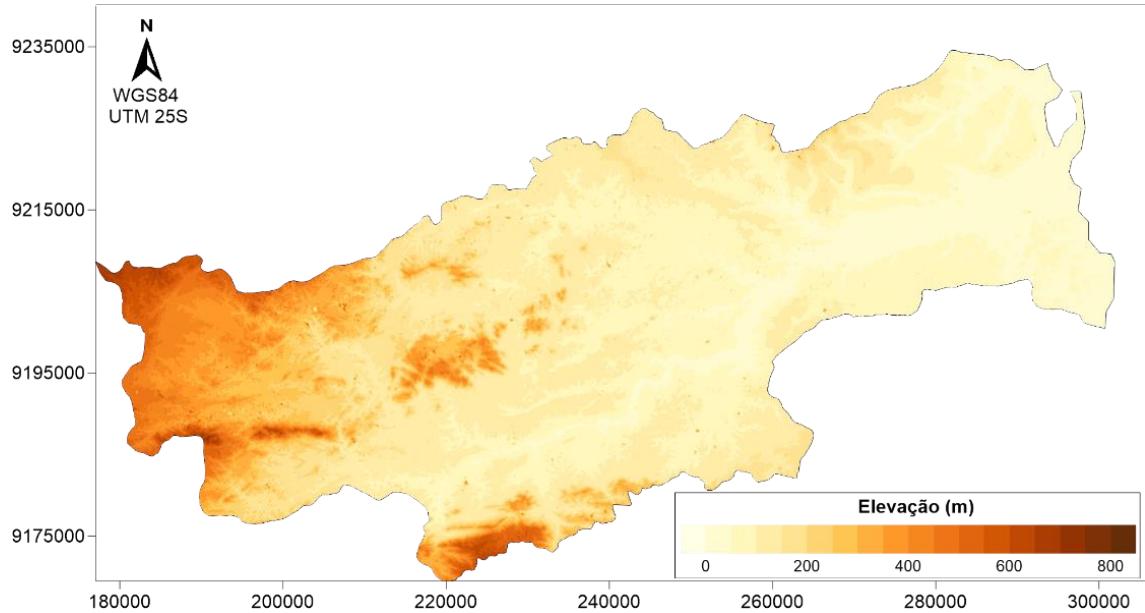


Figura 7. Modelo digital do terreno do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte.

A caracterização da hidrografia da região é feita a partir dos dados de elevação obtidos, gerando assim a delimitação da área da bacia, suas sub-bacias e a malha hidrográfica utilizada pelo modelo, conforme exibido na Figura 8 e Figura 9. No SWAT, a possibilidade de uma bacia hidrográfica poder ser fracionada em n sub-bacias permite que as propriedades particulares de cada região sejam analisadas separadamente. O modelo em questão gerou um total de 84 sub-bacias para o ERPN.

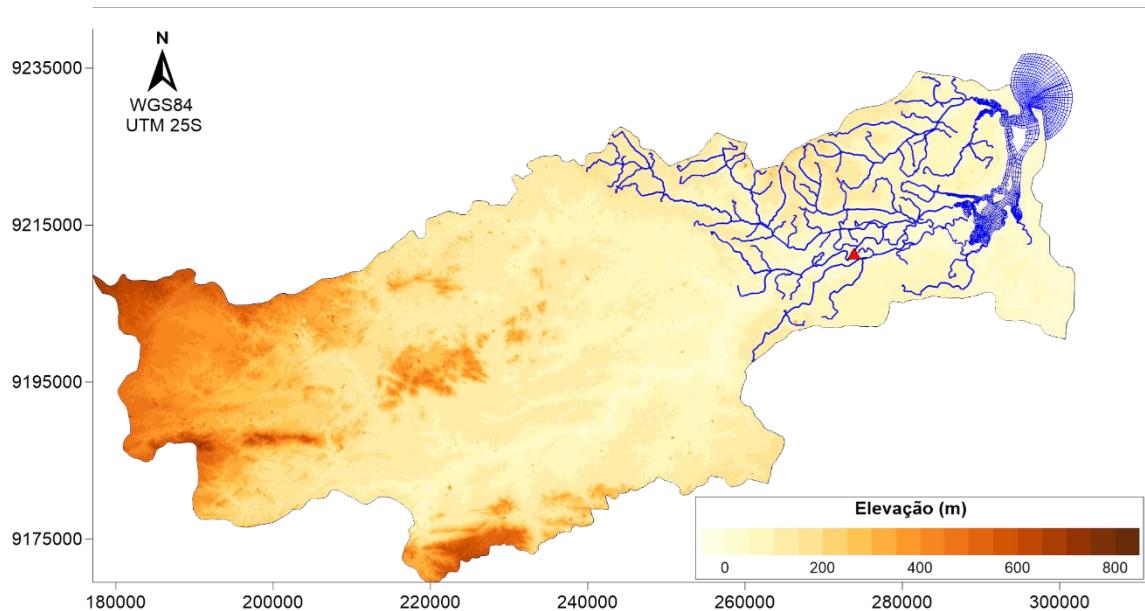


Figura 8. Rede de drenagem gerada no Baixo Curso do Rio Paraíba do Norte. Vê-se a malha de elementos finitos no trecho estuarino e zona costeira adjacente que são modeladas em detalhes com o SisBaHiA®. O triângulo vermelho indica a estação utilizada para calibração.

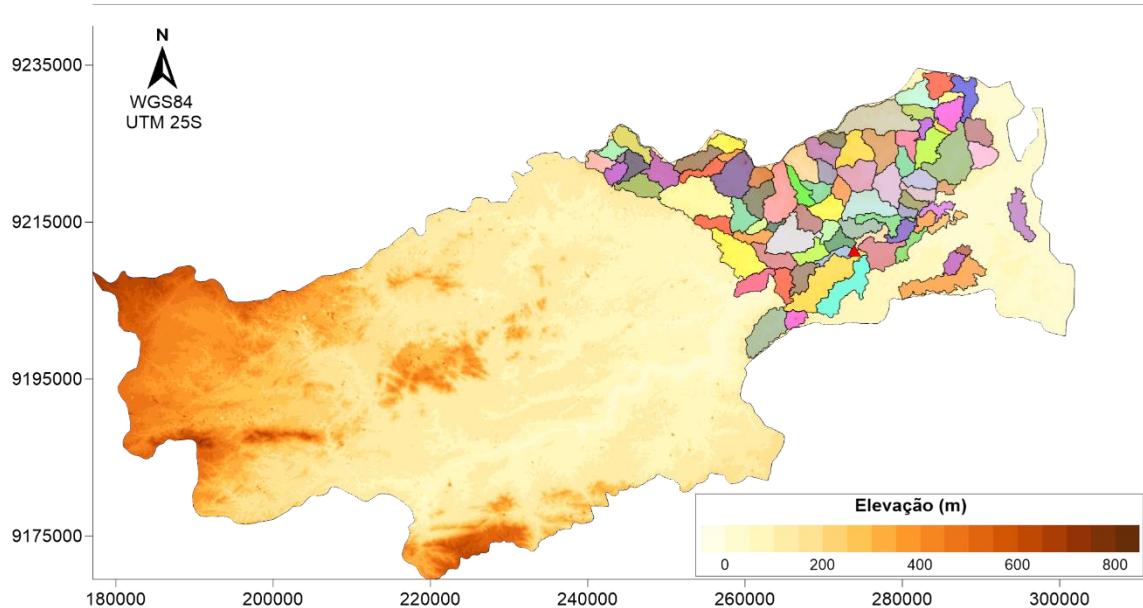


Figura 9. Identificação das 84 sub-bacias admitidas no modelo do ERPN.

3.1.2 MAPAS DE USO, OCUPAÇÃO E PEDOLÓGICO DO SOLO

Determinar como uma bacia hidrográfica explora e ocupa o solo é imprescindível para compreender os fluxos de água que compõem uma região. O solo exerce importância fundamental nos processos que integram o ciclo hidrológico, o que torna necessário o conhecimento do seu usos e tipos, pois estes irão influenciar nos processos de infiltração, transpiração, escoamento e outros.

Os dados de uso e ocupação do solo utilizados são provenientes do Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2014, com escala de 1:5.000.000, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Observando o mapa ilustrado na Figura 10, é notável a diferença dos usos nas margens do estuário quando comparadas às demais áreas da bacia hidrográfica. A margem esquerda é composta por áreas destinadas à agricultura e à pastagem. Enquanto na região leste predomina o uso urbano, com pequenas regiões de vegetação com atividade agrícola. Estas áreas destinadas à agricultura também englobam as áreas alagadas cultivadas.

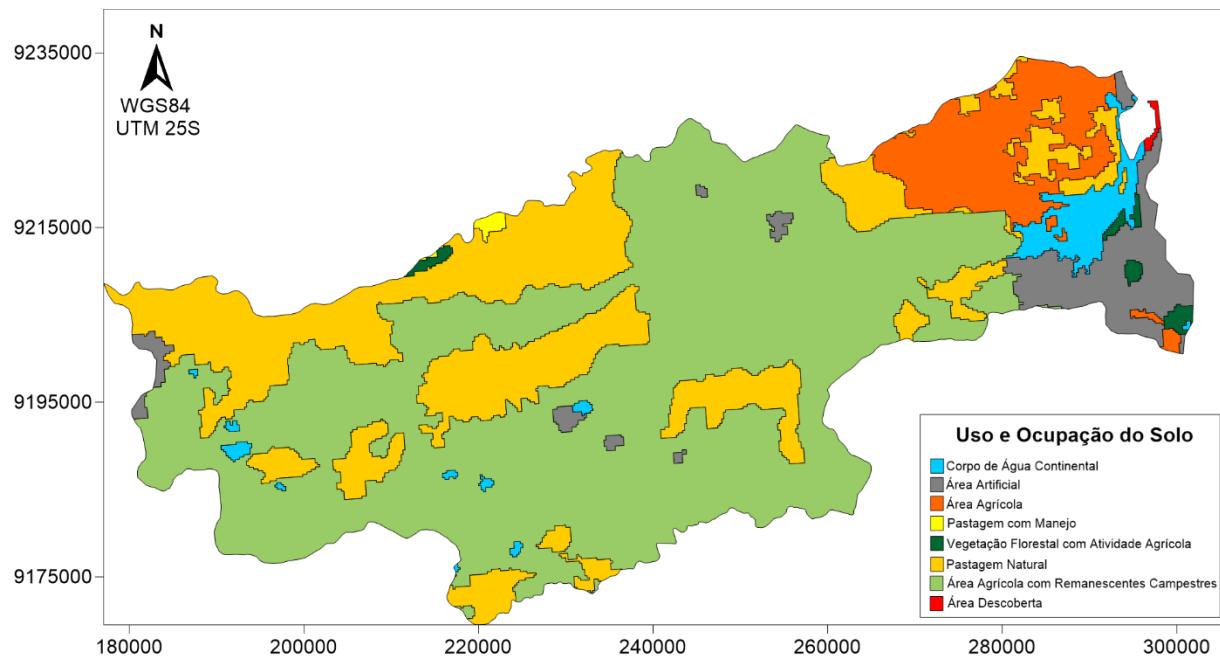


Figura 10. Mapa de Uso e Ocupação do Solo do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte. Nota-se os diferentes usos nas margens do estuário.

Os dados de tipo de solo da região foram obtidos por meio da plataforma INDE, com escala do mapa de 1:250.000. A inserção desses dados no modelo requer um pré-processamento onde é feita uma correlação das características dos tipos de solo brasileiro com o padrão norte-americano da *Food and Agriculture Organization* - FAO. A Tabela 4 apresenta a correlação definida para os tipos de solo utilizados na modelagem do ERPN citada acima.

Tabela 4. Correlação dos tipos de solo da FAO com os solos disponibilizados na plataforma INDE.

Numeração	FAO	Nome (ERPN)
193	Rock	Área Urbana
3276	Vertisols	Vertissolos
5363	Acrisols	Argissolos
5490	Gleysols	Gleissolos
5553	Fluvisols	Neossolos Flúvicos
5620	Nitosols	Nitossolos
5626	Arenosols	Neossolos quartzarênicos
5626	Arenosols	Neossolo Lítico
5651	Dystric Regosols	Neossolos Regolíticos Distrófico
5662	Eutric Regosols	Neossolos Regolíticos Eutrófico
5785	Luvisols	Luvissolos
5820	Planosols	Planossolos
6997	Water Bodies	Corpo d'água continental

Os seguintes parâmetros físicos e químicos são fornecidos ao modelo: classe do solo (SNAM), número de horizontes do solo (NLAYERS), grupo hidrológico do solo (HYDGRP), densidade

(SOL_BD), porosidade (ANION_EXCL), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), capacidade de água disponível (SOL_AWC), teor de carbono (SOL_CBN), areia (SAND), argila (CLAY), silte (SILT) e rocha (ROCK), profundidade de raiz (SOL_ZMX), profundidade de cada horizonte (SOL_Z), albedo (SOL_ALB) e erodibilidade (USLE_K).

A análise do mapa pedológico representando na Figura 11 permite identificar a predominância de área urbana na margem leste do estuário, ou seja, é um solo mais impermeável que os demais. Em contrapartida, na margem oposta há maior ocorrência do tipo Gleissolos, que são solos com características minerais, formados por sedimentos não consolidados composto por argila e argila-arenosa e em alguns casos matéria orgânica. Nestes solos o lençol freático está localizado muito próximo a superfície, sendo solos típicos de mangue (EMBRAPA, 2011).

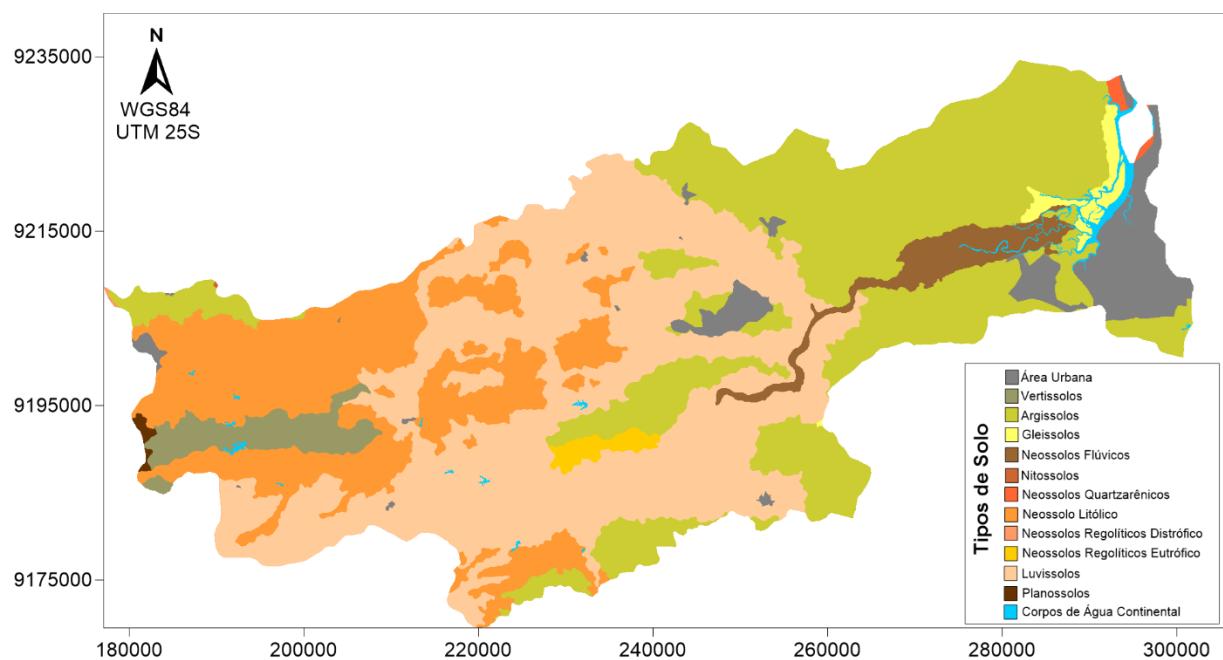


Figura 11. Mapa Pedológico do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Norte. Nota-se a impermeabilização do solo na margem direta do estuário.

Após serem computadas estas informações, o SWAT delimitou as Unidades de Resposta Hidrológica – HRU's, que são subdivisões das sub-bacias onde são calculados separadamente os resultados das simulações hidrológicas. Essas unidades possuem características similares quanto ao tipo de solo, uso, ocupação e declividade do terreno. Assim, para a definição das HRU's, foram classificados os usos do solo, seu tipo e as classes de declividade.

3.1.3 DADOS METEOROLÓGICOS

Os parâmetros meteorológicos utilizados neste trabalho foram obtidos pelo modelo de reanálise *Climate Forecast System Reanalysis – CFSR*, disponibilizados pelo *Global Weather Data for SWAT* e pela Agência Nacional de Águas – ANA.

O período de abrangência dos dados variou de 2001 a 2011, e os seguintes parâmetros foram empregados: temperatura (° C), precipitação (mm), ventos (m/s), umidade relativa do ar (fração) e radiação solar (MJ/m²). Apenas os dados de precipitação são provenientes da ANA, enquanto os demais do CFSR. As localizações das estações pluviométricas da ANA utilizadas nesse trabalho podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5. Localização das estações pluviométricas da ANA utilizadas para inserir os dados de precipitação no modelo SWAT.

Nome da Estação	Coordenadas (latitude/longitude)	
Ponte da Batalha	-07° 07' 48"	-35° 02' 51"
Engenho Santana	-07° 10' 22"	-35° 08' 51"
Pilar	-07° 16' 00"	-35° 17' 00"
Guaritas	-07° 20' 04"	-35° 22' 22"

3.2 SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL – SisBaHiA®

Nesta seção são abordadas as etapas necessárias para construção de cada modelo utilizado no SisBaHiA®, são eles: modelos hidrodinâmicos, modelos de transporte euleriano, modelos de transporte lagrangeano e modelos de qualidade da água.

3.2.1 MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO

Aqui são apresentadas as características necessárias para a construção do modelo digital de terreno, i.e., para representação da superfície terrestre. Incluindo o domínio considerado para a modelagem, a malha construída, a batimetria da região (incluindo áreas alagáveis) e a caracterização do fundo.

3.2.1.1 DOMÍNIO DE MODELAGEM

Na modelagem, o domínio de interesse representa os limites terrestres e abertos da região que pretende ser estudada. Os contornos terrestres englobam desde as margens do estuário, como seções de rios e ilhas inseridas na região. Enquanto o contorno aberto, ou de água, delimita a

área que não possui contorno físico, i.e., com fluxos de água, como a entrada do estuário e regiões costeiras.

Os contornos da região de interesse foram feitos utilizando imagens do Google Earth Pro datadas em 2017, incluindo os seguintes afluentes do ERPN: Sanhauá, Mandacaru, Tambiá, Ribeira, Caboco, Mangebeira e rio da Estiva, bem como áreas alagáveis (manguezais) e parte do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha. De posse de tais contornos, obteve-se o mapa base por meio do Surfer 15, conforme Figura 12.

A delimitação das regiões sob efeito de alagamento e secamento, como áreas de manguezais e bancos de areias, foram feitas com base no trabalho de Araújo (2014), exposto na Figura 1 e em imagens de Google Earth Pro datadas de 2017.

A discretização do domínio de modelagem é feita utilizando elementos finitos quadráticos, podendo-se usar elementos quadráticos ou triangulares, com 9 e 6 nós respectivamente. A malha do modelo em questão apresentou 15555 nós de cálculo, contidos em um total de 3864 elementos, onde 3385 são quadrangulares e 479 são triangulares, conforme Figura 12. A construção da malha priorizou um detalhamento nos canais principais dos rios afluentes ao rio Paraíba, nos canais de acesso ao Porto de Cabedelo e nas praias adjacentes a embocadura do estuário. O motivo é propiciar um melhor detalhamento das correntes hidrodinâmicas.

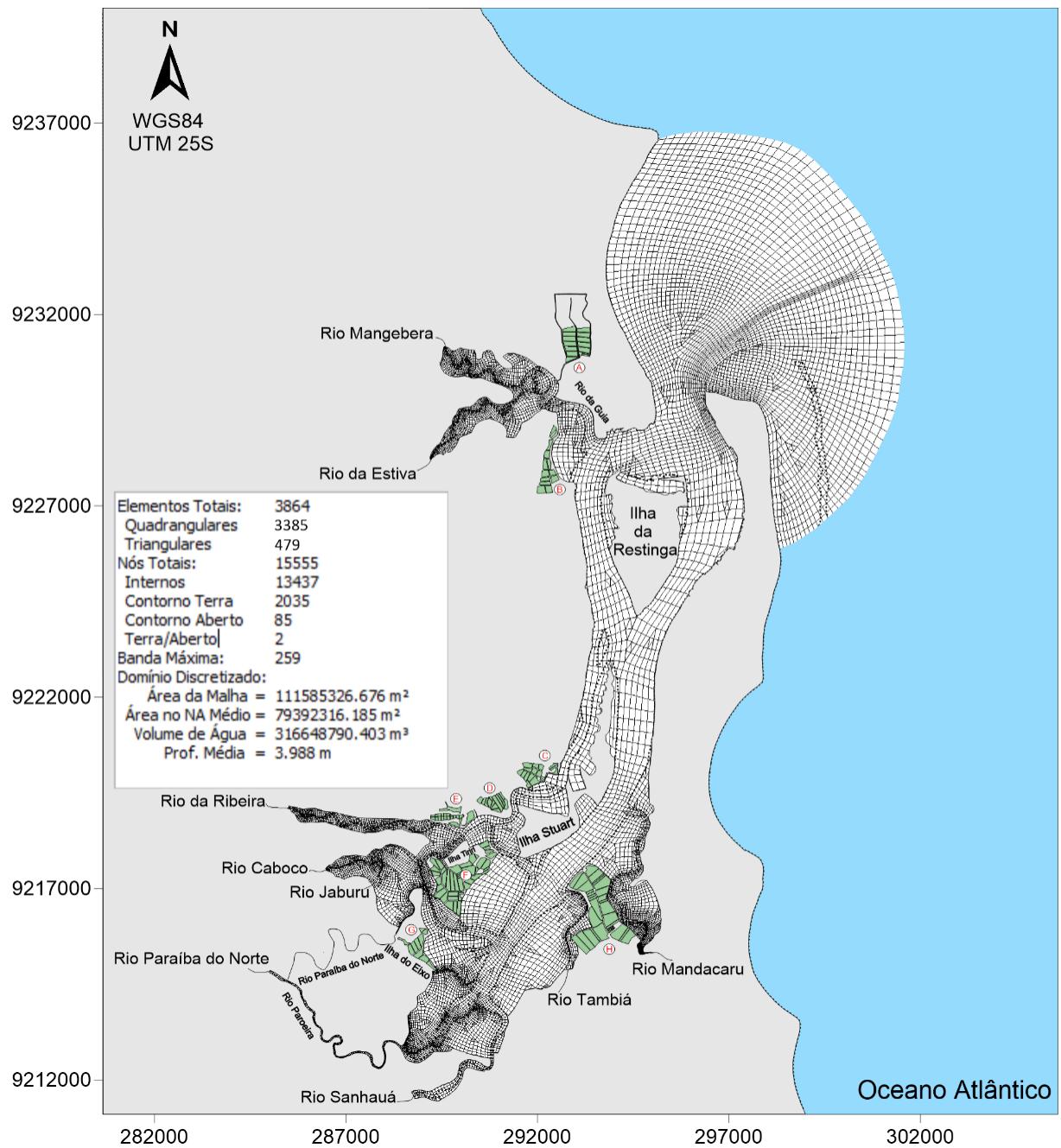


Figura 12. Malha de elementos finitos utilizada na discretização do domínio de modelagem. O contorno paralelo a praia delimita a região do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha. Os empreendimentos de carcinicultura estão representados de verde e com a respectiva nomenclatura adotada para este trabalho. Coordenadas UTM WGS84 setor 25M.

3.2.1.2 BATIMETRIA

Para inserir os dados batimétricos na malha, foram utilizados dados provenientes de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN, sendo elas: Porto de Cabedelo nº 806 (escala 1:15.000) e Proximidades do Porto de Cabedelo nº 806 (escala 1:50.000). A batimetria dos canais aquaviários do Porto de Cabedelo foi cedida pelo Instituto Virtual de Mudanças Globais - IVIG, referente a medições realizadas em janeiro de 2014.

Devido à escassez e/ou inexistência de dados batimétricos na região dos rios afluentes ao ERPN, estas cotas foram determinadas considerando as premissas sobre estabilidade de canais de maré de Metha (1976 *apud* Pinto, 1999), onde há uma relação entre largura e profundidade das menores seções transversais, sendo estas obtidas pelo autor por meio de observações de canais de maré estáveis e de resultados de modelos de laboratório, conforme Figura 13.

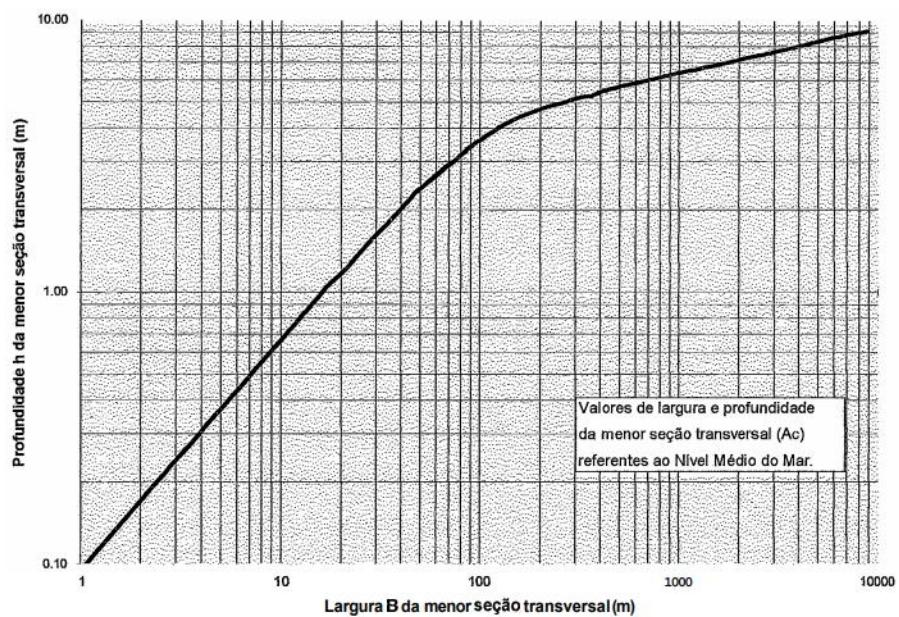


Figura 13. Relação entre largura e profundidade da menor seção transversal para canais de maré (METHA, 1976 *apud* Pinto, 1999).

Guedes (2002), realizou um levantamento batimétrico no canal principal do estuário onde observou profundidades de 5 metros nas desembocaduras dos rios Mandacaru e Tambiá, enquanto a desembocadura do rio da Guia apresentou profundidades em torno de 8 metros.

Para caracterizar a batimetria das regiões alagáveis, como os manguezais e recifes de corais, as seguintes considerações foram assumidas:

- O limite máximo de extensão dos manguezais possui cota igual à média das preamarés de sizígia;
- O limite de contato entre os cursos d'água e os mangues possui cota igual à média das preamarés de quadratura;
- A região do PEMAV possui cota 1 m acima do Nível de Referência – NR, o que representa o afloramento dos recifes nos períodos de baixa-mar.

A Figura 14 apresenta a batimetria do domínio de modelagem, que está referenciada ao nível de redução da Carta Náutica nº 830.

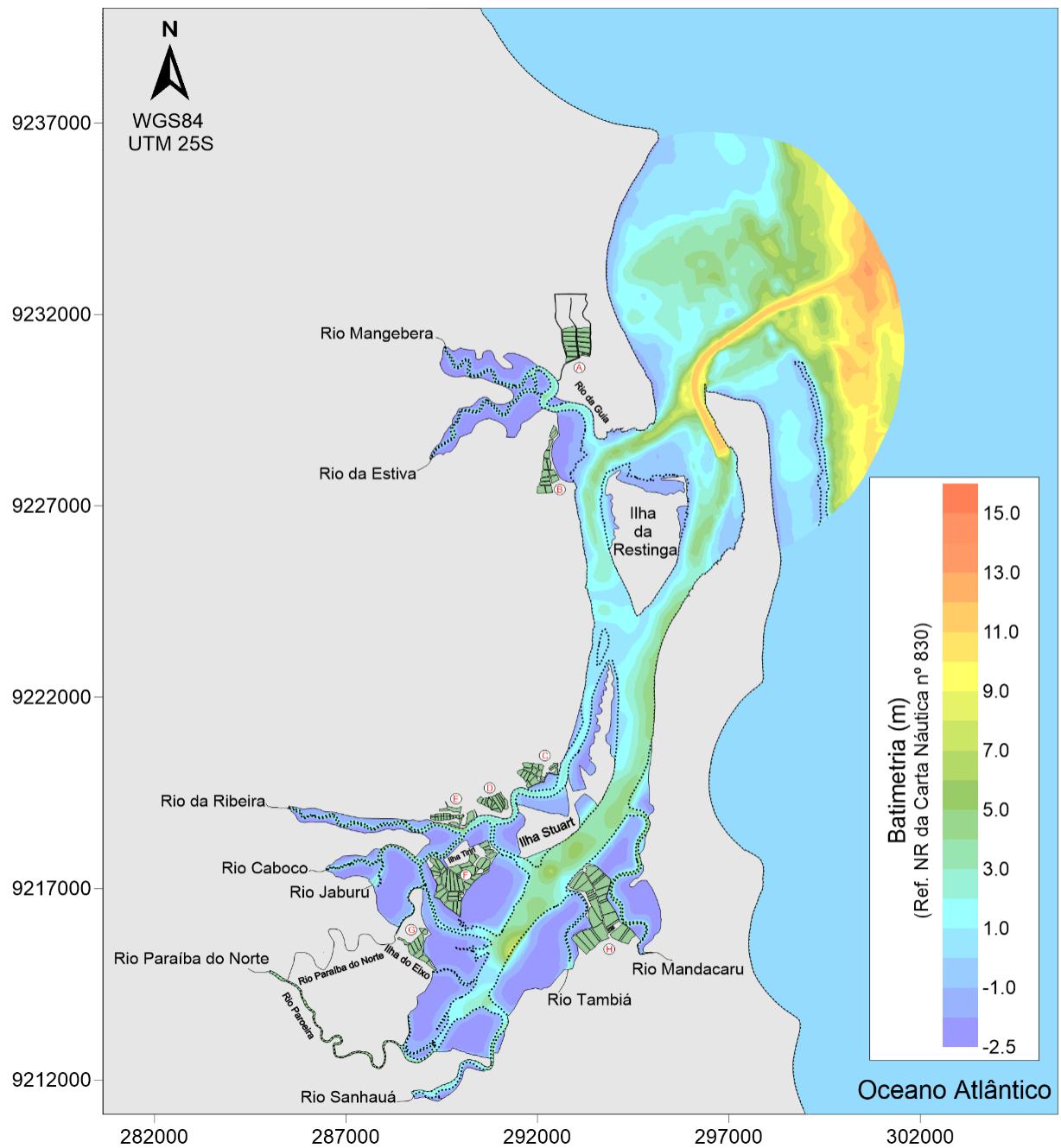


Figura 14. Batimetria do domínio de modelagem, referenciada à Carta Náutica 830 da DHN.

3.2.1.3 RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE FUNDO

A rugosidade equivalente de fundo é o parâmetro que representa a resistência exercida pelo fundo no escoamento. Estes parâmetros são influenciados pela granulometria dos sedimentos, pela ação das ondas e pelo relevo do terreno.

Neste trabalho, a amplitude de rugosidade adotada, sem os efeitos de ondas, foi inferida a partir da distribuição granulométrica do fundo, realizada por Silva *et al.* (2018), conforme sugerido por Rosman (2019).

A metodologia utilizada pelos autores acima é baseada no uso da modelagem computacional para determinar a granulometria de fundo da área de interesse. Para isso, é necessário um estudo prévio da hidrodinâmica da área. O modelo hidrodinâmico com fundo móvel faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, calculando ao longo do tempo o transporte de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos. O padrão de ocorrência de tensões no fundo é indicativo do tipo de sedimento passível de existir em determinada área, pois as tensões críticas de mobilidade de cada tipo de sedimento são conhecidas em literatura. Considerando uma certa classe de sedimentos, se a tensão crítica de mobilidade para este tipo de sedimento for frequentemente excedida em uma região, dificilmente este tipo de sedimento estará presente nesta região, pois o mesmo será transportado para outro local.

Assim, os valores de rugosidade equivalente de fundo são adotados através de uma aproximação seguindo os valores sugeridos por Rosman (2019), e adaptados de Abbot e Basco (1989), conforme Figura 15.

Leito de sedimentos com rugas e similares	
Predominância de siltos e finos	$0.0001m < \epsilon < 0.0100m$
Predominância de areias finas	$0.0070m < \epsilon < 0.0150m$
Predominância de areias médias	$0.0100m < \epsilon < 0.0300m$
Predominância de areias grossas	$0.0250m < \epsilon < 0.0500m$
Predominância de areias muito grossas	$0.0400m < \epsilon < 0.0800m$
Predominância de areias com cascalho	$0.0500m < \epsilon < 0.1200m$
Sedimentos com vegetação	$0.0500m < \epsilon < 0.1500m$
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	$0.1500m < \epsilon < 0.4000m$
Fundo de pedra ou rochoso	
Fundo de alvenaria	$0.0003m < \epsilon < 0.0010m$
Fundo de pedra lisa	$0.0010m < \epsilon < 0.0030m$
Fundo de asfalto ou similar	$0.0030m < \epsilon < 0.0070m$
Fundo com pedregulho ($d_{50} < 3$ cm)	$0.0070m < \epsilon < 0.0150m$
Fundo com pedras médias ($d_{50} < 8$ cm)	$0.0150m < \epsilon < 0.0400m$
Fundo com pedras ($d_{50} < 20$ cm)	$0.0400m < \epsilon < 0.1000m$
Fundo com rochas ($d_{50} < 50$ cm)	$0.1000m < \epsilon < 0.2500m$
Fundo de Concreto:	
Fundo de concreto liso	$0.0001m < \epsilon < 0.0005m$
Fundo de concreto inacabado	$0.0005m < \epsilon < 0.0030m$
Fundo de concreto antigo	$0.0030m < \epsilon < 0.0100m$

Figura 15. Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, ϵ . Tabela extraída da Ref. Técnica do SisBaHiA®, v. ROSMAN (2019), adaptado de ABBOTT e BASCO (1989).

Os resultados obtidos por Silva *et al.* (2018), bem como informações disponíveis na carta náutica nº 830, sugerem que ao sul do estuário e no interior dos rios afluentes predomina a

presença de siltes e finos, enquanto na região central, até sua embocadura, há predominância de areias médias. As maiores rugosidades são encontradas nos manguezais e nos recifes de corais, devido à presença de sedimentos com vegetação e leitos rochosos, respectivamente. Nas praias adjacentes à saída do estuário encontram-se fundos compostos por areias médias e grossas, além da presença dos recifes de corais que se estendem do PEMAV até a costa. A Figura 16 ilustra a variação no domínio de modelagem abordada acima.

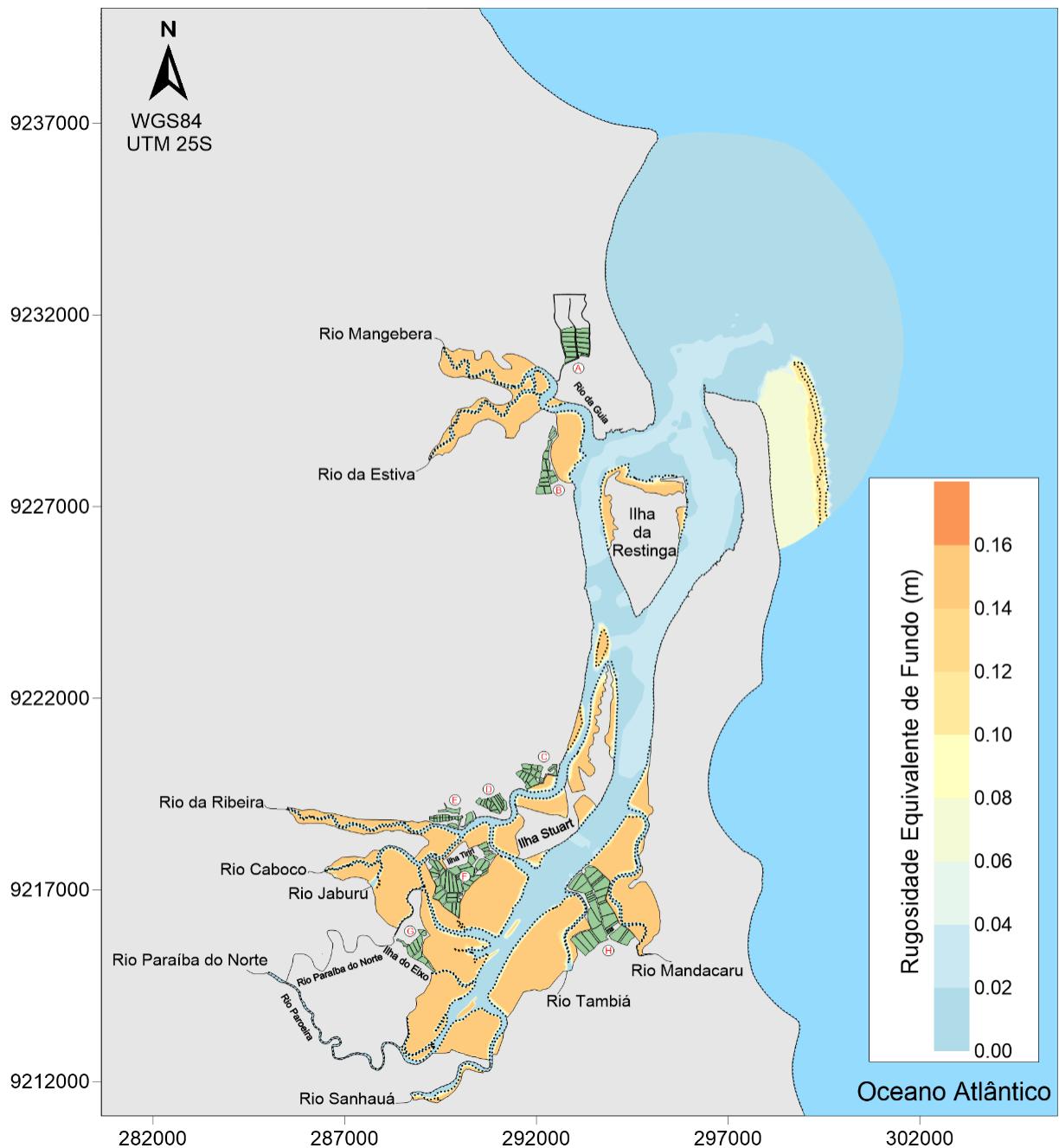


Figura 16. Amplitude da rugosidade equivalente de fundo do estuário do rio Paraíba do Norte utilizada no domínio de modelagem. Os manguezais e os recifes de corais apresentam rugosidade elevada.

3.2.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Nesta seção são apresentados os cenários de modelagem propostos, como também a análise e interpretação das forçantes necessárias para construção dos modelos hidrodinâmicos, como níveis de maré, ventos e descargas fluviais.

3.2.2.1 CENÁRIOS DE MODELAGEM

Para uma melhor caracterização dos padrões de circulação hidrodinâmica, é importante representar o efeito da sazonalidade na modelagem, i.e., considerar diferentes padrões de ventos, marés e vazões fluviais.

A região de estudo não possui uma variabilidade climática distinta entre as estações do ano, assim, a forçante com maior representatividade de sazonalidade é a descarga fluvial. Diante disso, a escolha dos períodos de simulação ocorreu de acordo com os meses de maiores e menores vazões afluentes.

O primeiro cenário proposto foi o representativo de períodos de cheias fluviais, incluindo os meses de março, abril e maio de 2017, e o segundo cenário adotado foi o representativo de períodos de seca, incluindo neste, os meses de outubro, novembro e dezembro de 2017.

Assim, teremos:

- Cenário representativo de cheia – CNC: 01/03/2017 à 31/05/2017.
- Cenário representativo de seca – CNS: 01/10/2017 à 31/12/2017.

3.2.2.2 DADOS OCEANOGRÁFICOS

A seguir são descritas as forçantes inseridas no modelo hidrodinâmico, são elas: níveis de maré, ventos e vazões fluviais.

- Níveis de maré

Na região de estudo, as marés são as principais responsáveis pela circulação hidrodinâmica, pois os ventos e as ondas são forçantes que apresentam comportamento secundário no local. A diferença de nível causada pelo efeito das marés, gera forças relevantes para o movimento das águas no estuário, se estendendo por todo domínio de modelagem.

Os níveis de maré inseridos como condicionantes na fronteira aberta com o mar foram obtidos a partir do conjunto de constantes harmônicas do Porto de Cabedelo, disponibilizadas pela Fundação FEMAR e expostas em ordem de magnitude na Tabela 6. Tais constantes são referidas a medições de maré durante um período de 365 dias entre 31 de janeiro de 1981 e 31 de janeiro de 1982.

Tabela 6. Tabela de constantes harmônicas da FEMAR, ordenadas por amplitude decrescente, da estação Porto de Cabedelo, e seus respectivos valores de amplitude e fase.

Constante	Amplitude (m)	Fase (grau)	Constante	Amplitude (m)	Fase (grau)
M2	0.805	123	Mu2	0.024	121
S2	0.283	142	<u>Mf</u>	0.019	344
N2	0.168	113	T2	0.016	125
Sa	0.085	91	P1	0.015	230
K2	0.079	134	Q1	0.012	126
O1	0.051	161	MS4	0.012	21
K1	0.048	232	M4	0.008	334
<u>Ssa</u>	0.043	39	M3	0.006	147
Nu2	0.035	110	MO3	0.003	156
2N2	0.027	101	MK3	0.002	319
L2	0.026	119			

A Figura 17 sobrepõe a variação do nível de água calculada pelo modelo para o mês de março de 2017 no cais do Porto de Cabedelo e a previsão de maré para o período nesse mesmo ponto. Nota-se que o modelo reproduziu bem a maré prevista para a região. A maré na região estudada possui características semidiurnas, ou seja, com uma periodicidade de cerca de 12,42 h. Durante a sizígia, as alturas de maré são frequentemente maiores que 2,5 m, enquanto que nas quadraturas não ultrapassa 2 m, conforme exposto na Figura 17. Na região estudada não há defasagem da maré na fronteira aberta, visto que, nessa região a maré possui a mesma fase em todos os lugares.

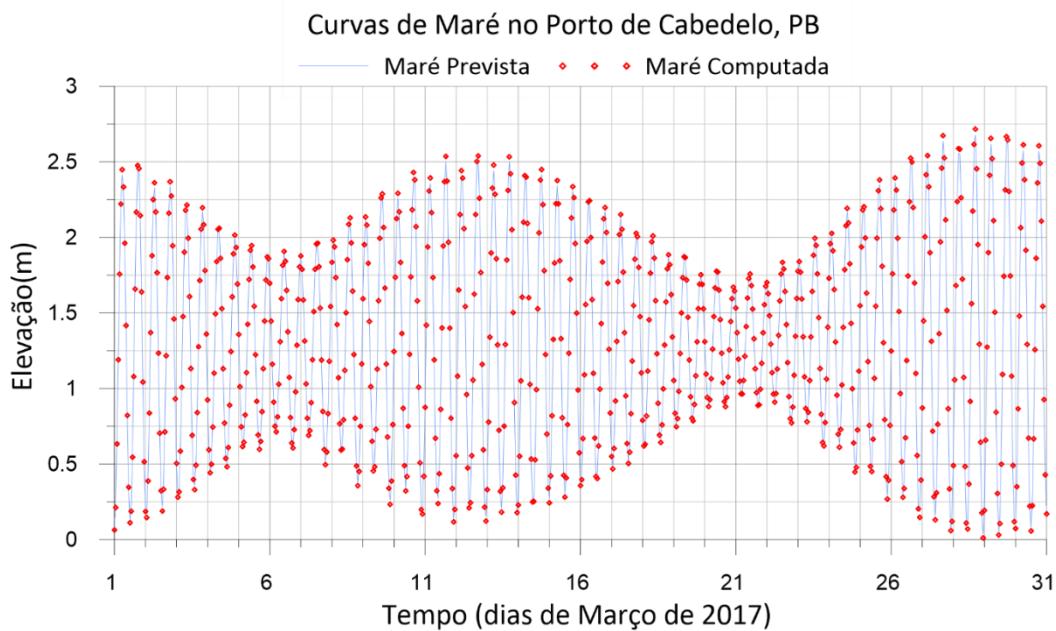


Figura 17. Comparação entre a previsão de maré e os níveis de água calculados pelo modelo hidrodinâmico no cais do Porto de Cabedelo para o mês de março (01/03 a 31/03/2017).

Ressalta-se que a previsão de maré obtida a partir das constantes harmônicas da FEMAR foi comparada com uma série gerada a partir de constantes harmônicas do modelo global FES2014 - *Finite Element Solution*. Os resultados encontrados foram praticamente idênticos. Dado o resultado obtido por meio desta comparação, bem como o período de 365 dias de medição, assumiu-se que o dado de maré considerando as constantes harmônicas da FEMAR é confiável.

- Ventos

O efeito do vento na circulação estuarina ocorre devido ao atrito gerado entre o vento e a superfície da água, o que causa uma transferência de energia cinética e consequentemente a movimentação da camada superficial da água. Esta é considerada uma circulação apenas horizontal, por não possuir efeitos em maiores profundidades.

Os ventos fornecidos ao modelo foram obtidos pelo modelo de reanálise de atmosférica global ERA-Interim, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF. Os dados utilizados, obtidos em grade regular de $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ com resolução temporal de 3h, representam o vento a 10 m de altura. Foram consideradas seis estações, mostradas na Figura 18. As séries temporais de vento obtidas em cada estação foram interpoladas para os nós da malha do modelo hidrodinâmico, a fim gerar o campo de vento para todo o domínio.

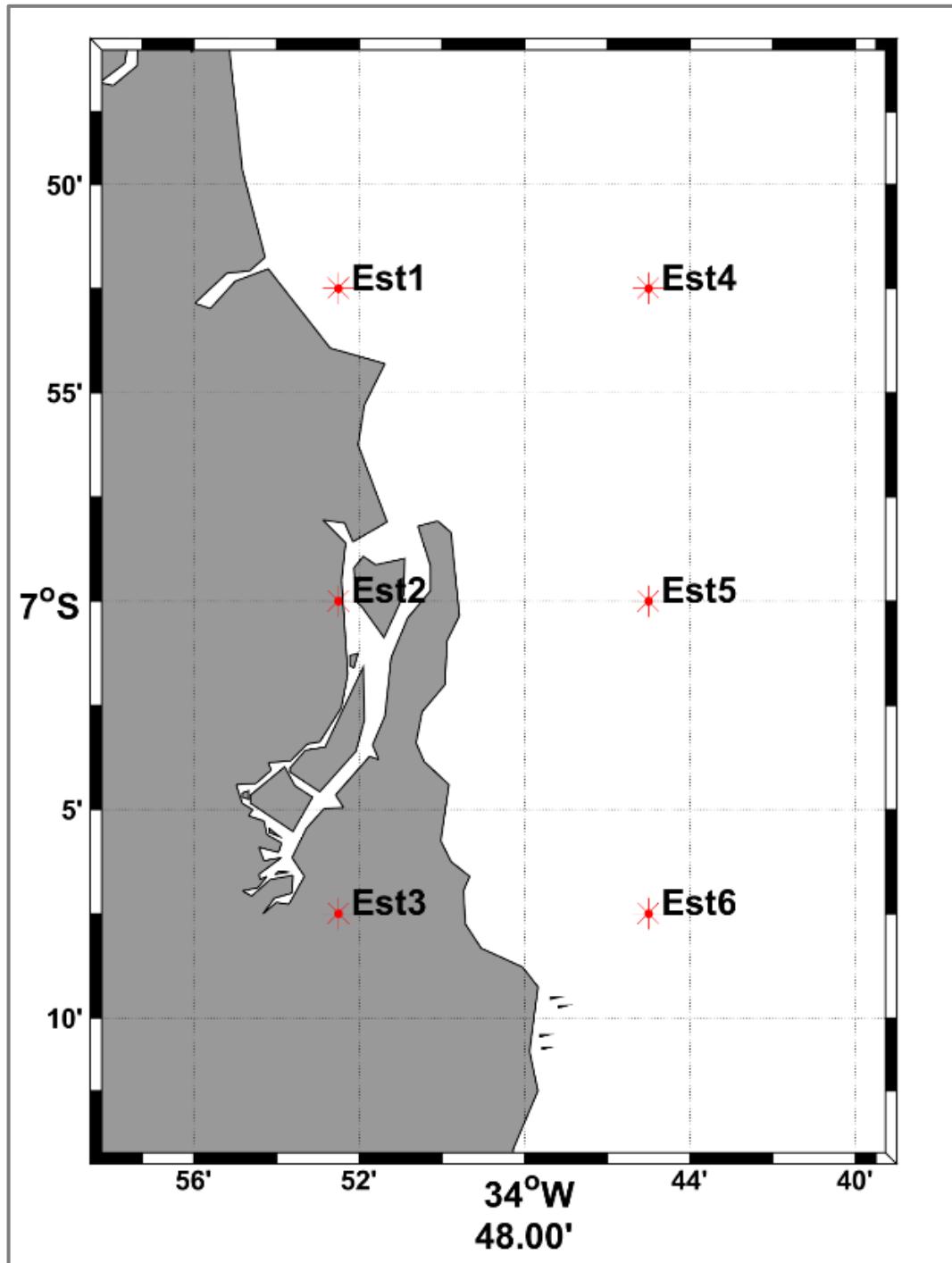


Figura 18. Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico ERA-Interim do ECMWF, nos quais foram extraídas as séries temporais de ventos utilizadas como forçantes atmosféricas para o modelo hidrodinâmico.

A análise das séries temporais dos ventos, mostradas na Figura 19, expõe que a direção predominante na região é de sudeste, sendo esta uma característica marcante da região, pois encontra-se sob o regime dos ventos alísios. Quanto à magnitude da velocidade, as estações mais afastadas da costa possuíram maior intensidade (Estações 4 e 5).

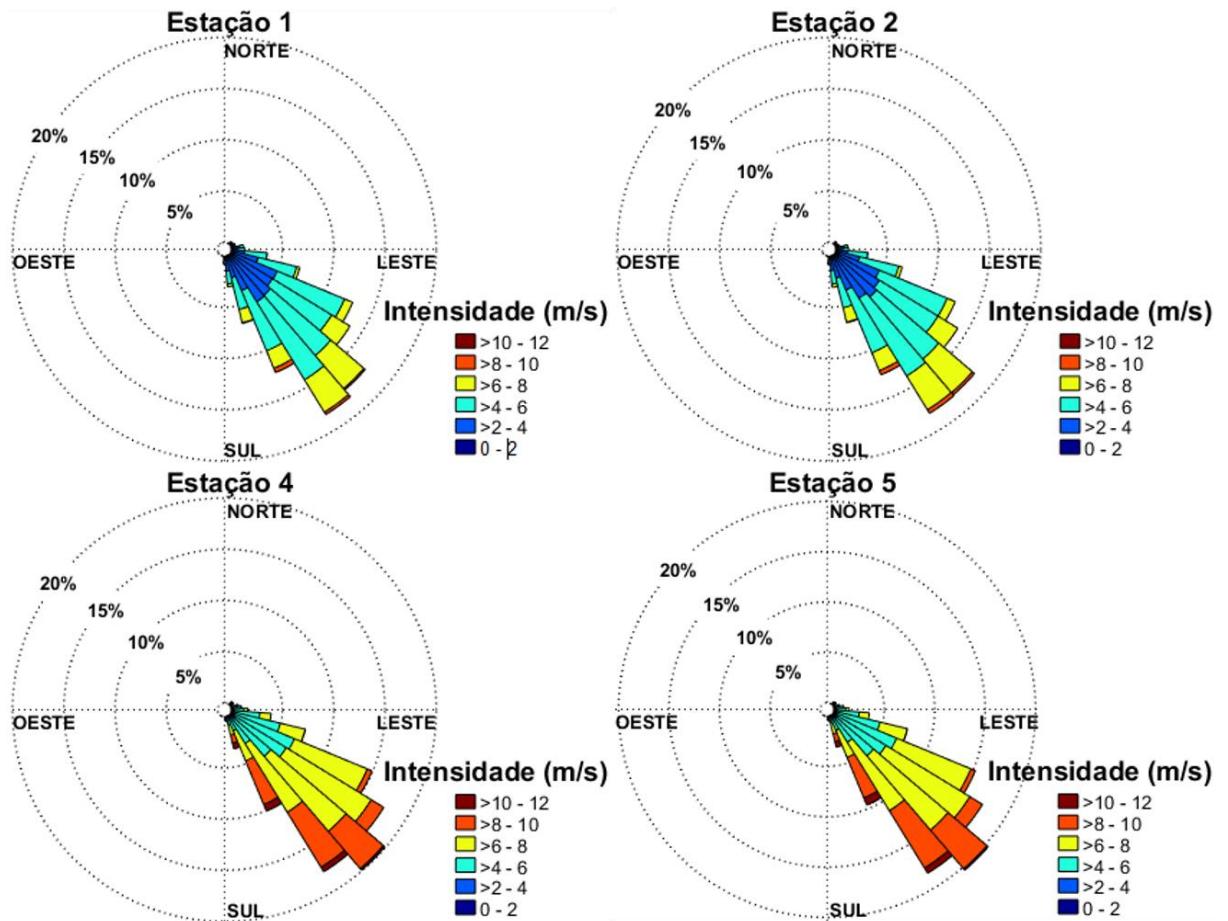


Figura 19. Rosa dos ventos para as Estações 1, 2, 4 e 5, para o período de 365 dias (01/01/2017 a 31/12/2017) com informações sobre direção, intensidade e frequência de ocorrência de ambos.

A análise sazonal dos ventos (Figura 20 e Figura 21) para os meses de março e novembro, cada qual representando um cenário proposto, confirma as características já expostas anteriormente quanto a sua direção e intensidade, com velocidades máximas atingindo 10,2 m/s no mês de novembro. Em ambos os cenários, não há variações significativas do comportamento do vento.

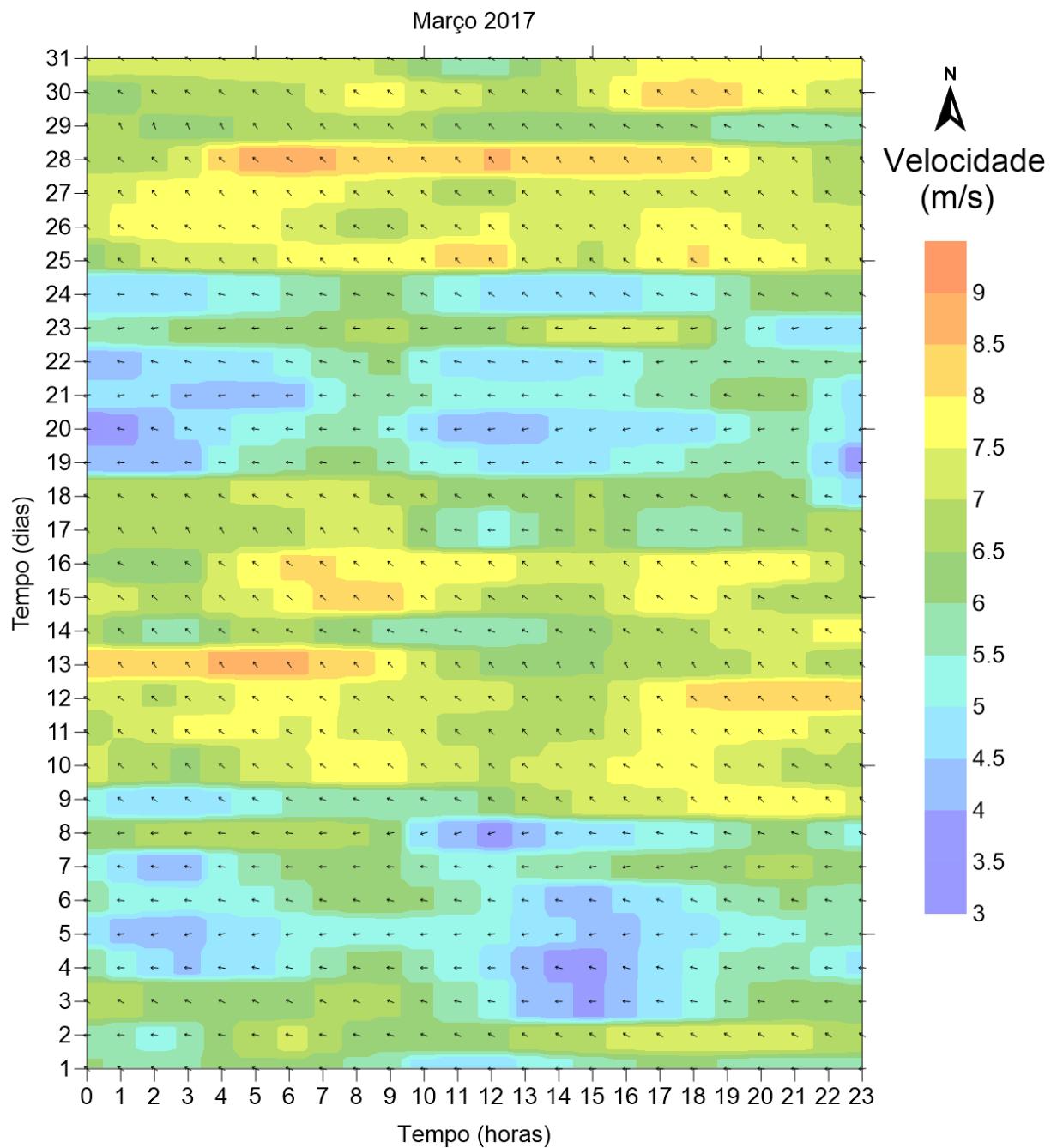


Figura 20. Dados de ventos representativos do mês de março de 2017, obtidos com dados da Estação 1. As setas e os padrões de cores são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.

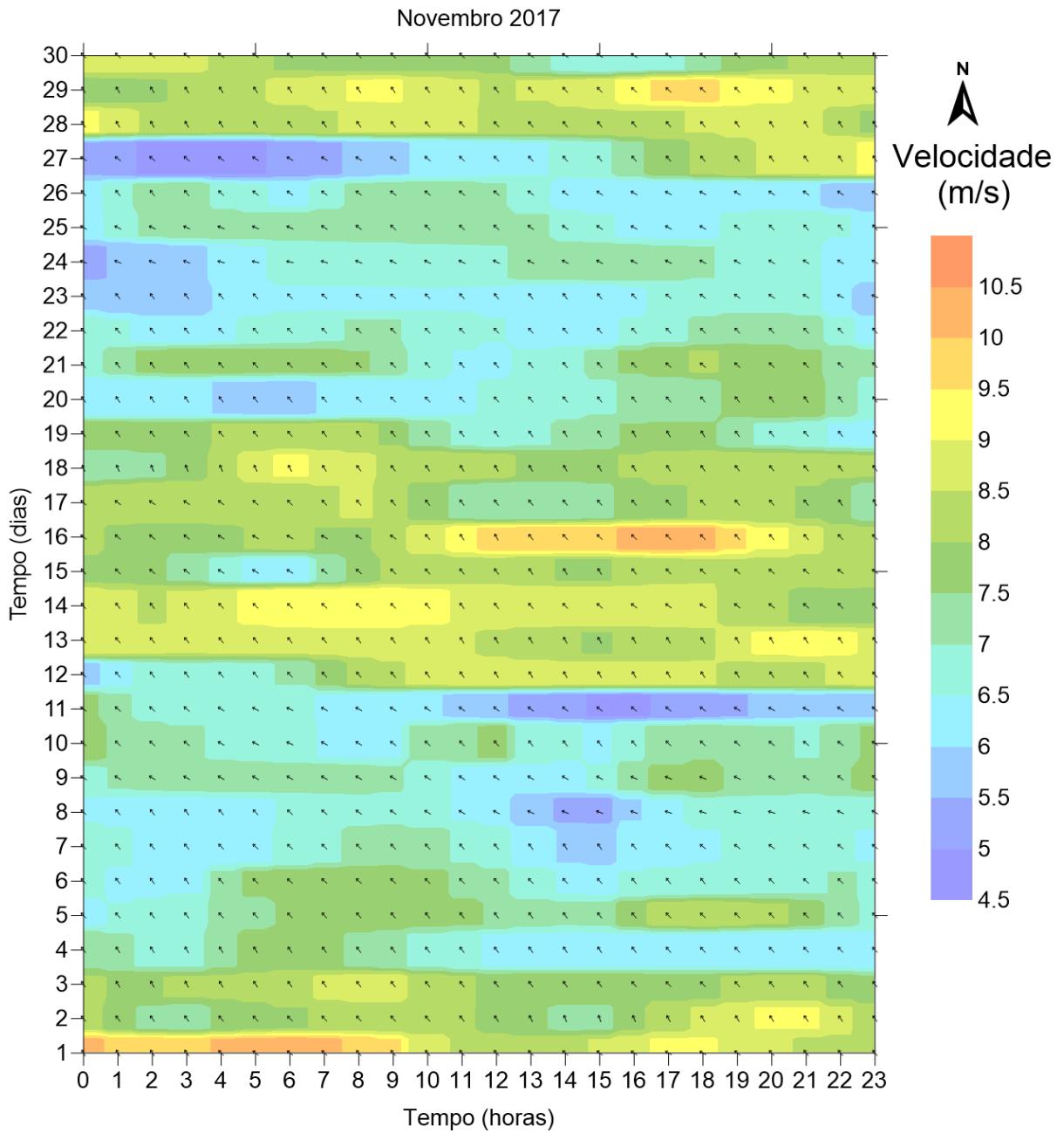


Figura 21. Dados de ventos representativos do mês de novembro de 2017, obtidos com dados da Estação 1. As setas e os padrões de cores são proporcionais ao módulo da velocidade e a direção das setas indicam a direção do vento.

- Vazões Fluviais

Conforme exposto anteriormente em 3.1, optou-se por determinar as vazões dos rios afluentes por meio do SWAT. Os resultados obtidos com o modelo hidrológico foram inseridos como condições de contorno no SisBaHiA®, assumindo uma variação horária. A localização dos nós onde o aporte de água foi considerado está exibida na Figura 22.

Ressalta-se que o modelo hidrológico não gerou séries de vazões para o rio Tambiá, devido a este possuir uma sub-bacia hidrográfica muito pequena, não sendo captada pelo SWAT, que é

um modelo usado preferencialmente para grandes bacias hidrográficas. Para contornar isto, as vazões afluentes adotadas foram idênticas a do rio Mandacaru, o mais próximo e com características similares ao rio Tambiá.

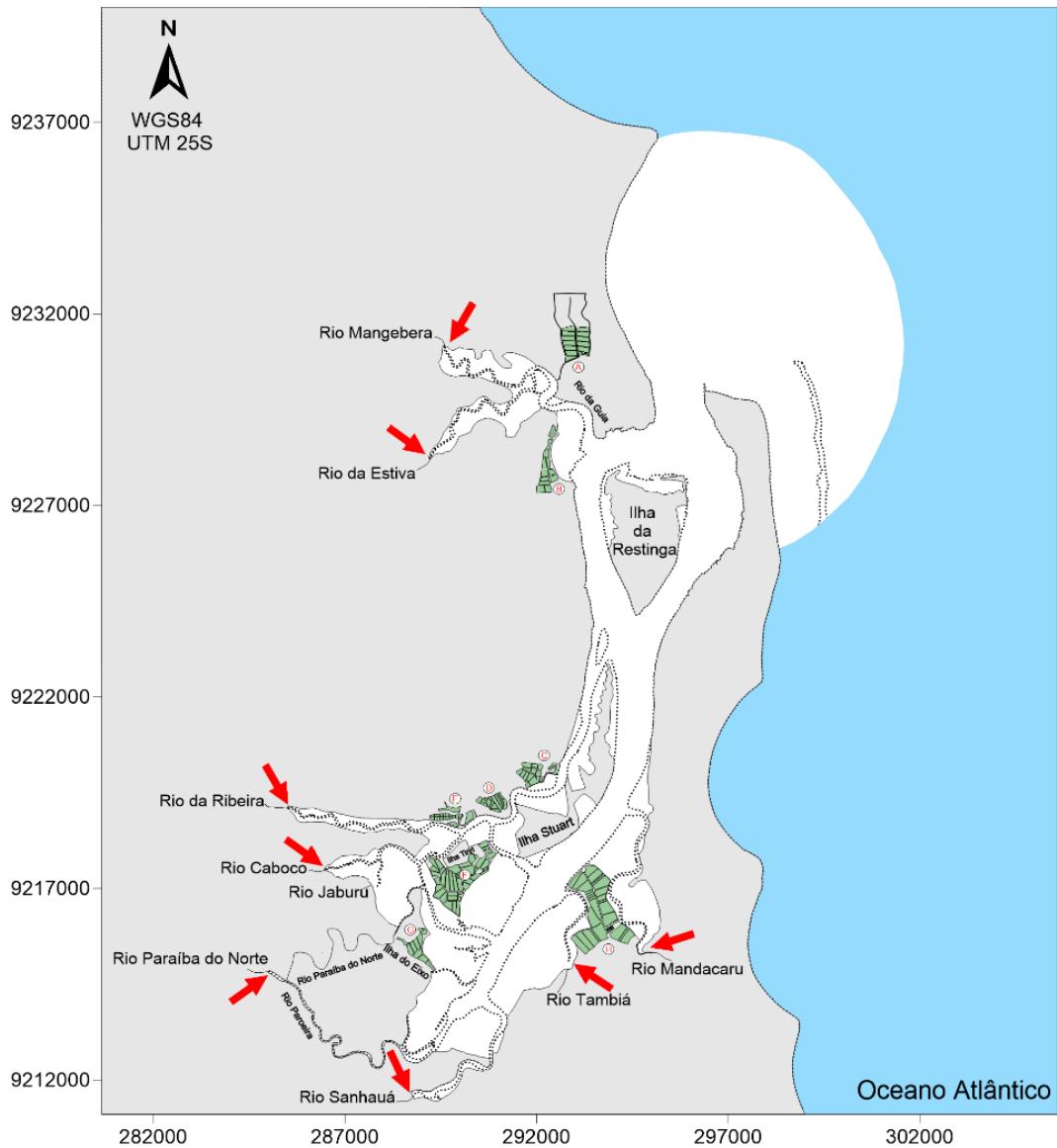


Figura 22. Localização no domínio do SisBaHiA® dos pontos que recebem o aporte de água calculado pelo modelo SWAT.

As etapas de calibração e validação do modelo foram feitas utilizando a ferramenta SWAT-CUP. O SWAT-CUP executa tais etapas de forma automática, para isso o programa possui uma lista com 651 parâmetros de calibração, o que permite ao usuário escolher apenas os que são mais sensíveis e influenciam sua área de estudo (CARVALHO, 2014).

Assim, simultaneamente à calibração, é feita a escolha destes parâmetros que também é ajustado. Essa análise de sensibilidade define uma função objetivo que é aplicada

individualmente a cada parâmetro. Quão maior for a variação da resposta dessa função, mais sensível será o parâmetro para àquele modelo.

Durante a calibração, o ajuste dos parâmetros escolhidos é feito definindo-se limites inferiores e superiores para a variação de cada parâmetro, como também a forma como estes serão alterados, seja uma alteração direta do valor, ou por soma em um valor constante ou multiplicação. Carvalho (2014) ressalta que os parâmetros que possuem variação espacial devem ser alterados por meio da multiplicação, evitando uma homogeneização deles em toda a região.

A calibração do modelo considerou um horizonte de dados de 2004 a 2007 na estação da ANA mais próxima à entrada de dados no domínio de modelagem do SisBaHiA® e com dados fluviométricos disponíveis. A localização da estação escolhida, denominada Ponte da Batalha encontra-se representada na Figura 8.

A Figura 23 expõe a comparação entre os dados medidos da ANA e calibrados. Nota-se que o modelo consegue captar determinados picos de vazão nas séries e que, apesar da discrepância quantitativa entre as séries observadas e calibradas, a simulação conseguiu representar bem a sazonalidade das vazões, com picos durante o período de março a maio, chamado neste trabalho de período de cheia e com menores valores de outubro a dezembro, período característico de seca.

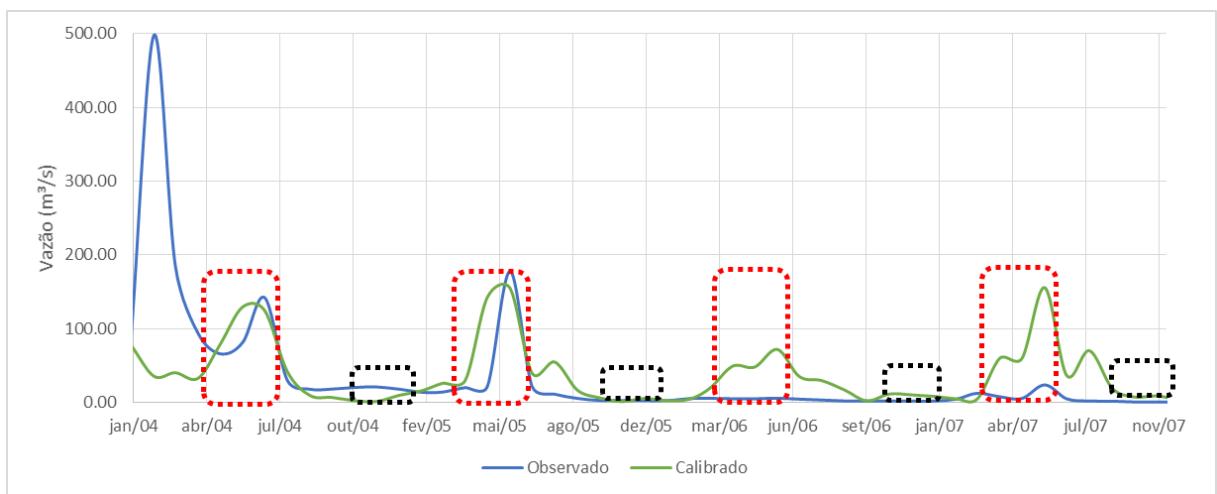


Figura 23. Séries de vazões observadas e calibradas para o período de 2004 a 2007. As demarcações em laranja representam os períodos de cheia fluvial e os demarcados em preto, as secas fluviais.

Com os resultados simulados pelo modelo já calibrados, a etapa seguinte foi a validação dos mesmos, i.e., sua comparação com uma série temporal de vazões distintas das utilizadas na calibração, visando a sua consistência em outros cenários. Os dados escolhidos para tal também

foram coletados da estação Ponte da Batalha, porém para o período de 2008 a 2011. Conforme foi feito para a calibração, a Figura 24 exibe a comparação entre os dados medidos e validados. Nota-se que, assim como para o período de calibração, a validação representa bem a variação sazonal dos períodos.

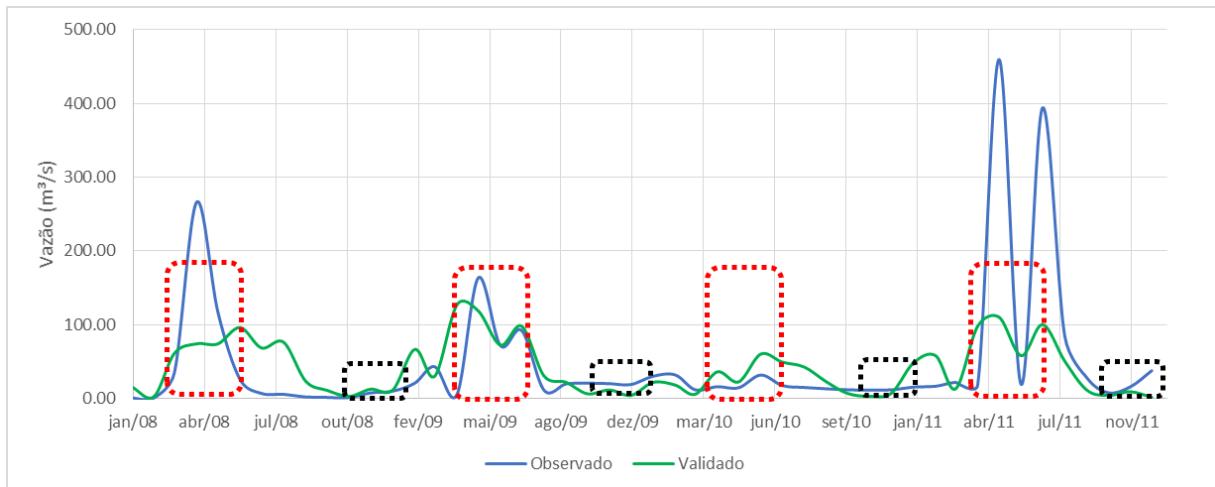


Figura 24. Séries de vazões observadas e validadas para o período de 2008 a 2011. As demarcações em laranja representam os períodos de cheia fluvial e os demarcados em preto, as secas fluviais.

Os resultados obtidos após a calibração e a validação foram submetidos a análises estatísticas, afim de classificar a performance das etapas anteriores quando comparadas aos dados observados. Para isso os resultados foram submetidos ao cálculo de quatro coeficientes estatísticos: o coeficiente de *Nash Sutcliffe* - NSE, o percentual de tendência – PBIAS e o erro padrão normalizado (RSR) e o coeficiente de determinação (R^2).

A Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 exibem os intervalos de classificação propostos por Bouslahim (2016) para modelos hidrológicos e os respectivos valores obtidos para as etapas de calibração e validação no SWAT, tanto para a simulação diária, quanto para a mensal. De acordo com o RSR o desempenho do ajuste foi classificado como muito bom. Segundo o PBIAS o desempenho variou entre muito bom e bom, sendo o período de validação melhor que o calibrado. No entanto, para o NSE, os resultados foram considerados insatisfatórios.

É importante destacar que os resultados são inteiramente dependentes da qualidade dos dados de entrada. Sabendo que a escala obtida para o mapa de uso e ocupação é de 1:5.000.000, é aceitável que o modelo não consiga computar tão bem quantitativamente as vazões. Todavia, como o objetivo das simulações com o SWAT é suprir a escassez de dados dos afluentes do ERPN e representar a intensidade das vazões diante das diferenças sazonais, adotou-se como aceitável as vazões obtidas com o SWAT.

Tabela 7. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslighim (2016) para o RSR, referente ao período de calibração e validação.

Desempenho	RSR	Mensal		Diária	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
Muito bom	$0 \leq RSR \leq 0,5$				
Bom	$0,5 \leq RSR \leq 0,6$				
Satisfatório	$0,6 \leq RSR \leq 0,7$	0,22	0,35	0,18	0,52
Insatisfatório	$RSR > 0,7$				

Tabela 8. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslighim (2016) para o NSE, referente ao período de calibração e validação.

Desempenho	NSE	Mensal		Diária	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
Muito bom	$0,75 < NSE \leq 1$				
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$				
Satisfatório	$0,5 < NSE \leq 0,65$	-0,59	-0,52	-0,55	-0,53
Insatisfatório	$NSE \leq 0,5$				

Tabela 9. Referência e classificação segundo critérios estabelecidos por Bouslighim (2016) para o PBIAS, referente ao período de calibração e validação

Desempenho	PBIAS	Mensal		Diária	
		Calibração	Validação	Calibração	Validação
Muito bom	$PBIAS < 10$				
Bom	$10 \leq PBIAS < 15$				
Satisfatório	$15 \leq PBIAS < 25$	+11,2%	-3,2%	+13,2%	-4,8%
Insatisfatório	$PBIAS \geq 25$				

3.2.3 MODELAGEM DE TRANSPORTE EULERIANA

O cálculo da taxa de renovação e da idade da água foi realizado por meio do Modelo de Transporte Euleriano do SisBaHiA®. Para cada uma das análises, foram feitos dois modelos representando os cenários propostos. Assim, a influência da sazonalidade na renovação e na idade da água foram bem representadas. As seções a seguir apresentam os conceitos gerais da taxa de renovação e da idade da água, bem como a preparação dos quatro modelos citados anteriormente.

3.2.3.1 TAXA DE RENOVAÇÃO

A taxa de renovação representa a mistura das águas presentes no domínio, denominadas águas velhas, com as águas que entram no sistema, chamadas águas novas. A combinação delas é apresentada em termos de porcentagem, e é capaz de representar a renovação temporal e espacial em todo o domínio. É importante destacar que os termos “água velha” e “água nova” não representam a qualidade da água em questão, mas sim o tempo em que elas estão presentes no corpo d’água.

Por existirem diversas forçantes e geometrias distintas influenciando na circulação de um estuário, a sua complexidade faz com que a renovação das águas tenha variações não só temporais, como também espaciais. Nesse sentido, cada região do sistema estuarino possui características particulares quanto à sua renovação.

Para a taxa de renovação, no instante inicial, as águas dentro do sistema devem possuir um valor de referência igual a zero, e as águas externas que entram no domínio, abrangendo o afluxo da maré na fronteira aberta e as vazões afluentes ao sistema, um valor igual a 100, conforme Figura 25. Estes valores de referência marcados inicialmente representam a concentração de um constituinte passivo e conservativo.

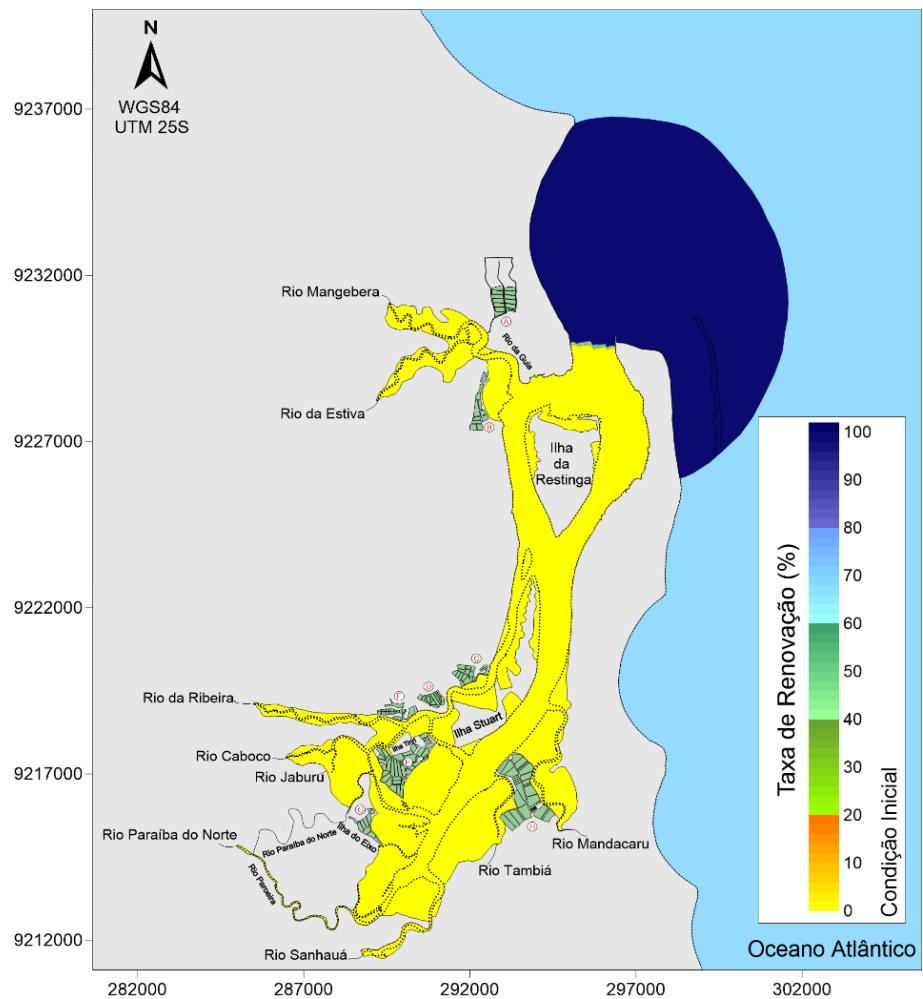


Figura 25. Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para o cálculo da Taxa de Renovação.

As vazões fluviais afluentes ao domínio possuem sua concentração sempre com um valor igual a 100, isto é, a partir do momento que começam a entrar no domínio de modelagem, sua taxa de renovação será sempre 100%. A condição de contorno adotada para tais nós, é de Tipo 1, ou seja, a concentração normal na fronteira interna do domínio é igual à concentração prescrita do lado externo. O tempo de transição inserido no modelo foi de 21600 s, correspondendo a inversão de correntes ocasionada pela maré.

3.2.3.2 IDADE DA ÁGUA

A idade da água é um parâmetro que contabiliza o tempo que determinada água permanece em diferentes setores dentro do domínio de modelagem. O modelo de idade da água calcula o tempo de permanência da partícula a partir do decaimento de primeira ordem de uma substância passiva. Para isso, determina-se no instante inicial uma concentração igual a 1 em todo o domínio, representando a idade 0 da água, pois $\ln(1) = 0$.

A mistura entre as águas interiores e exteriores ao sistema ocorre devido a descarga fluvial e a entrada da maré no estuário. Ambas entradas são também marcadas com concentração igual a 1, por serem consideradas como águas novas ao sistema. A Figura 26 expressa a condição inicial imposta ao modelo. O tempo de transição para os nós de cálculo (Tipo 1) da entrada das vazões ocorre em função da inversão de correntes ocasionada pela onda de maré, i.e. 21600 s.

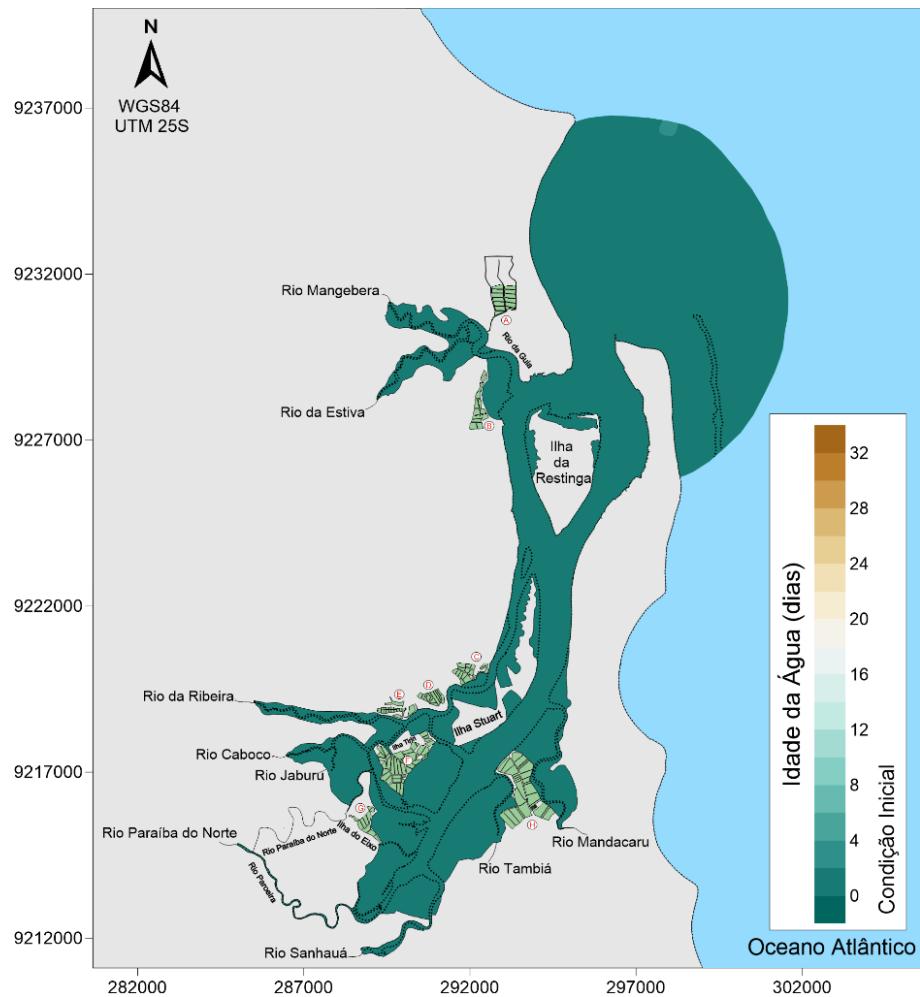


Figura 26. Condição Inicial imposta ao Modelo de Transporte Euleriano para cálculo da Idade da Água.

Dessa forma, à medida que se misturam, a concentração sofre decaimento enquanto que a idade da água aumenta. A variação espacial ocorre por influência da hidrodinâmica no decaimento que varia em todo o sistema. Ou seja, assim como a taxa de renovação, aqui também é calculada a variação temporal e espacial das partículas.

As regiões do estuário que possuem águas com maiores idades, ou seja, mais velhas, são mais susceptíveis à ocorrência de eutrofização e possuem pequena capacidade de diluir demais fontes de poluição. A idade da água é um indicativo do tempo que determinada região de um corpo d'água leva para renovar.

3.2.4 MODELAGEM DE TRANSPORTE LAGRANGEANA

Para considerar as séries temporais provenientes da atividade de carcinicultura, utilizou-se como ferramenta o programa “Q-despesca” desenvolvido no Microsoft Excel, em linguagem VBA por Roversi (2019), que permite calcular as vazões da despresa do camarão considerando determinados parâmetros envolvidos no processo.

Cada fazenda inserida no modelo hidrodinâmico corresponde a uma fonte no “Q-despesca”, que representa a descarga total gerada por determinada fazenda, i.e., a soma das vazões individuais de cada viveiro referente a um dado empreendimento. Assim, para cada fonte, os cálculos das séries de vazões consideram as seguintes características: a área total ocupada pelos viveiros (m^2), a profundidade média dos viveiros (m), a área média de cada viveiro (m^2), a duração média da despresa por viveiro (horas), os períodos mínimo, médio e máximo de cultivo (dias), o desvio padrão do período de cultivo médio (\pm dias) e o período de preparo do viveiro para o próximo cultivo (dias).

A geometria dos viveiros foi definida com o auxílio de imagens do Google Earth Pro, datadas em 2018, sendo a profundidade média adotada para os viveiros de 1 m. Segundo Phillips *et al.* (2005 *apud* Costa 2006), os viveiros devem possuir profundidades mínimas de 0,8 m e máximas de 2 m, para assim minimizar a estratificação térmica.

Neste estudo optou-se por simular apenas um ciclo de cultivo de despresa para cada fazenda presente no ERPN. Isso ocorreu devido ao curto tempo de simulação adotado nos cenários do modelo hidrodinâmico. Assim, adotou-se um período de cultivo máximo de 90 dias, e mínimo de 60 dias, sendo o desvio padrão do período médio de \pm 15 dias. A duração média da despresa adotada por viveiro foi de 4 horas.

Uma vez definidos tais parâmetros, assume-se que a primeira despresa de todas as fontes ocorrem dentro de um período inicial de 2 dias e são selecionadas de forma aleatória a partir de uma distribuição de probabilidade feita pelo próprio programa.

Roversi (2019) explica que o cálculo das vazões nas fazendas é feito individualmente para cada viveiro considerado, sendo depois somadas a fim de representar a vazão total de despresa de cada fazenda.

Assim, a simulação do alcance dos efluentes gerados pelas fazendas de carcinicultura dentro do domínio de modelagem foi feita utilizando os resultados obtidos com o Q-despesca.

O modelo de transporte lagrangeano acompanha a trajetória de efluentes que são emitidos por fontes conforme são transportadas pelas correntes. As fontes inseridas ao modelo representam o lançamento de um número previamente determinado de partículas por passo de tempo. O lançamento feito pelas fontes pode ser intermitente, o que permite fontes variadas em um mesmo local com a possibilidade de vazões distintas associadas a ela. Assim, o lançamento é programado para seguir o roteiro temporal da despensa, sendo as fontes ligadas nos momentos de despensa e desligadas quando estas não ocorrem.

Como nesta etapa o objetivo é determinar apenas o alcance e a dispersão do efluente, e não sua concentração, foi admitido que as partículas sofrem um decaimento de primeira ordem, com T90 de 5 dias, tendo em vista que as partículas com tempo de vida superior a três T90 irão desaparecer do domínio de modelagem, por possuírem valor residual inferior a um milésimo do que tinham ao serem lançadas. Assim, esse artifício permite que a massa remanescente seja desprezível após esse decaimento. Essa abordagem permite mostrar por onde as parcelas de águas oriundas dos diferentes viveiros de carcinicultura transitaram pelo estuário.

Dezoito simulações foram feitas, nove durante o Cenário Representativo de Cheia - CNC e nove durante o Cenário Representativo de Seca - CNS. Para cada cenário, oito modelos foram rodados simulando a despensa de apenas uma fazenda, possibilitando a melhor visualização dos resultados. E um modelo simulou a realização das oito fazendas em conjunto.

3.2.5 MODELAGEM DE QUALIDADE DE ÁGUA

Nesta seção são expostos os cenários para modelagem de qualidade da água, as condições consideradas nas simulações, e a referência dos valores dos parâmetros incluídos.

O SisBaHiA® permite distintas opções de modelagem de qualidade de água, incluindo reações cinéticas diferentes em cada uma. Assim como os demais modelos, é utilizado o padrão de circulação obtido com o modelo hidrodinâmico.

Este estudo adotou a modelagem de OD e DBO, incluindo as variações de temperatura e salinidade via modelo. As reações cinéticas consideraram parâmetros meteorológicos da variação temporal de radiação solar (watt/m²), temperatura (° C) e umidade (%). Esses dados foram obtidos da estação meteorológica automática de João Pessoa – PB, por meio do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

As séries de dados utilizados no modelo abrangearam um período de monitoramento de qualidade da água no ERPN, onde os seguintes parâmetros foram utilizados: Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Temperatura e Salinidade. Os parâmetros foram monitorados pela SUDEMA, em cumprimento à Lei nº 9.433 de 1997, que estabelece a Política Nacional dos Recursos Hídricos. O período de monitoramento foi referente aos anos de 2010, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017.

Devido a não haver periodicidade nas medições obtidas, para cada parâmetro foi calculada a mediana referente aos períodos considerados nos Cenários de Cheia e de Seca e adotados como condição de contorno na entrada das descargas líquidas. A Tabela 10 expõe os valores dados ao modelo.

Tabela 10. Valores medianos de concentração de OD, DBO, Temperatura e Salinidade calculados para os modelos de qualidade de água de cheia e seca.

Afluente	Cenário Representativo de Cheia				Cenário Representativo de Seca			
	OD	DBO	Temperatura	Salinidade	OD	DBO	Temperatura	Salinidade
Rio Paraíba	2,8	1,1	30,0	18,2	3,3	4,0	29,0	19,2
Rio Sanhauá	2,8	1,7	29,5	18,8	4,0	3,8	29,0	22,5
Rio Mandacaru	2,0	1,7	30,0	24,6	3,1	4,6	29,0	29,7
Rio Tambiá	1,6	2,4	29,0	23,5	0,7	21,0	29,0	27,7
Rio da Ribeira	3,2	1,4	29,3	24,0	4,4	1,6	29,0	26,0
Rio Caboco	3,2	1,4	29,3	24,0	4,4	1,6	29,0	26,0
Rio Mangebeira	5,0	0,8	30,0	25,8	6,3	2,3	29,0	28,3
Rio da Estiva	5,0	0,8	30,0	25,8	6,3	2,3	29,0	28,3

Para iniciar o modelo com condições similares às encontradas no ERPN, foram estabelecidas concentrações iniciais para OD, DBO, temperatura e salinidade. Os dados utilizados são provenientes de treze estações de medição da SUDEMA, localizadas no espelho d'água do estuário. O período de monitoramento é o mesmo dos dados citados acima. A partir desses pontos foi feita uma interpolação para todos os nós da malha. A Figura 27 mostra a localização destas estações.

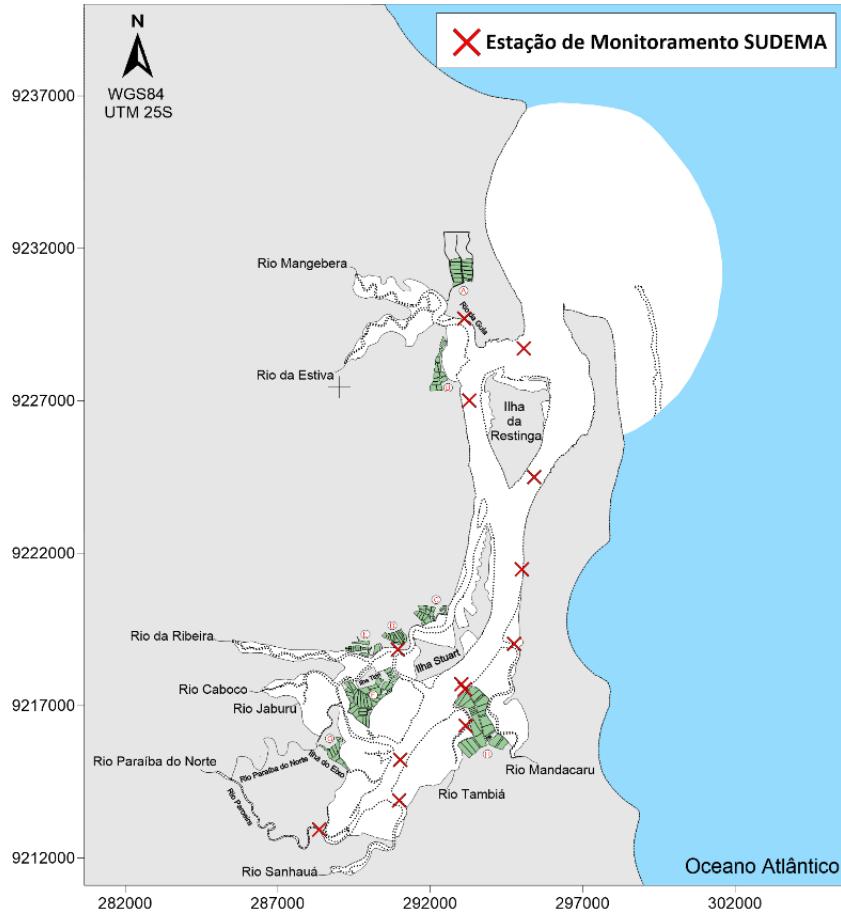


Figura 27. Localização das estações de monitoramento de qualidade de água da SUDEMA no EPN.

Para considerar a entrada da despesca na modelagem, as concentrações impostas ao modelo foram representadas como fontes variáveis, onde são prescritas séries temporais com valores de concentração e diluição. Quando há um descarte de um efluente no corpo d'água, imediatamente após seu lançamento a concentração a jusante é inferior a concentração inicial do efluente, esse processo é chamado de diluição. No MQA, essa diluição inicial é previamente calculada a partir das características do lançamento, variando de acordo com as vazões, e do local de despejo da fonte, conforme a Equação 11. Vale ressaltar que o volume de diluição no campo próximo deve ser maior que o próprio volume do efluente.

$$S = \frac{V_c}{V_e} = \frac{V_c}{|Q_e| \Delta_t} \quad (12)$$

Onde,

S = Fator de diluição

V_c = Volume de diluição no chamado campo próximo

V_e = Volume do efluente

$|Q_e|$ = Vazão de emissão da fonte

Δ_t = Passo de tempo do modelo

Devido a não haver registros medidos de concentração dos parâmetros analisados nos viveiros, optou-se por realizar uma análise qualitativa de como o corpo d'água irá reagir diante de diferentes condições de qualidade do efluente.

Para isso, foram feitas duas simulações com padrões de lançamento distintos de OD e DBO, sendo a primeira, denominada Simulação I, referente ao padrão imposto pela GAA (2017) para empreendimentos com mais de 5 anos de certificação, de acordo com o *Best Aquaculture Practices Certification Standards – BAP*. A CONAMA nº 357/2005 também impõe o mesmo limite de OD para lançamentos em águas salobras de classe 1.

A Simulação II considera um cenário em que a qualidade do efluente é extremamente inferior as demais, com valor de OD referente às situações de hipóxia, ou seja, menor que 3 mg/l (ZHANG *et al.*, 2006). Boyd (1989) observou que a espécie *Litopenaeus vannamei* não sobrevive em condições de OD inferiores a 1 mg/l. Contudo Hopkins (1991) recomenda que, para esse cultivo, os níveis de OD devem manter-se igual ou maior que 3 mg/l, para dar uma margem de erro em casos de problemas com a qualidade do ambiente, como ausência de radiação solar, excesso na alimentação, má qualidade da água captada, entre outros.

O valor de DBO adotado na Simulação II é referente a uma situação que representa um cenário pessimista. Essas péssimas condições já foram observadas em literatura para viveiros na região Nordeste, como mostra Figueiredo (2005) e Jerônimo e Balbino (2012), que encontraram em viveiros em más condições com DBO superior a 100 mg/l, podendo chegar próximo a 200 mg/l. Assim, com a finalidade de simular uma situação crítica adotou-se a DBO 200 mg/l. A Tabela 11 exibe os valores de concentração inseridos nas fontes do MQA para ambas as simulações.

Tabela 11. Concentrações de OD e DBO em ambas as simulações inseridas no modelo.

Parâmetro	Simulação I	Simulação II
	Best Aquaculture Practices Certification Standards	
Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L)	30	200
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	5	3

Para estudar o comportamento dos parâmetros de OD e DBO frente à influência da despesa dos camarões, foi feita uma simulação do MQA sem a inserção das fontes. Assim, a Tabela 12 abaixo resume os cenários simulados no MQA.

Tabela 12. Cenários adotados para analisar as concentrações de OD e DBO no Modelo de Qualidade de Água.

Características	Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V	Cenário VI
MH - CNC						
MH - CNS						
Sem fontes						
Com fontes – Sim. I						
Com fontes – Sim. II						

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são descritos e discutidos os resultados obtidos com os modelos do SisBaHiA®. As análises dos resultados priorizaram caracterizar os padrões de circulação do estuário, para assim compreender a dinâmica dos processos envolvidos na determinação da qualidade da água do mesmo. As seções 4.1, 4.2 e 4.3 expõem tais pontos.

4.1 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA MARÉ E ZONAS DE ALAGAMENTO E SECAMENTO

A interação entre a propagação da onda de maré e a morfologia do estuário leva a importantes variações na altura da onda e na intensidade das correntes (DYER, 1997). De acordo com Hunt (1964) essas variações em águas rasas ocorrem também devido à perda de energia ocasionada pela força de atrito no fundo, ocasionando a redução da altura da onda.

No ERPN observou-se que há um aumento da altura da maré estuário adentro, como dito acima, isso ocorre devido às mudanças morfológicas em seu interior, i.e., o seu afunilamento. Essas variações são percebidas ao serem plotadas e comparadas, séries temporais de elevação em estações localizadas na entrada no estuário (Estação Embocadura), no meio (Estação Saída Rio Mandacaru) e na sua cabeceira (Estação Rio Paraíba), exibidos na Figura 28.

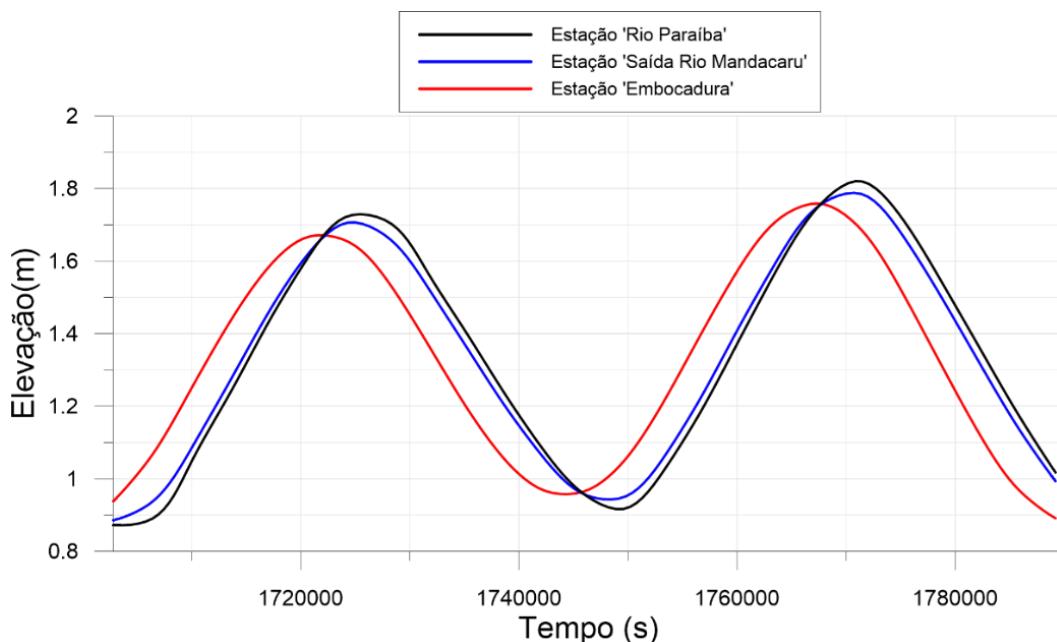


Figura 28. Séries temporais de elevação (m) ao longo de dois ciclos de maré em três estações ao longo do ERPN, sendo elas: Estações 'Rio Paraíba', 'Saída Rio Mandacaru' e 'Embocadura'.

Para melhorar a compreensão da distorção que a onda sofre ao entrar em regiões de águas rasas, fez-se uma análise harmônica em 5 estações ao longo do estuário, desde a fronteira aberta até o seu fim, no rio Paraíba. Observando o comportamento das constantes harmônicas no ERPN (Figura 29), percebe-se que há uma amplificação das constantes harmônicas estuário adentro (Estação Rio Paraíba), o que condiz com os resultados expostos na Figura 28. Esse aumento da amplitude está relacionado as mudanças morfológicas do estuário.

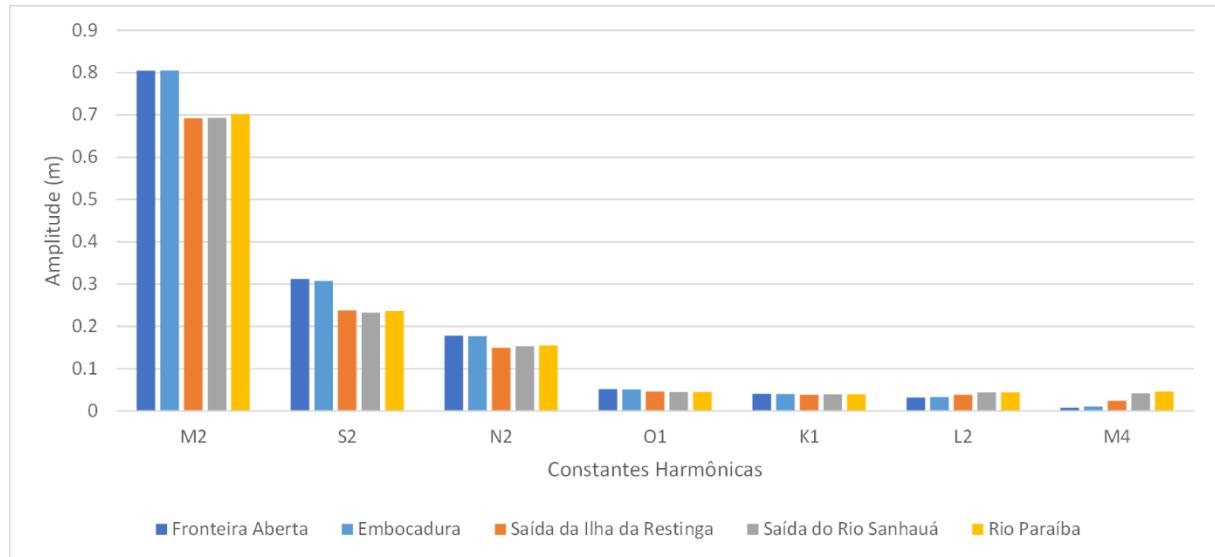


Figura 29. Análise das Constantes Harmônicas M2, S2, N2, O1, K1, L2 em 5 estações ao longo do estuário.

Conforme Friedrichs e Aubrey (1988) essa distorção não-linear é exposta pela razão da amplitude do nível do mar entre a M₂ e a M₄. Essas constantes são escolhidas devido a M₂ ser o constituinte dominante da maré na maior parte das regiões costeiras do planeta e por M₄ ser o seu primeiro sub-harmônico, possuindo o dobro da frequência angular de M₂. De acordo com Pugh (1987), essa distorção só é importante quando a amplitude da M₄ for maior que 0,4 vezes a amplitude da M₂. A Tabela 13 abaixo apresenta os valores encontrados para essas relações propostas por ambos os autores. Percebe-se que há assimetria vertical da onda de maré, e que ela cresce estuário adentro, porém a mesma não é significativa.

Tabela 13. Valores da distorção vertical de maré para 5 Estações ao longo do ERPN, conforme critérios de Friedrichs e Aubrey (1988) e de Pugh (1987).

Estação de Resultados	(M ₄ / M ₂)	(4M ₄ > M ₂)
	Friedrichs e Aubrey (1988)	Pugh (1987)
Fronteira Aberta	0.010	0.032 < 0.804
Embocadura	0.013	0.042 < 0.805
Saída da Ilha da Restinga	0.035	0.098 < 0.692
Saída do Rio Sanhauá	0.061	0.168 < 0.693
Rio Paraíba	0.065	0.184 < 0.702

No estuário do rio Paraíba do Norte a duração das vazantes são menores quando comparadas às enchentes, o que indica que durante a vazante as velocidades são maiores, fazendo com que o estuário seja classificado como vazante dominante.

Na região estudada, a onda de maré característica pode ser classificada como uma onda estacionária, i.e., as máximas correntes ocorrem durante os momentos de meia maré vazante e meia maré enchente, enquanto nas preamaras e baixa-mares há estagnação da velocidade. Na Figura 30 é possível observar a defasagem das séries temporais de elevação e de velocidade para 4 estações ao longo do domínio de modelagem. Observa-se que o comportamento estacionário da onda é encontrado em todo o estuário. Cabe destacar que as velocidades positivas representam a vazante e as negativas a enchente.

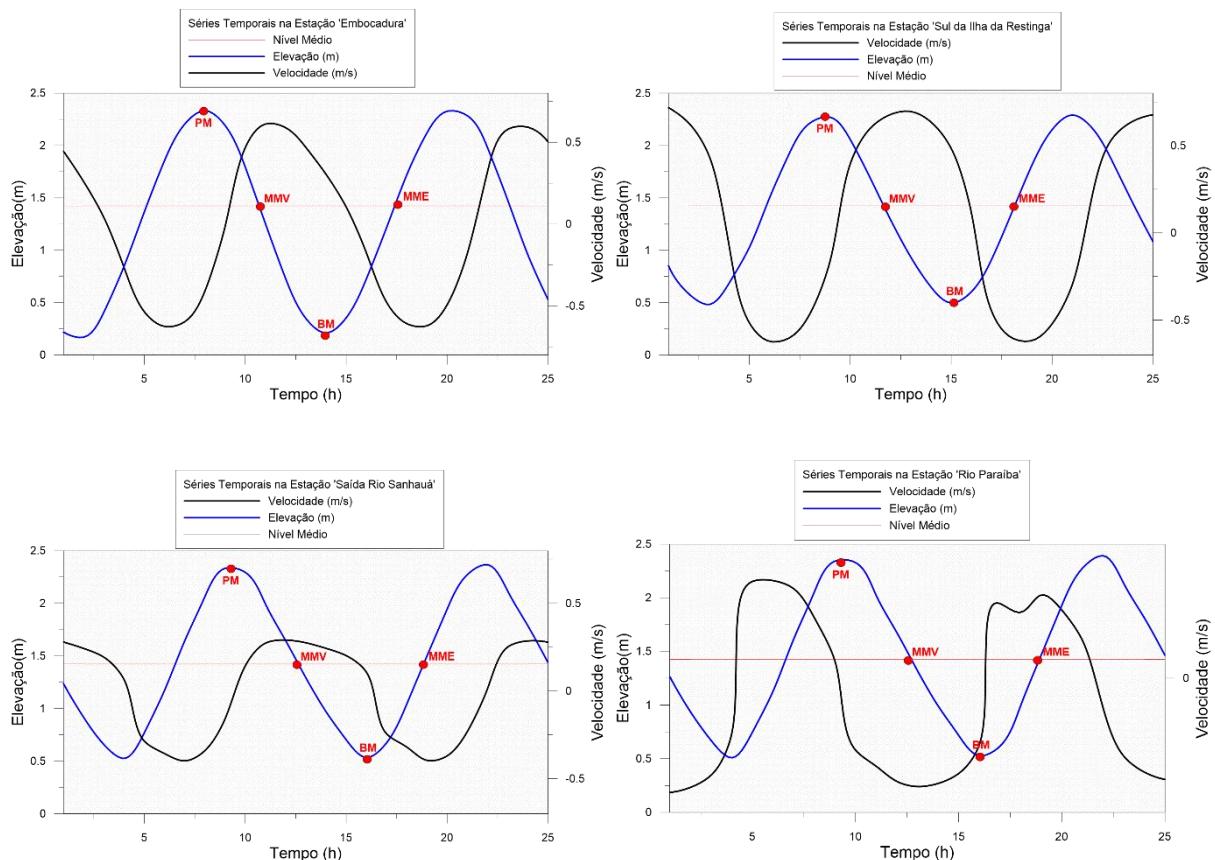


Figura 30. Séries temporais de elevação (m) e velocidade (m/s) durante dois ciclos de sizígia. O gráfico caracteriza a onda de maré estacionária atuando no ERPN nas Estações 'Embocadura', 'Sul Ilha da Restinga', 'Saída do Rio Sanhauá' e 'Rio Paraíba'.

Outra característica responsável por ocasionar a distorção da onda de maré é a presença de planícies de maré nos estuários. Elas atuam armazenando um alto volume de água, e tendem a reduzir as velocidades das correntes em seu interior devido a ocorrência de maior atrito.

A seguir são apresentadas as variações do nível da água durante a preamar e baixa-mar de sizígia e quadratura. Estes instantes foram escolhidos devido às suas maiores amplitudes de maré, sendo possível observar a dinâmica de alagamento e secamento dos manguezais. Por motivos de similaridade entre os resultados do CNC e do CNS, são exibidos apenas os mapas referentes ao CNC.

Como as bordas dos manguezais possuem cota igual à média das preamaras de quadratura, haverá alagamento quando a elevação ultrapassar esta cota. Observa-se alagamento apenas durante a PM, principalmente na sizígia, quando há uma variação da elevação de 2 m a 3 m em todo o domínio, enquanto que, nos demais instantes encontram-se secos, i.e., o nível de água calculado pelo modelo é menor do que a cota dos manguezais.

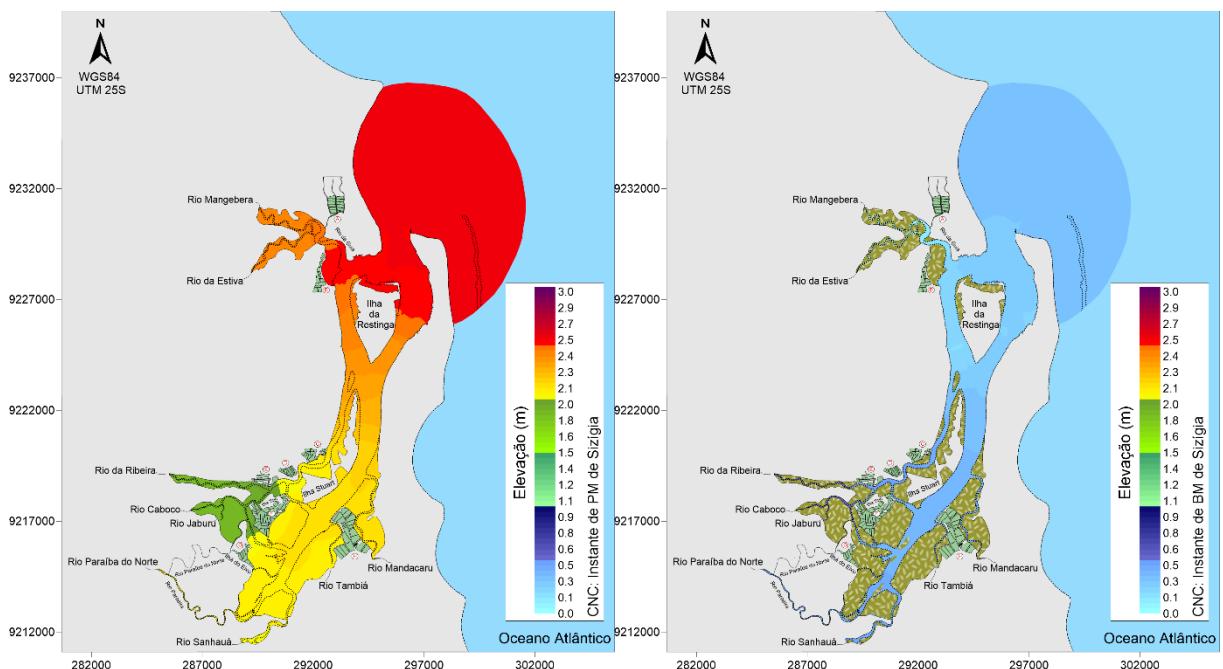


Figura 31. Isolinhas de elevação (m) na PM de sizígia (à esquerda) e quadratura (à direita) durante o Cenário Representativo de Cheia. Nota-se que o alagamento das áreas de manguezais só ocorre durante a PM.

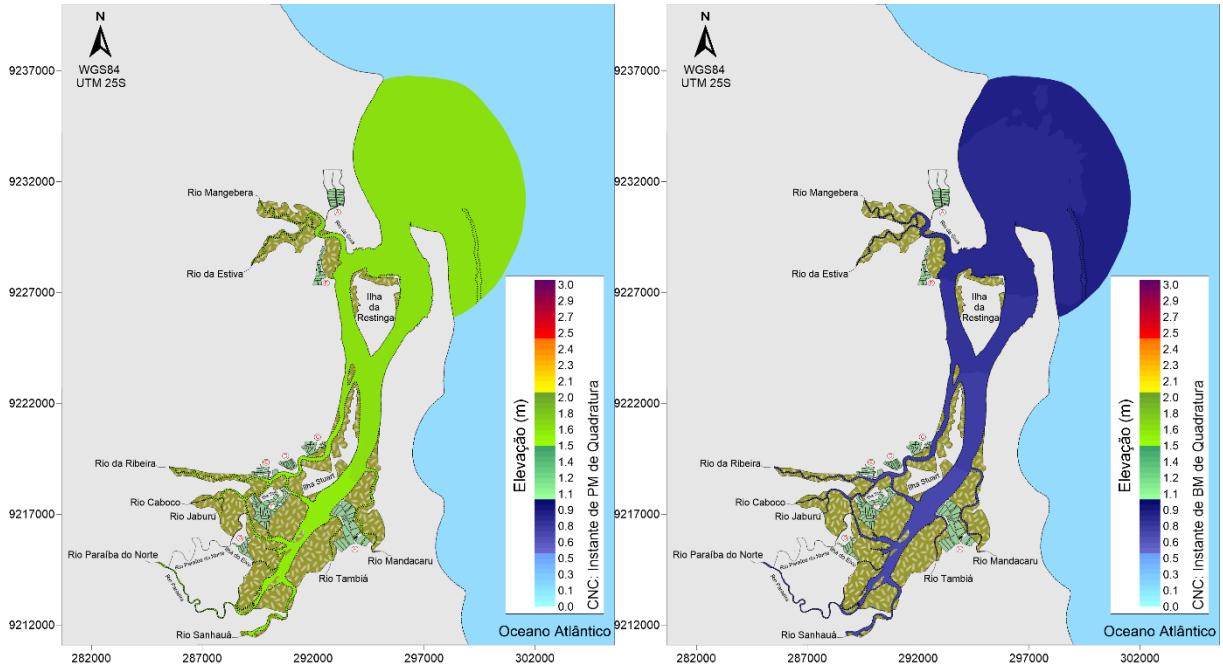


Figura 32. Isolinhas de elevação (m) na BM de sizígia (à esquerda) e quadratura (à direita) durante o Cenário Representativo de Cheia. Nota-se que as áreas de mangue se encontram secas em ambos os períodos.

Da Figura 33 a Figura 36 são apresentados os gráficos de elevação em estações localizadas nos manguezais do ERPN. À esquerda estão os resultados durante o CNS, enquanto que à direita, durante o CNC. Conforme dito acima, a dinâmica de alagamento e secamento é similar em ambos os cenários, o que pode ser observado nas figuras abaixo. Observa-se que há alagamento em todas as preamares de sizígia, em ambos os cenários. Em contrapartida, apenas em poucas preamares de quadratura os manguezais alagam, ocorrendo somente na simulação do CNC.

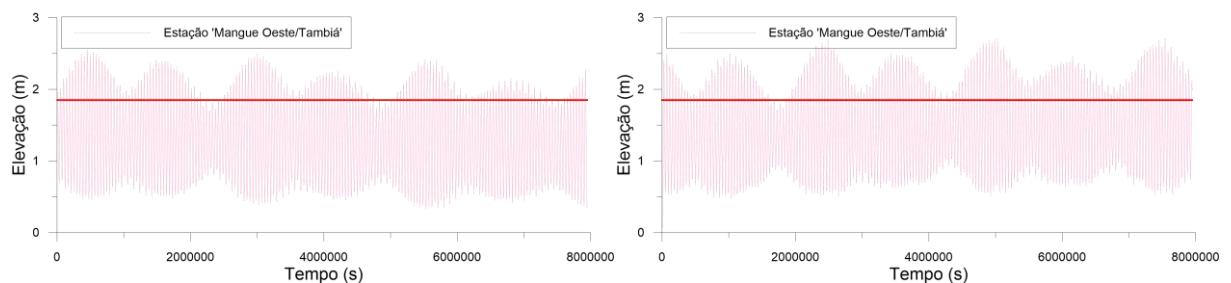


Figura 33. Variação da elevação no Mangue à oeste do rio Tambiá. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamares de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.

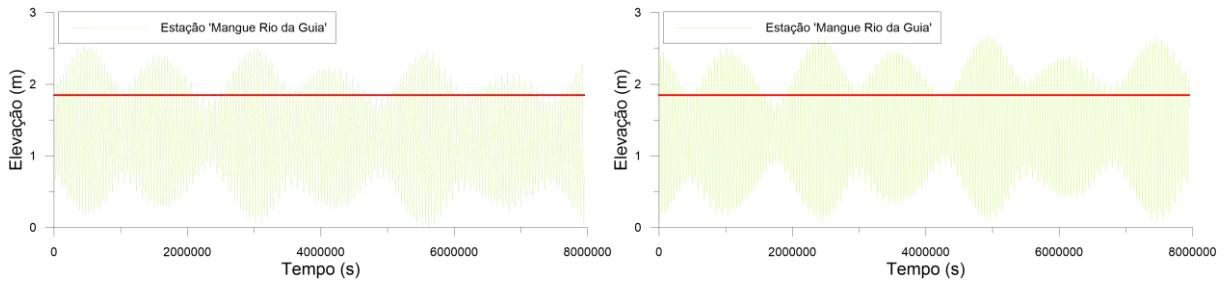


Figura 34. Variação da elevação no Mangue do Rio da Guia. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.

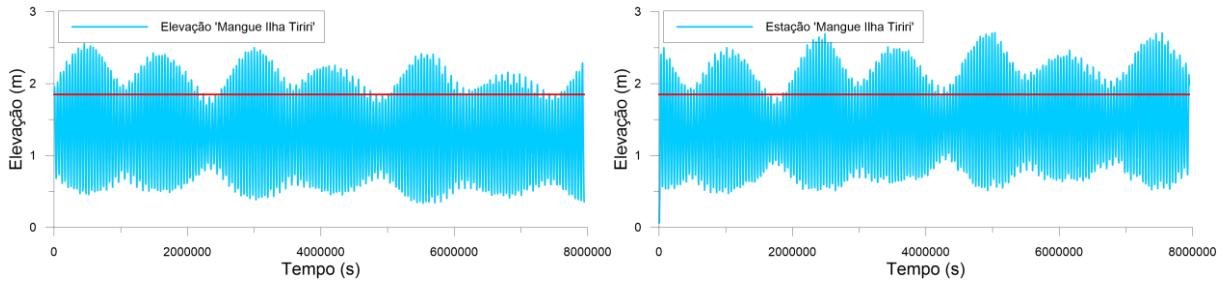


Figura 35. Variação da elevação no Mangue da Ilha Tiriri. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.

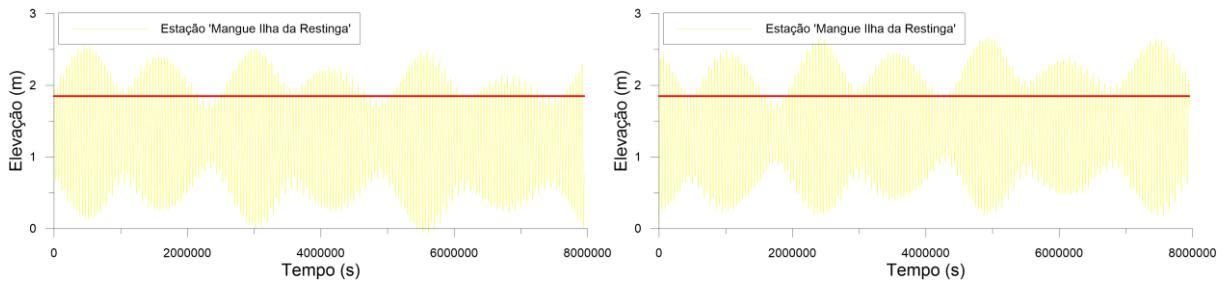


Figura 36. Variação da elevação no Mangue da Ilha da Restinga. O gráfico à esquerda representa o CNS, enquanto o da direita, o CNC. A linha vermelha marca a média das preamarés de quadratura, representando a cota da borda dos mangues.

4.2 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Com o objetivo de compreender os padrões de circulação do ERPN e devido as características da sua onda de maré, foram escolhidos instantes de PM, MMV, BM e MME durante um ciclo de sizígia e de quadratura para exibir e discutir os resultados encontrados na modelagem hidrodinâmica.

As proporções das vazões de enchente são muito maiores que as vazões afluentes dos rios. A média de todas as vazões continentais é de em torno $20 \text{ m}^3/\text{s}$ durante o Cenário de Cheia – CNC, e de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ no Cenário de Seca – CNS. Enquanto que a média das vazões de enchente durante uma sizígia é de em torno de $5000 \text{ m}^3/\text{s}$, e de $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ para a quadratura, não se alterando com a sazonalidade. Estes valores mostram que a circulação estuarina nessa região

é dominada pela força da maré. Assim, os padrões de circulação obtidos com o modelo hidrodinâmico são bastante similares para os dois períodos sazonais (CNC e CNS). Assim, nesta seção serão expostos e discutidos apenas os resultados obtidos para o CNC, no entanto, os demais resultados podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

Para ilustrar a circulação no estuário foram gerados mapas com variação de isolinhas de velocidade (m/s) nos instantes já mencionados. Para cada instante de maré, estão ilustrados vetores de vazão ao longo do domínio, o que torna possível observar com maiores detalhes a direção e magnitude das correntes em regiões sob influência de alagamento e secamento.

Da Figura 37 a Figura 48 estão ilustrados os instantes de PM, MMV, BM e MME de sizígia, e da Figura 50 a Figura 60, os mesmos instantes para um ciclo quadratura.

A influência exercida pela maré nas velocidades encontradas é perceptível quando comparados os períodos de sizígia e quadratura. As maiores velocidades estão associadas às marés de sizígia, em contrapartida, durante a quadratura, as correntes possuem um caráter mais fraco, como consequência dos menores níveis nesse instante. Quanto aos instantes de maré, devido às características da onda de maré estacionária, as estofas se encontram nos momentos de preamar e baixa-mar, enquanto as maiores velocidades se concentram nas meias marés vazantes e enchentes.

Conforme exposto na seção anterior, as planícies de inundação interferem na propagação da onda de maré. Devido a esta assimetria causada, observou-se que as velocidades durante os momentos de vazante são maiores que as velocidades de enchente. Quando a maré no limite superior das planícies alcança a preamar, o seu limite de contato com o canal principal já encontra-se vazando, devido às deformações causadas pelo atrito na velocidade nestas planícies. Esse gradiente de pressão gerado pelas diferenças de níveis eleva a velocidade da água na volta em direção ao rio principal, o que explica as correntes mais intensas durante a vazante.

A análise espacial dos padrões de circulação do estuário mostra maior magnitude das correntes nas regiões próximas à desembocadura do rio Mandacaru e nos arredores da Ilha da Restinga. Isso ocorre em consequência da presença de canais mais profundos nessa região. Por outro lado, as correntes de menores intensidade são observadas preferencialmente em áreas de manguezais, por serem regiões rasas e com elevada rugosidade, o que dificulta o escoamento.

Uma compreensão mais detalhada da dinâmica que ocorre nas áreas de mangues e ao longo do estuário nos instantes de PM, MMV, BM e MME, encontram-se descritas nas legendas dos mapas abaixo.

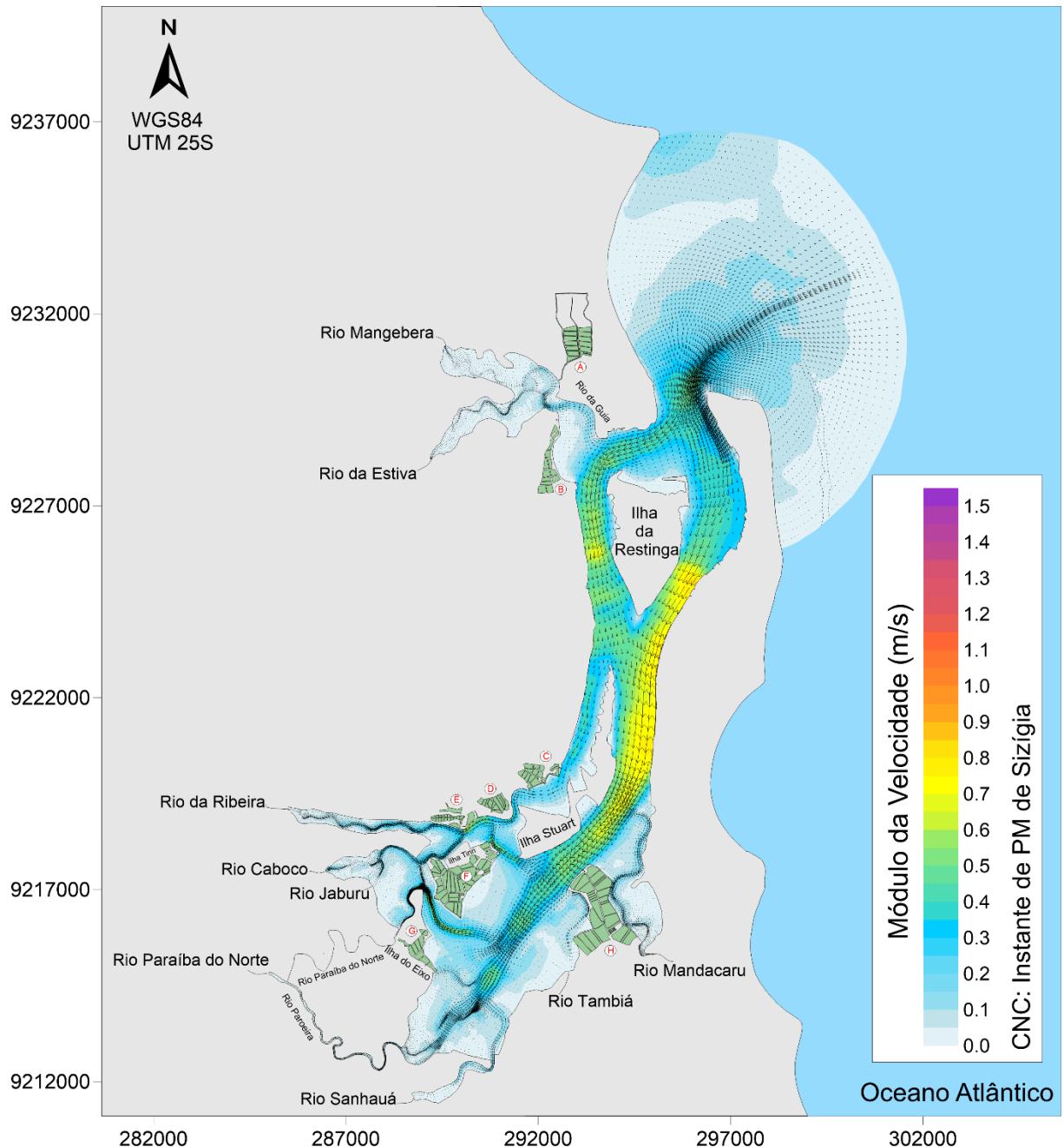


Figura 37. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) durante a PM de sizígia do CNC.

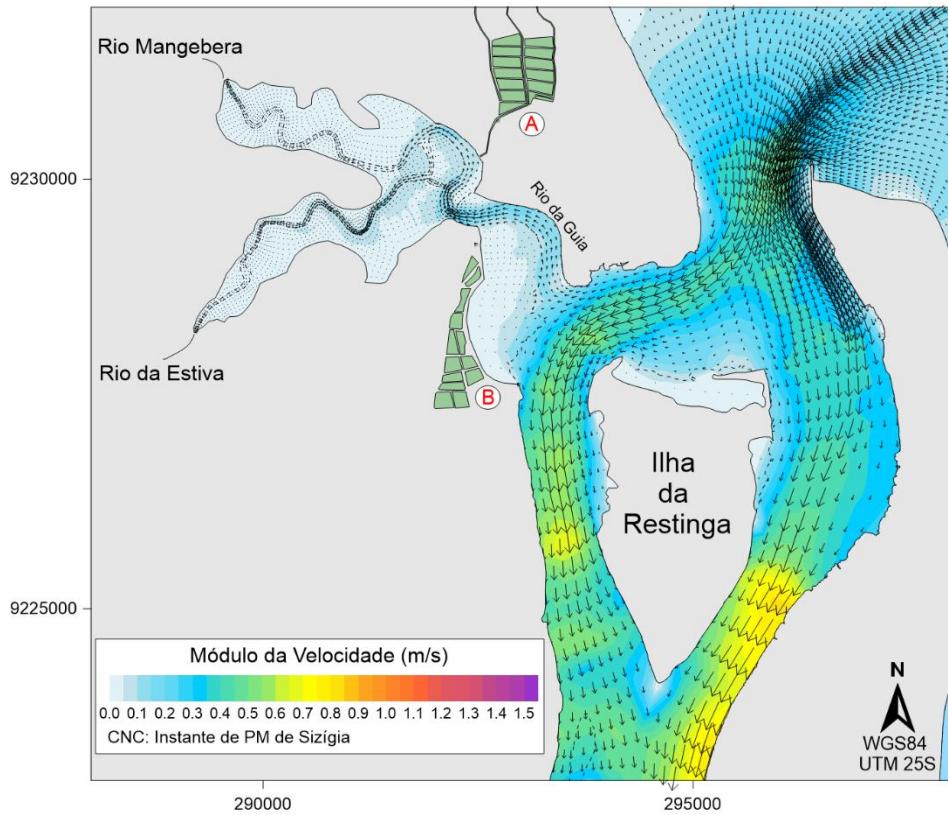


Figura 38. Detalhe de circulação hidrodinâmica na região norte do ERPN em PM de sizígia. Nas zonas dos manguezais as correntes mais fortes restringem-se aos canais e ficam muito fracas sobre as planícies de mangue.

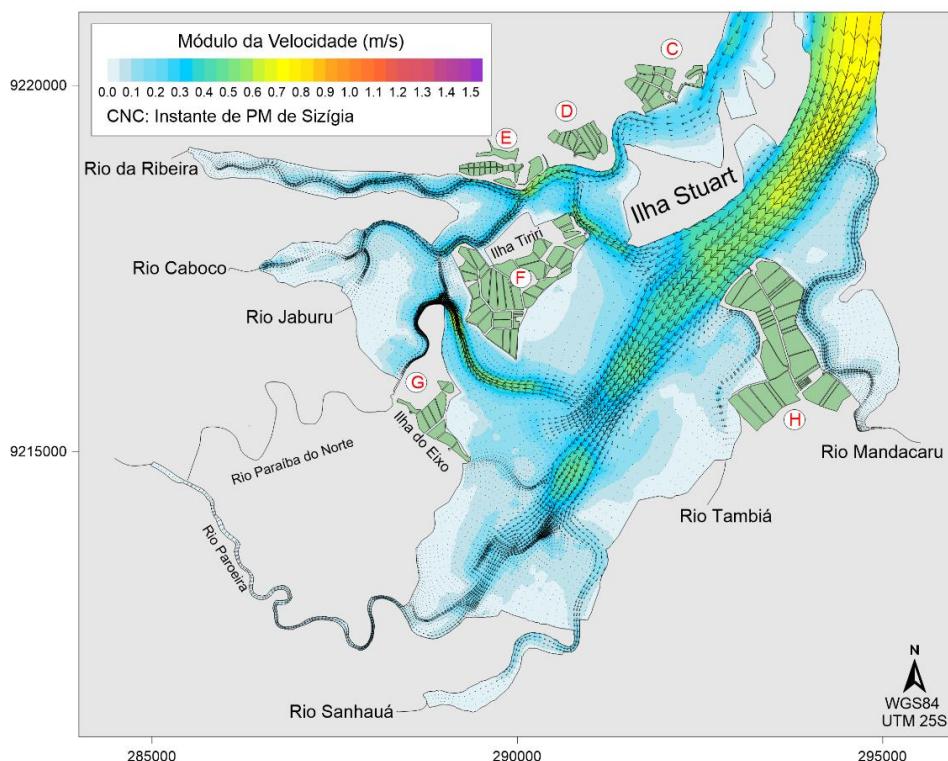


Figura 39. Padrão de circulação hidrodinâmica em um instante de PM de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se a presença de pequenas correntes nos manguezais alagados, com maior intensidade restrita aos canais.

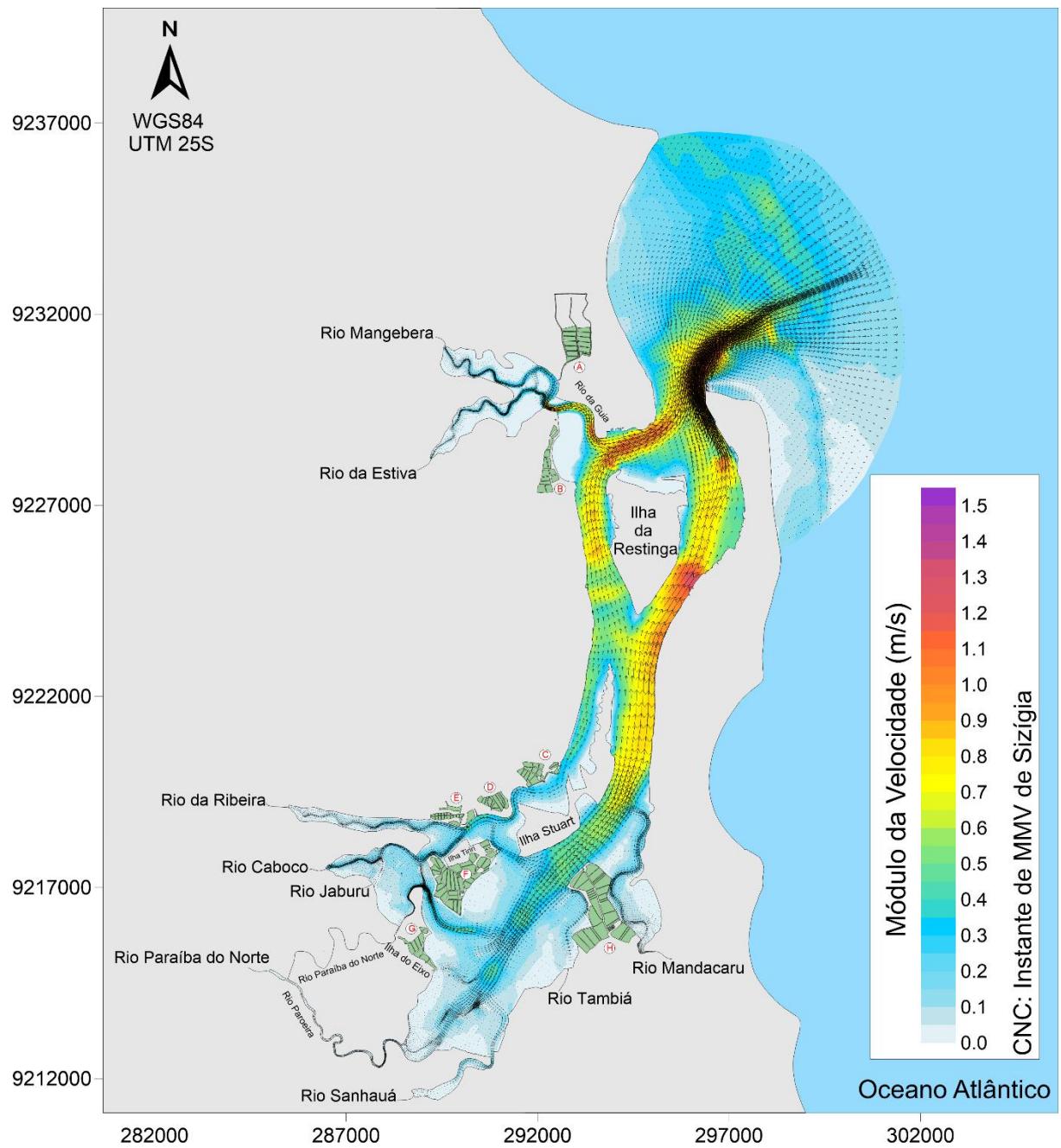


Figura 40. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) durante a MMV de sizígia do CNC.

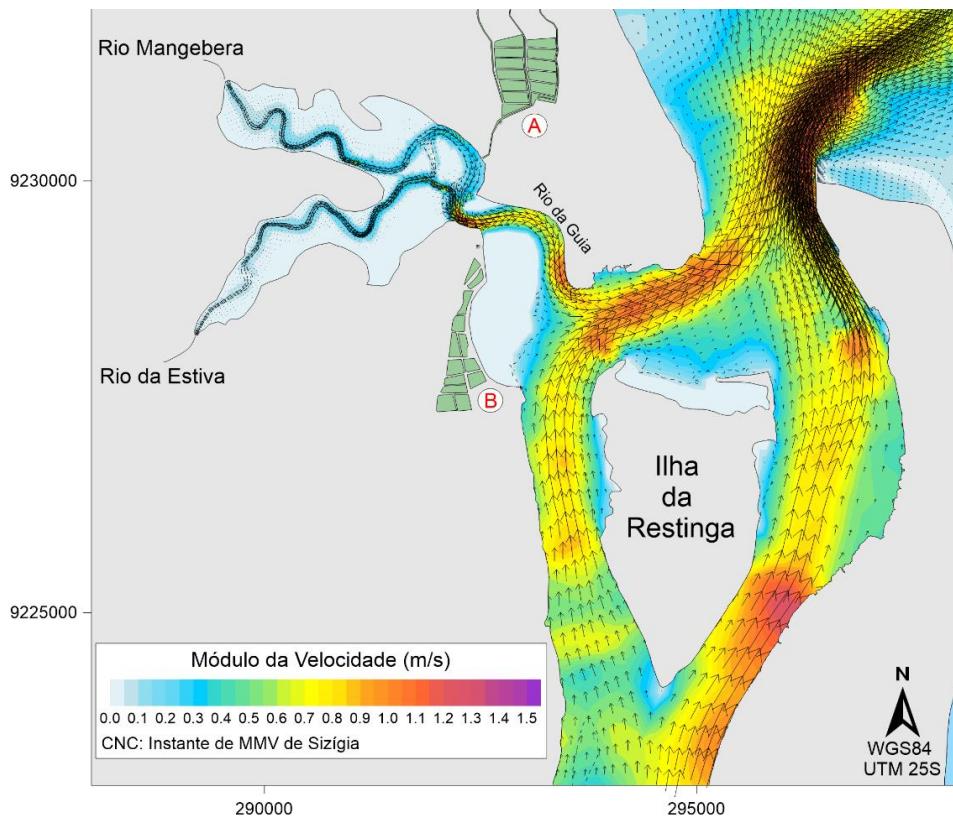


Figura 41. Padrão de circulação hidrodinâmica na MMV de Sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que, apesar das maiores velocidades nos canais principais, o nível médio da água nesse instante não alaga os manguezais, sendo suas vazões nulas. Isso ocorre também devido ao momento de vazante do estuário, que tende a secar as áreas alagáveis e a transportar a água pelos canais.

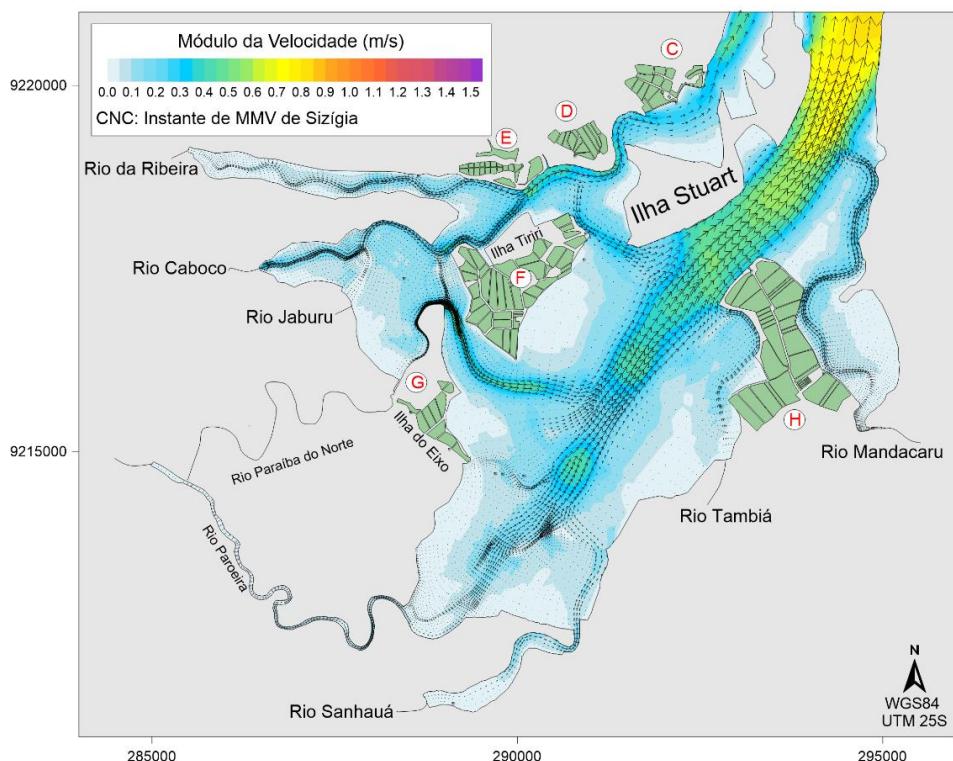


Figura 42. Padrão de circulação hidrodinâmica na MMV de Sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que, nesse instante, a vazante na região sul ocasiona o secamento dos manguezais e consequentemente menores vazões associadas a eles.

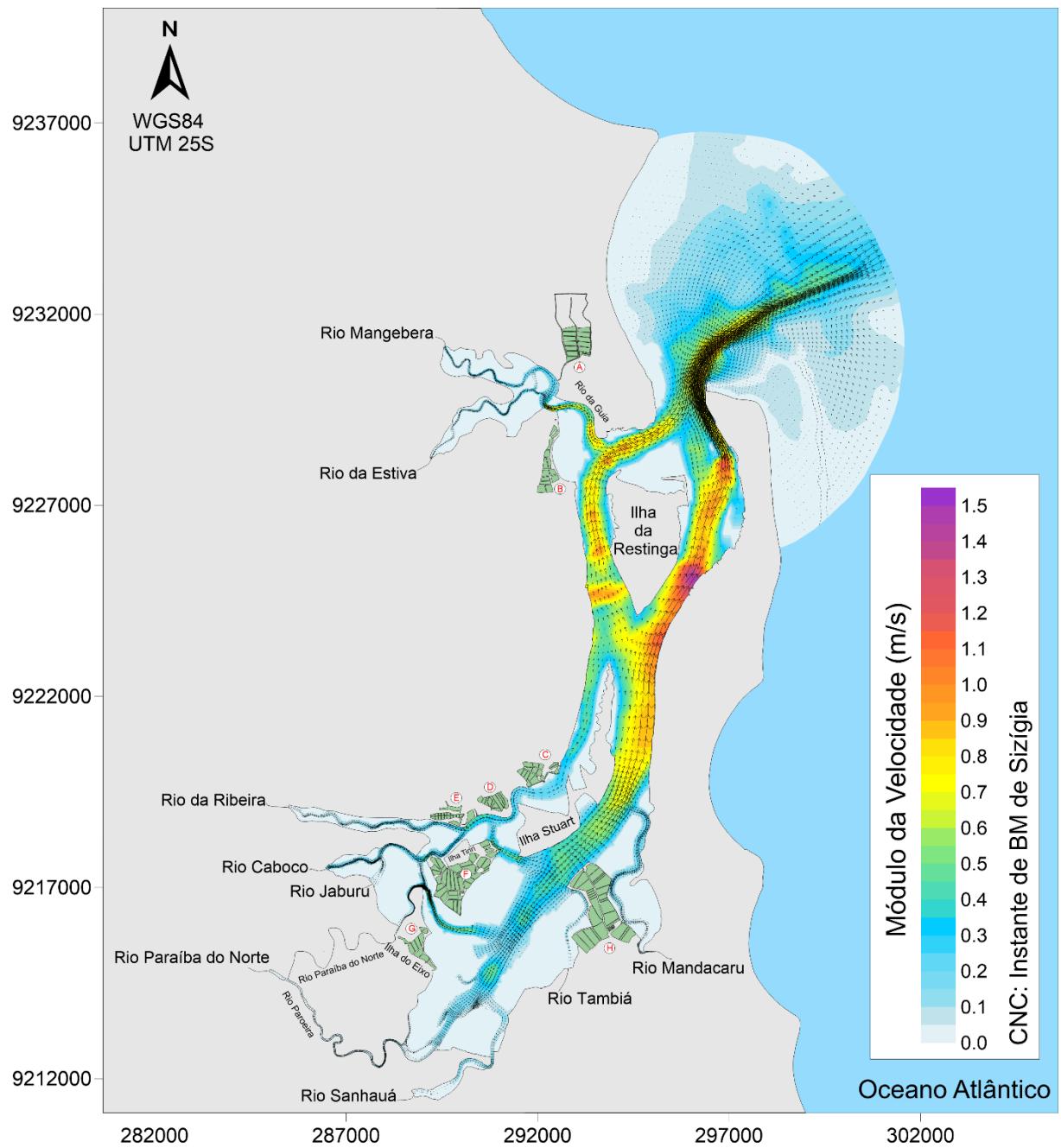


Figura 43. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de sizígia do CNC.

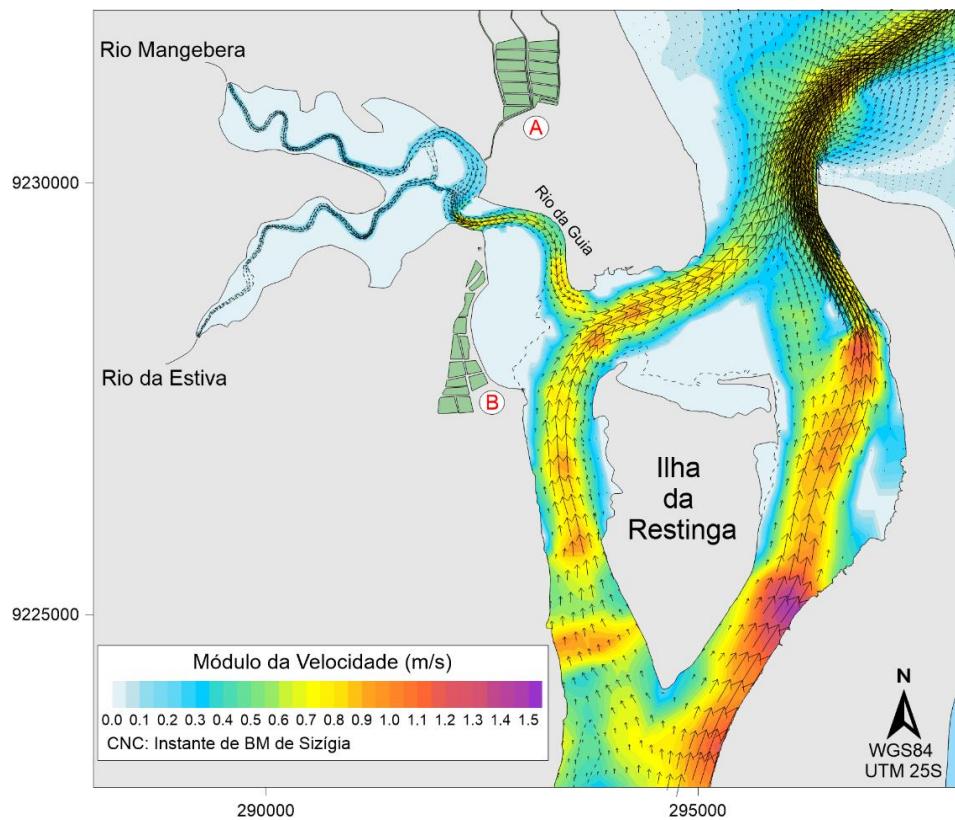


Figura 44. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se novamente a influência da vazante nas velocidades mais altas dos canais principais. As baixa mares de sizígia não são capazes de alagar os manguezais.

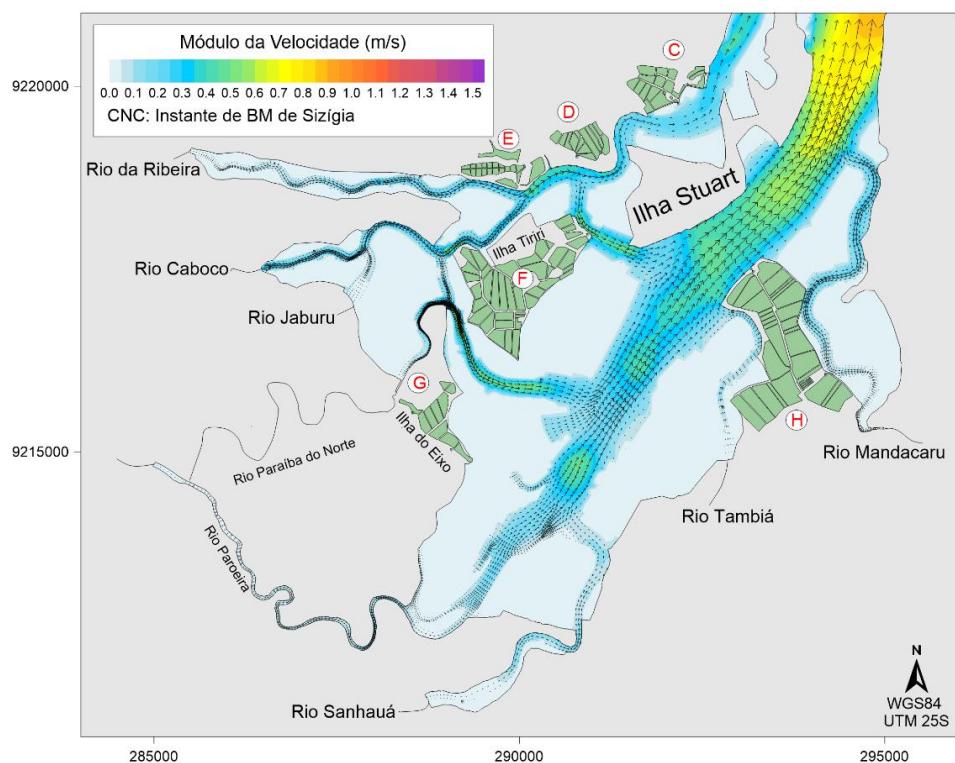


Figura 45. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região sul do ERPN.

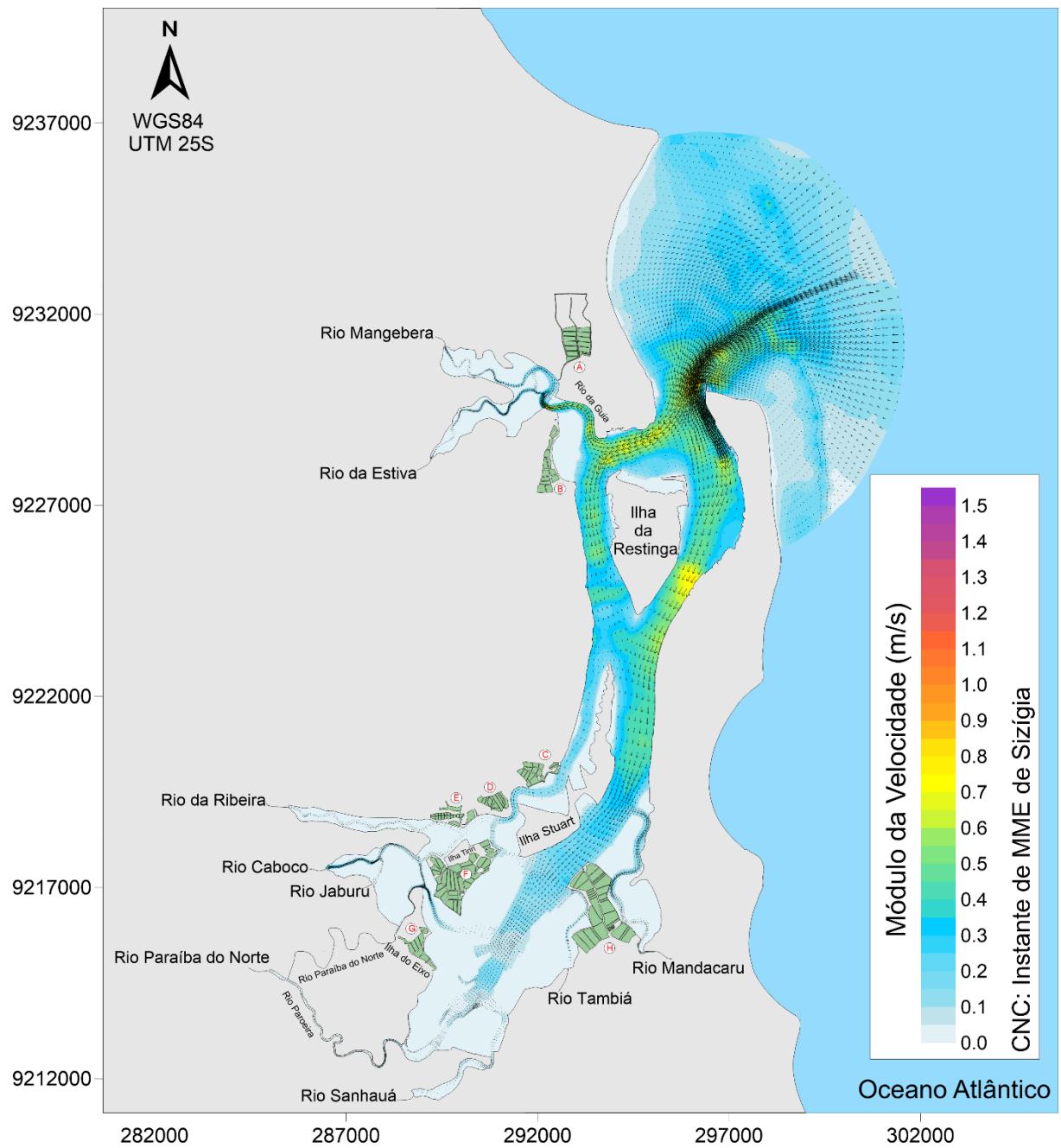


Figura 46. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de sizígia do CNC.

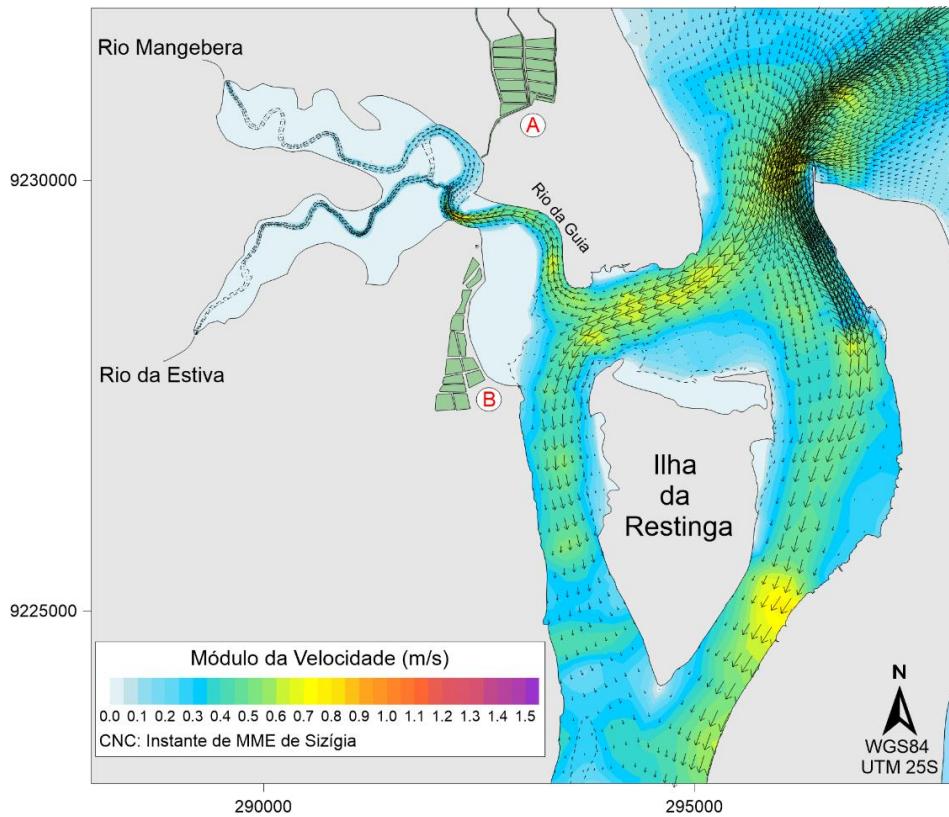


Figura 47. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que a velocidade é nula nos mangues.

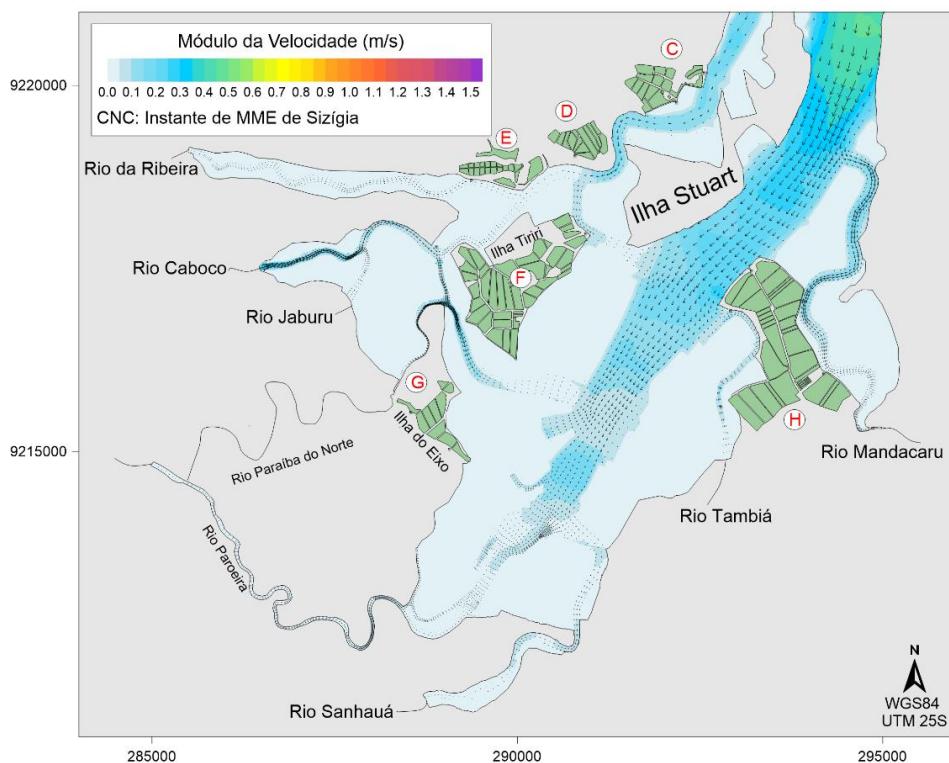


Figura 48. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que a velocidade é nula nos mangues.

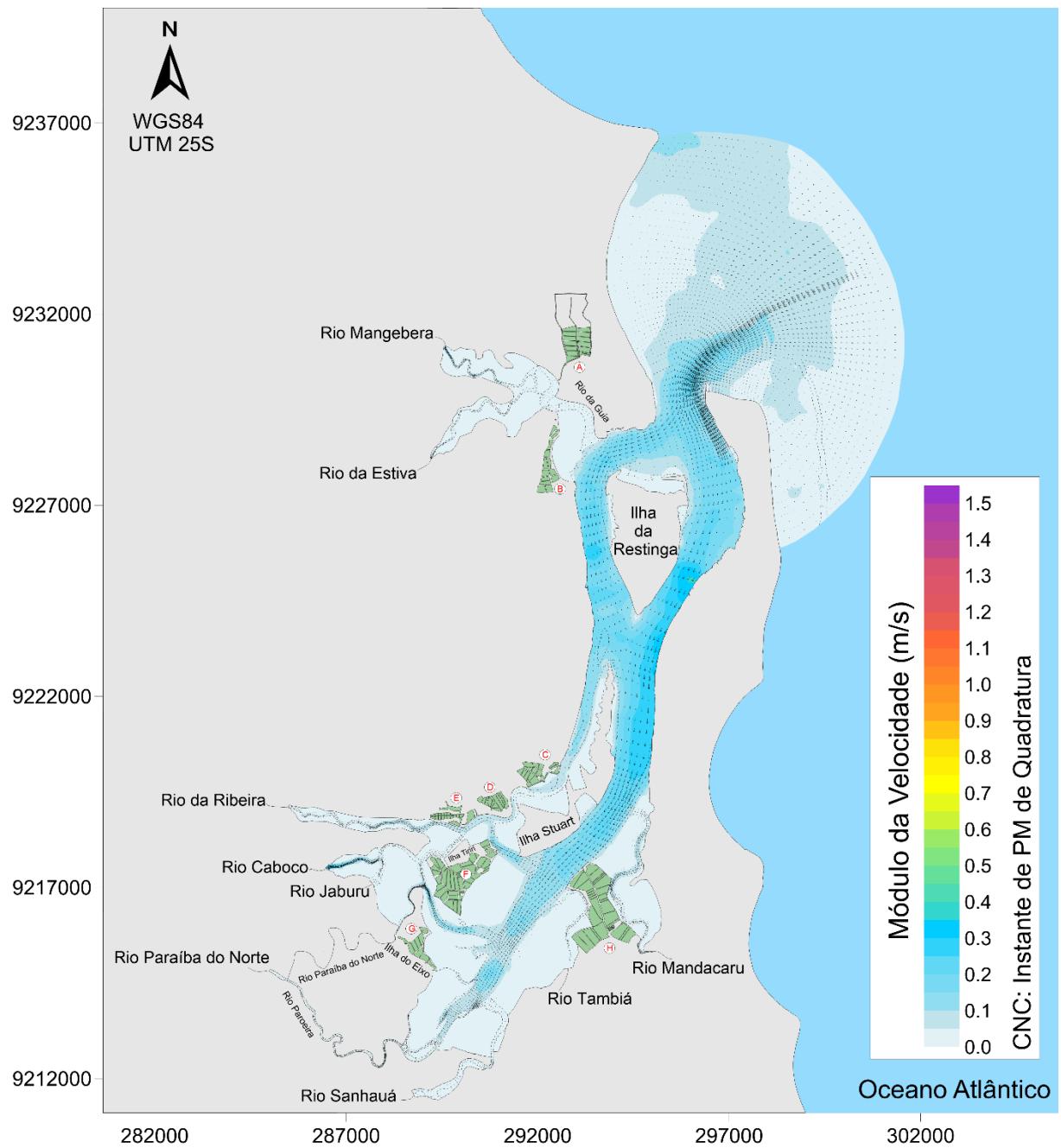


Figura 49. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em PM de quadratura do CNC. Nota-se a fraca intensidade das correntes nas praias adjacentes ao ERPN.

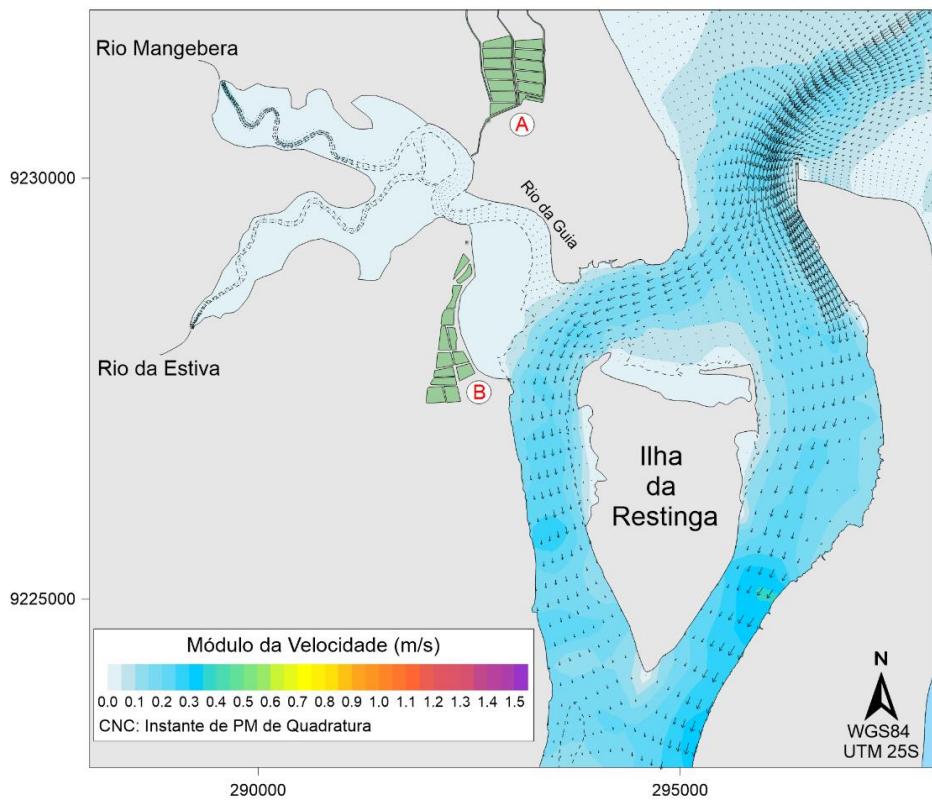


Figura 50. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se a baixa intensidade das correntes durante a PM em todo o domínio, não ultrapassando 0,5 m/s nos canais principais. As PM de quadratura não desenvolvem elevações capazes de alagar toda a extensão dos manguezais.

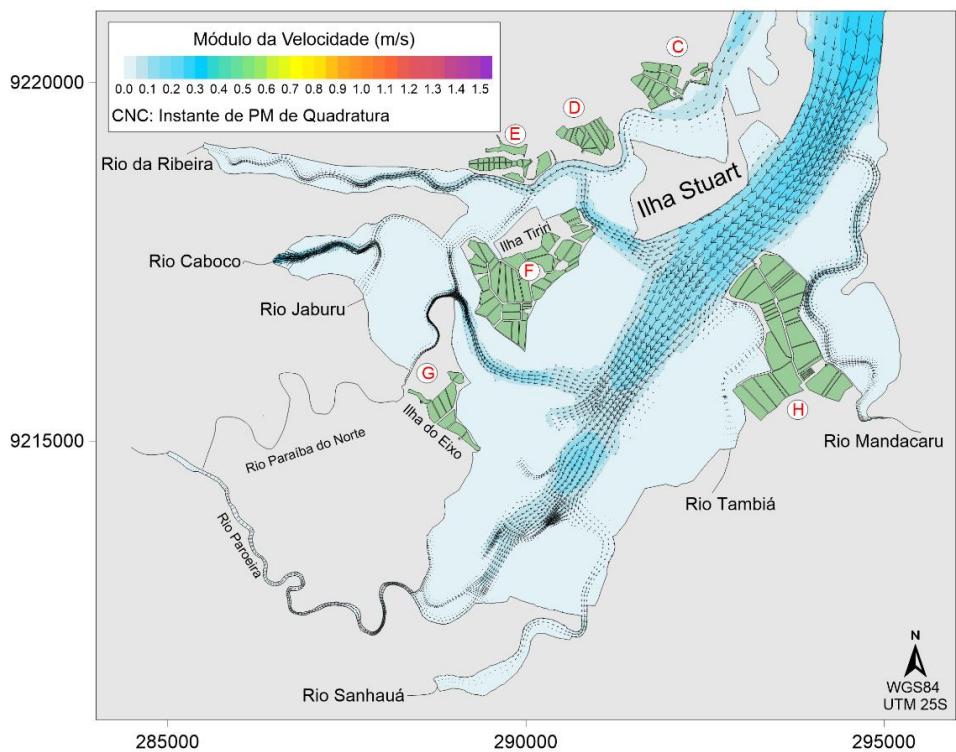


Figura 51. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se a baixa intensidade das correntes durante a PM em todo o domínio, não ultrapassando 0,5 m/s nos canais principais. As PM de quadratura não desenvolvem elevações capazes de alagar toda a extensão dos manguezais.

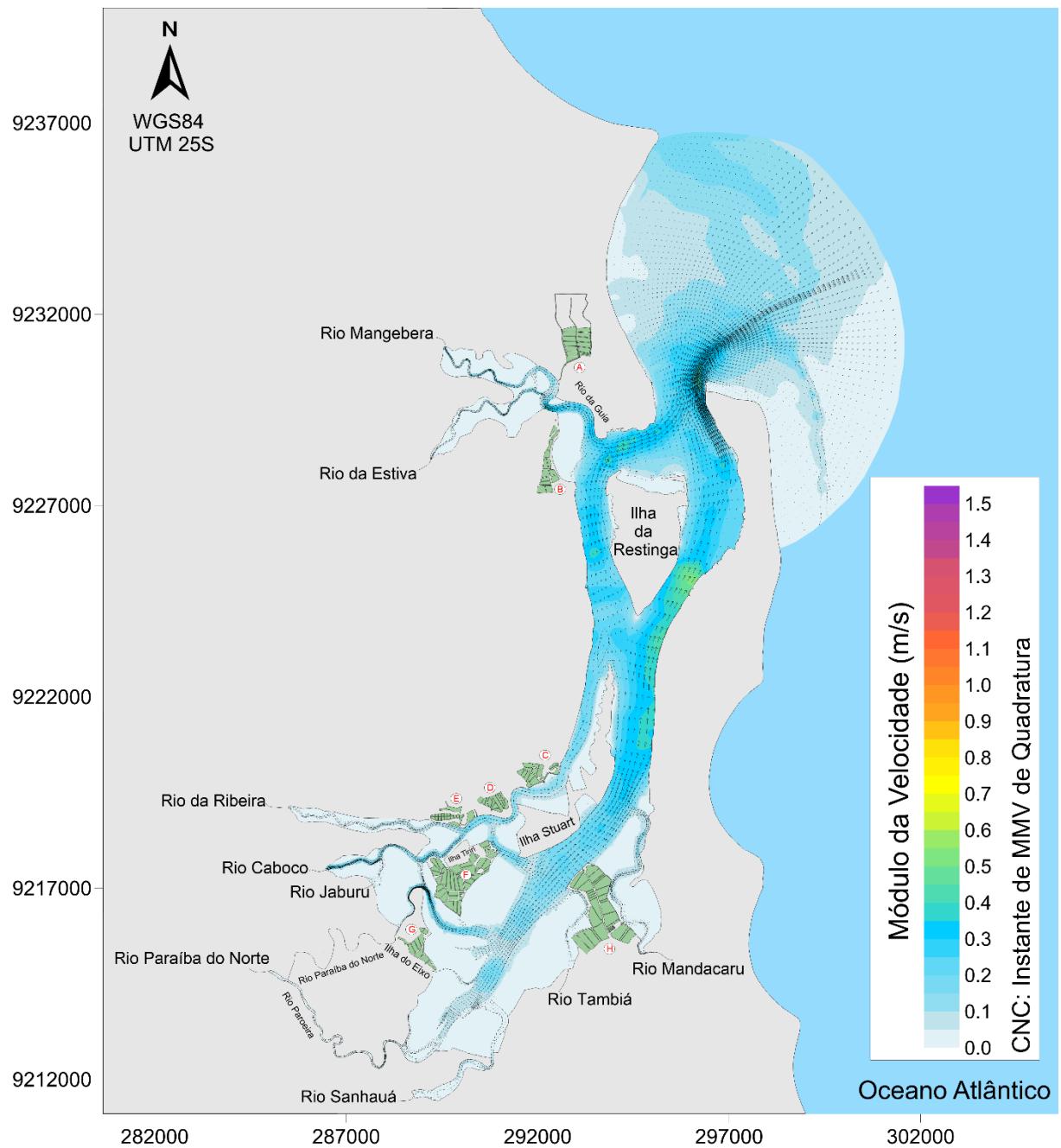


Figura 52. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MMV de quadratura do CNC.

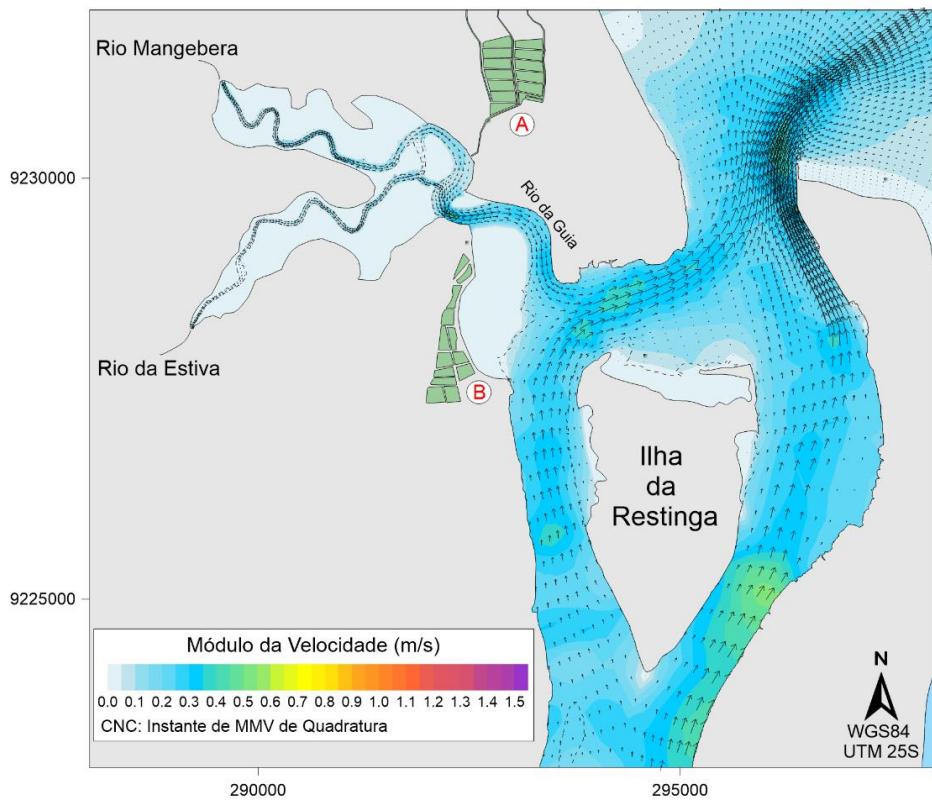


Figura 53. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região norte do ERPN.

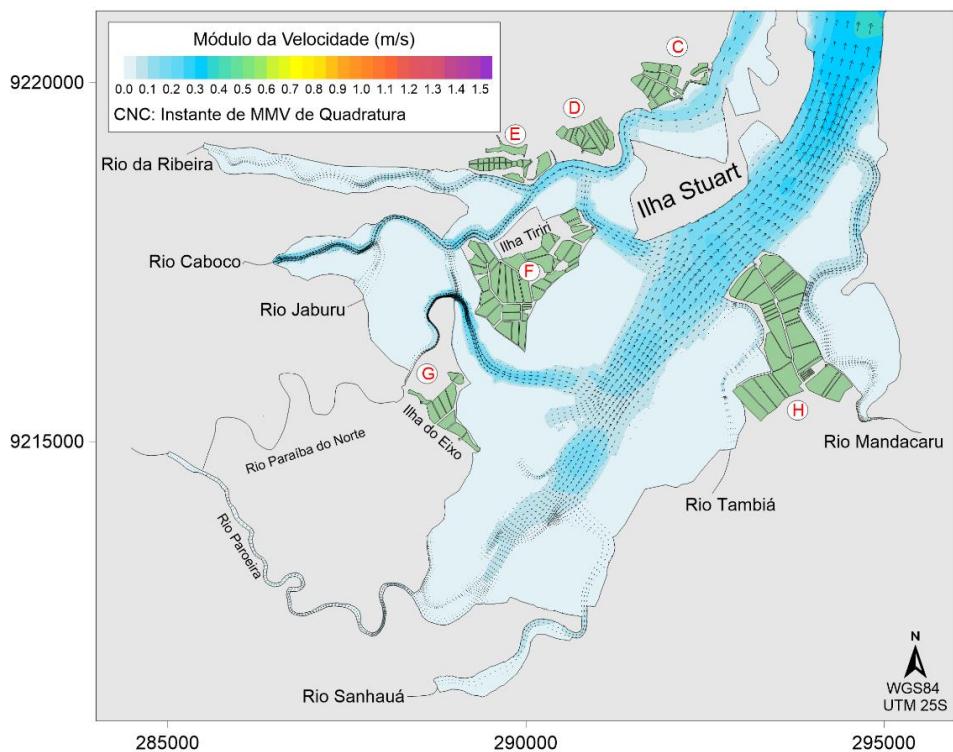


Figura 54. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN.

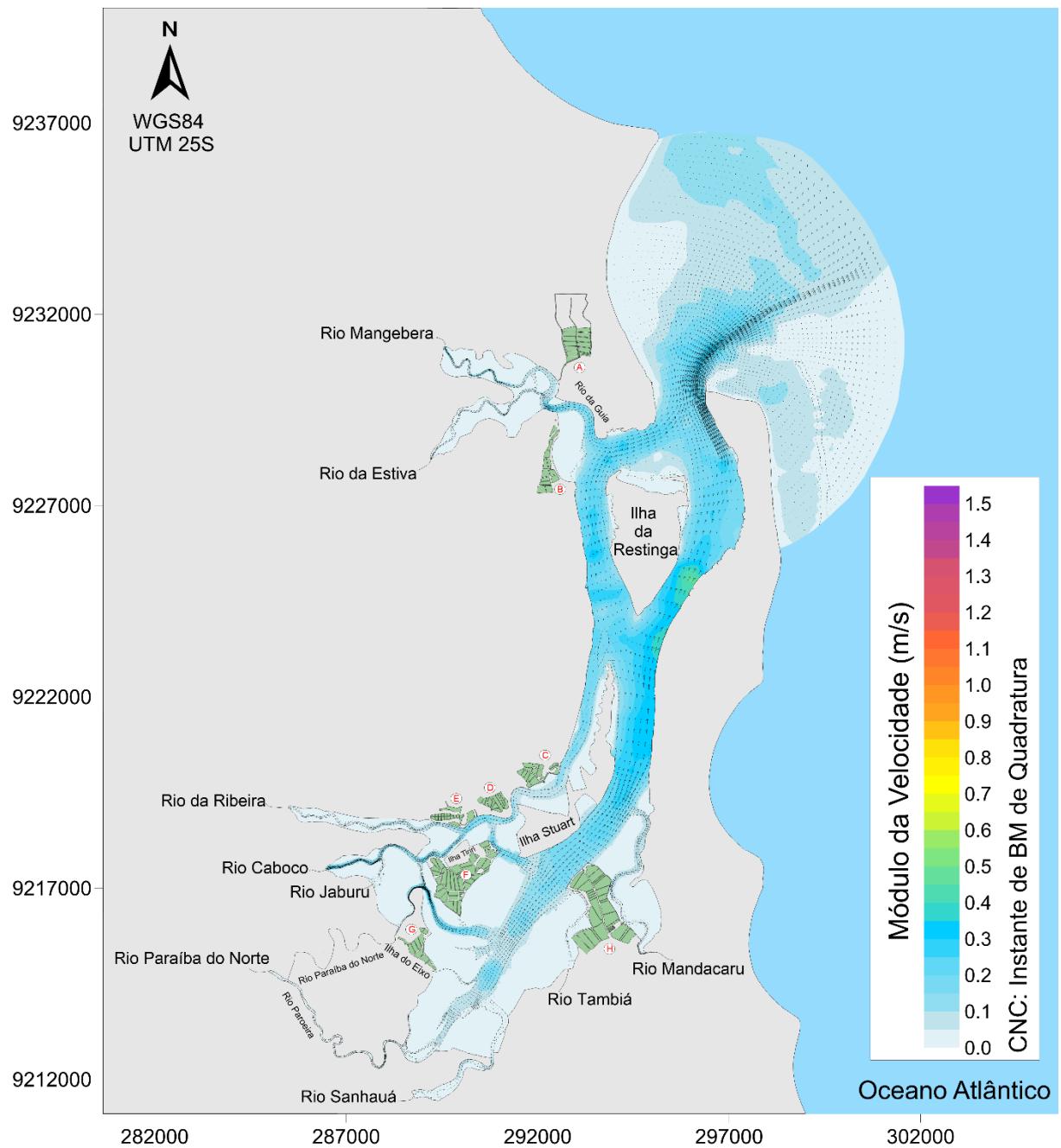


Figura 55. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de quadratura do CNC

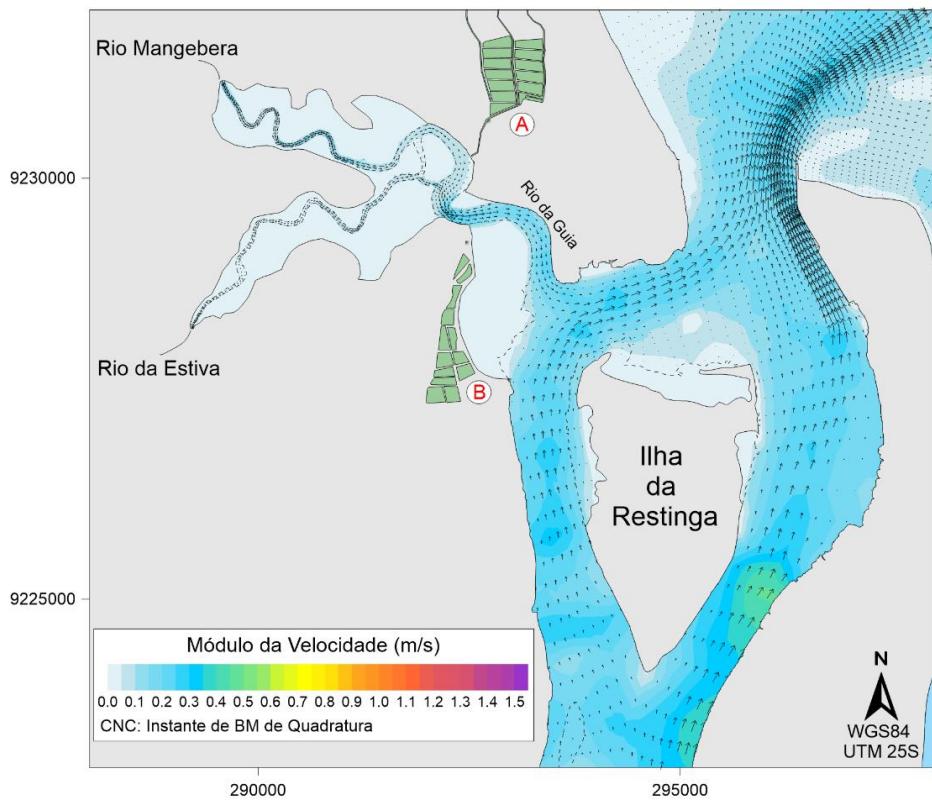


Figura 56. Padrão de circulação hidrodinâmica BM de quadratura na região norte do ERPN.

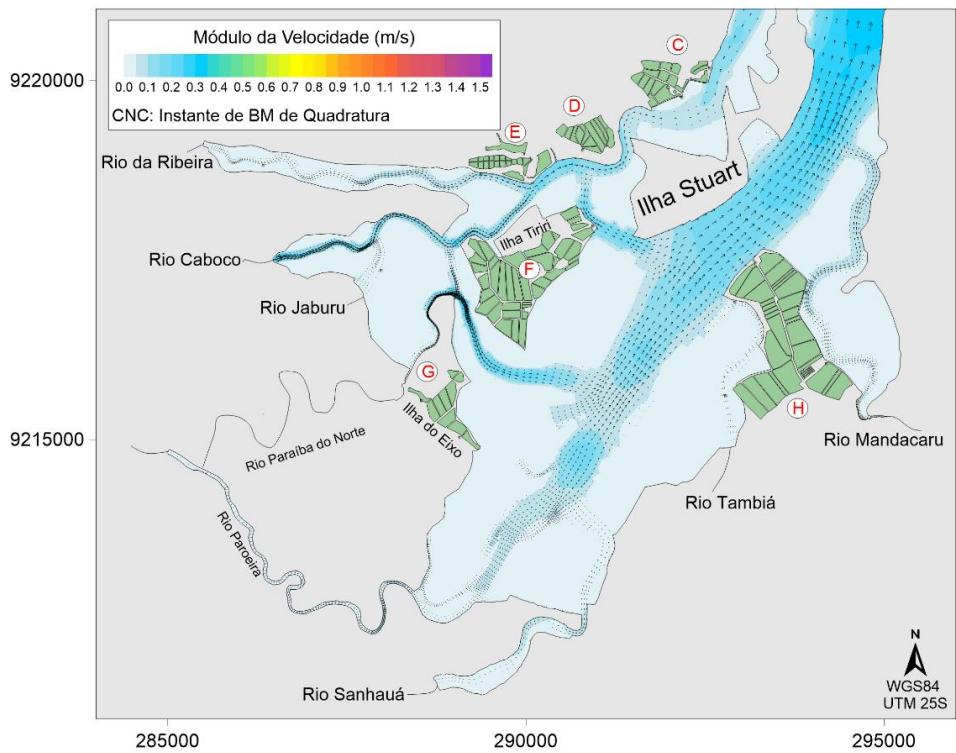


Figura 57. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de quadratura na região sul do ERPN.

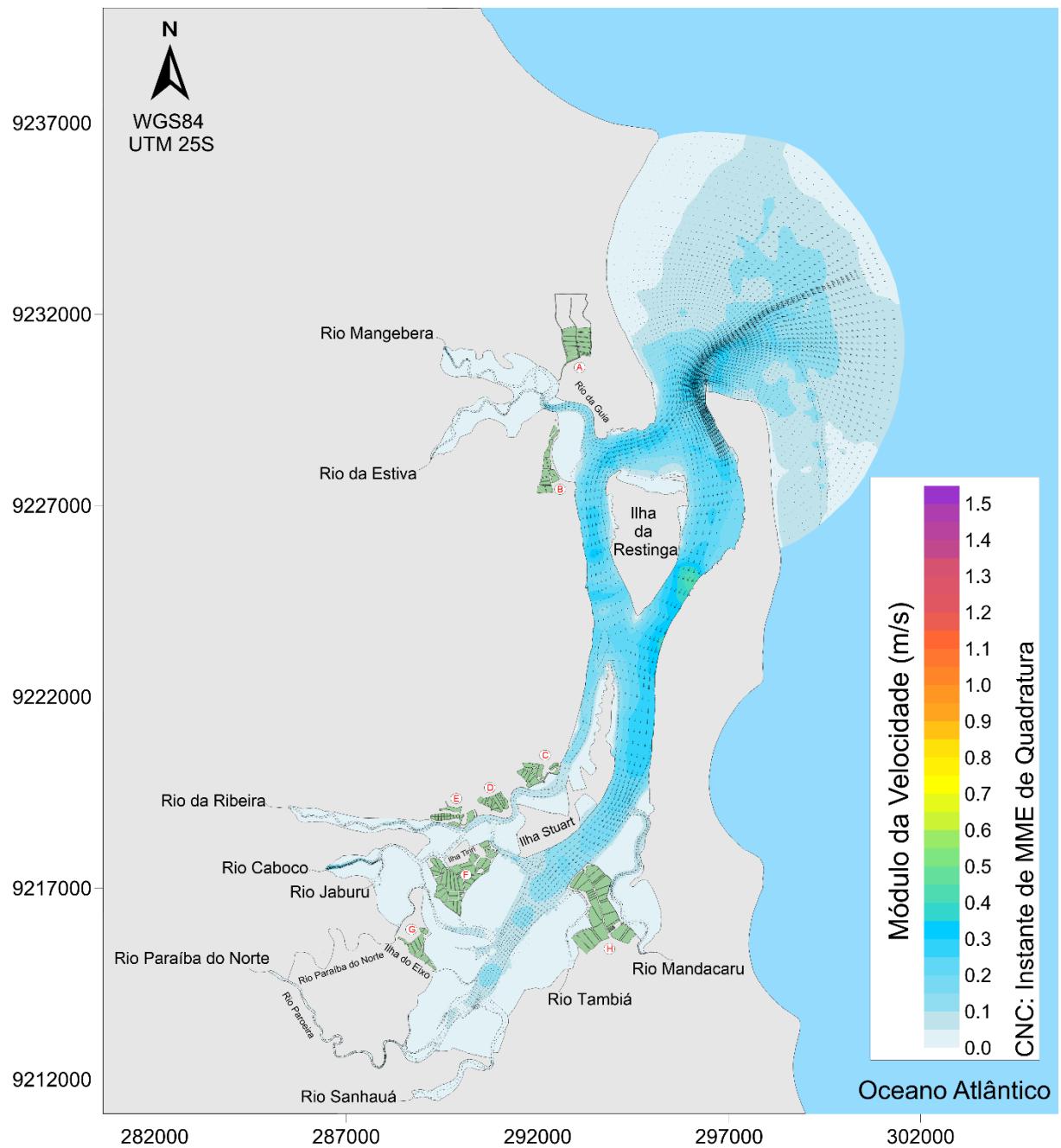


Figura 58. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de quadratura do CNC. É notável as baixas correntes nas praias do município de Lucena, a noroeste da embocadura.

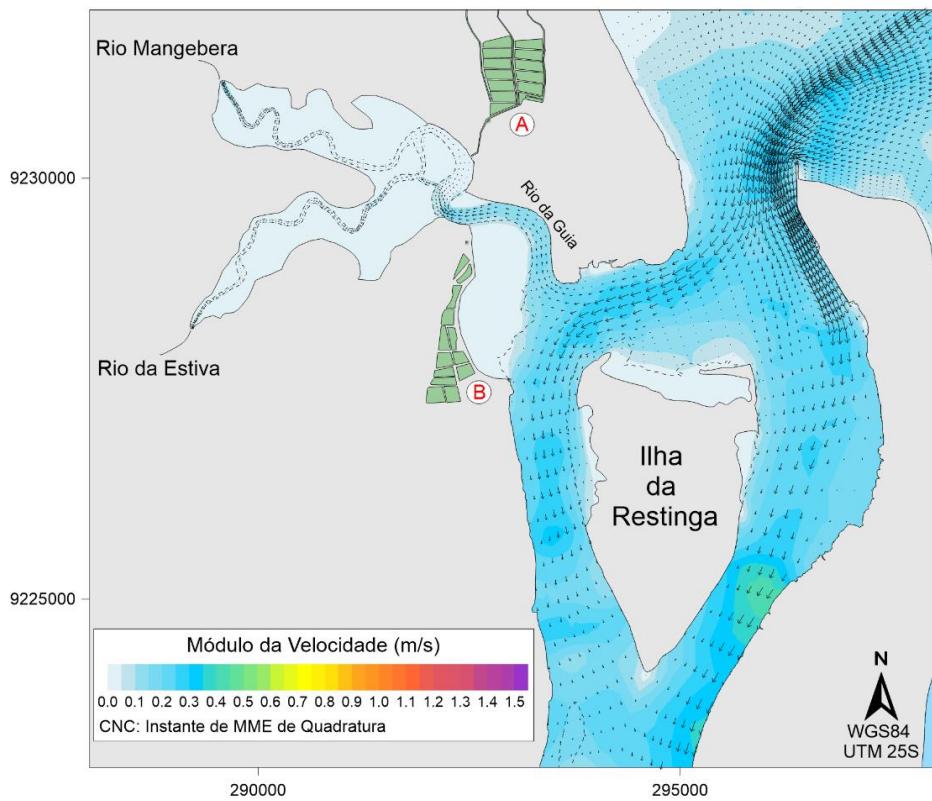


Figura 59. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região norte do ERPN

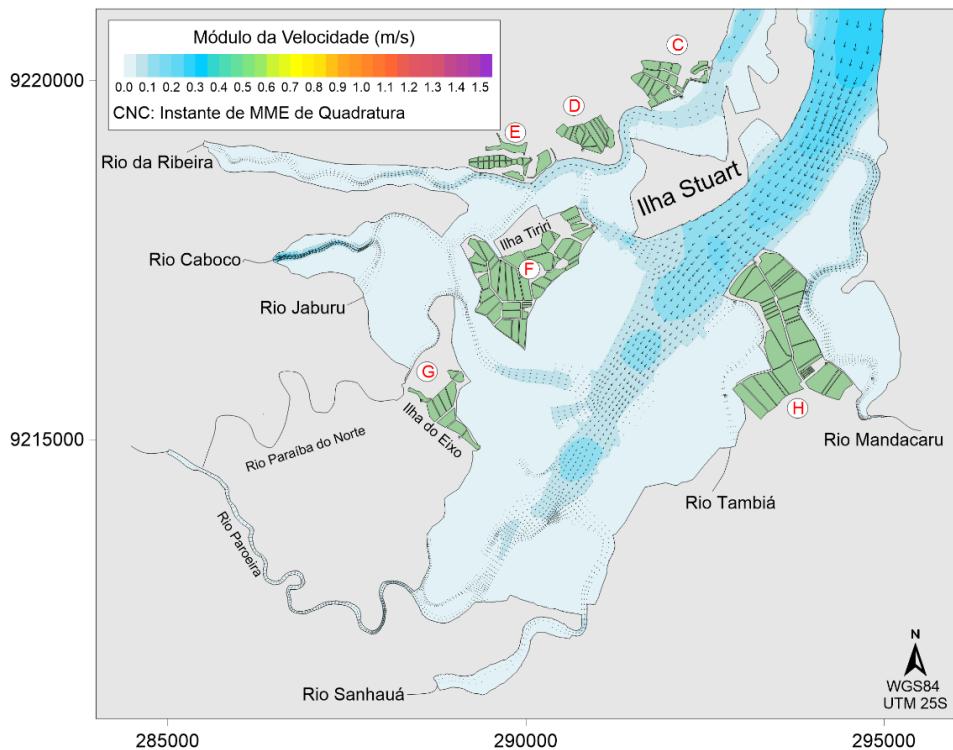


Figura 60. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região sul do ERPN.

A fim de melhor compreender a circulação foi realizada uma média temporal das velocidades com o objetivo de representar a direção e a intensidade do escoamento residual durante um dia lunar para uma maré de sizígia e de quadratura, conforme Figura 61 e Figura 62.

Em ambos os períodos de sizígia e quadratura a direção predominante das correntes é estuário afora, ou seja, de vazante, além de tenderem a seguir os canais mais profundos do estuário.

Enquanto que nas praias de Lucena, na margem esquerda da embocadura, e nos manguezais as velocidades são menos intensas. Locais onde há convergência de correntes são mais propensos ao acúmulo de sedimentos, como por exemplo a região ao norte da Ilha da Restinga.

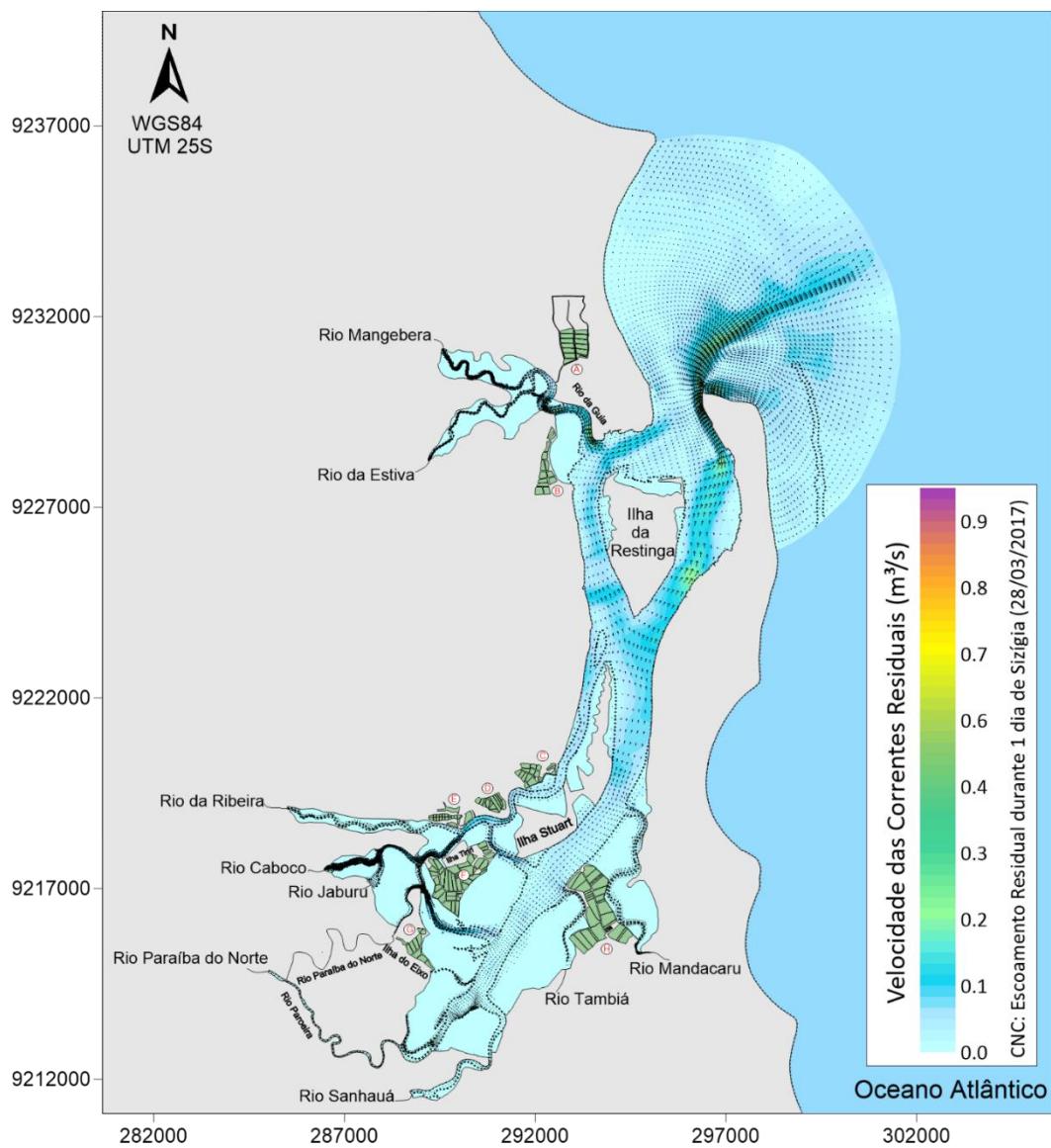


Figura 61. Velocidade em m/s do escoamento residual durante 1 ciclo de maré de sizígia, referente ao dia 28/03/2017, no CNC.

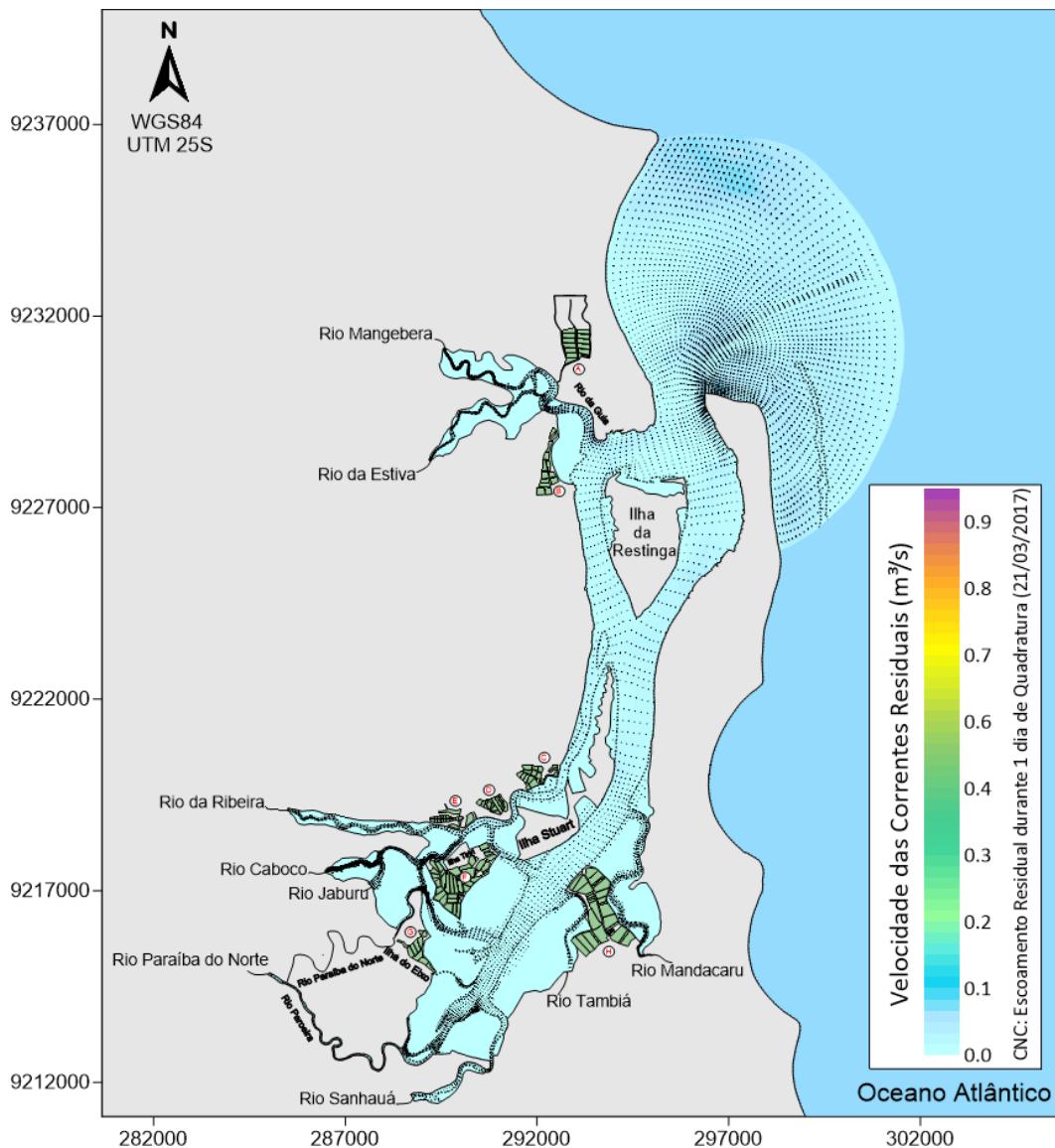


Figura 62. Velocidade em m/s do escoamento residual durante 1 ciclo de maré de quadratura, referente ao dia 21/03/2017, no CNC.

4.3 ANÁLISE DE ASPECTOS DE QUALIDADE DA ÁGUA NO ERPN

A análise da qualidade da água do ERPN compreendeu distintas etapas. Inicialmente são apresentados os resultados do estudo dos tempos característicos do corpo d'água, como a variação espacial e temporal das taxas de renovação e idade da água.

Em seguida são discutidas as influências do processo de despresa da carcinicultura na qualidade, tanto sob uma perspectiva lagrangeana do escoamento, analisando o alcance das plumas desse processo, como quanto às reações de produção consumo de OD e DBO que ocorrem no estuário.

4.3.1 TAXA DE RENOVAÇÃO

Após um dia de simulação, é perceptível a grande influência da sazonalidade na renovação das águas do estuário. No CNC, o rio da Guia apresenta em torno de 90% de sua água renovada, enquanto que as regiões de manguezais próximas a este, e os arredores da Ilha da Restinga, também possuem boa renovação após 24hrs. Isso é reflexo principalmente das altas vazões características do período simulado, como também da sua proximidade com a embocadura, que com a entrada da água do mar, acelera o processo de renovação. Em contrapartida, durante o CNS, onde as vazões são pequenas, a renovação nesta mesma região atinge apenas em torno de 20%. Assim como na porção norte, essa mesma dinâmica é vista ao sul do estuário.

A Figura 64 ilustra a renovação após 7 dias de simulação. Durante o CNC grande parte do estuário já se encontra com uma taxa de renovação maior que 50% de suas águas. Esse mesmo período, quando comparado com o CNS, mostra que a região sul, mais precisamente nos rios Mandacaru e Paroeira, possui uma renovação mais lenta. Após 15 dias (Figura 65), apenas esta região possui renovação inferior a 60%.

Analizando a importância dos períodos sazonais na renovação do ERPN, nota-se que, durante o CNC, ao fim de 30 dias de simulação a maior parte do estuário tem suas águas renovadas em mais de 90%. Em contrapartida, durante o CNS, algumas regiões ao sul do domínio ainda apresentam uma taxa de renovação compreendida entre 60% e 80%.

Com essa análise é possível identificar regiões em que há maior estagnação das águas, e consequentemente que estão mais susceptíveis a processos de eutrofização. A porção sudeste do estuário se enquadra nesse quadro de vulnerabilidade, mais precisamente no rio Mandacaru, Tambiá e Sanhauá, como também suas áreas adjacentes. É importante destacar que esta região, além de possuir uma dinâmica de renovação mais lenta, também é a porção mais urbanizada do estuário, sofrendo maiores pressões quanto à qualidade da água ali presente.

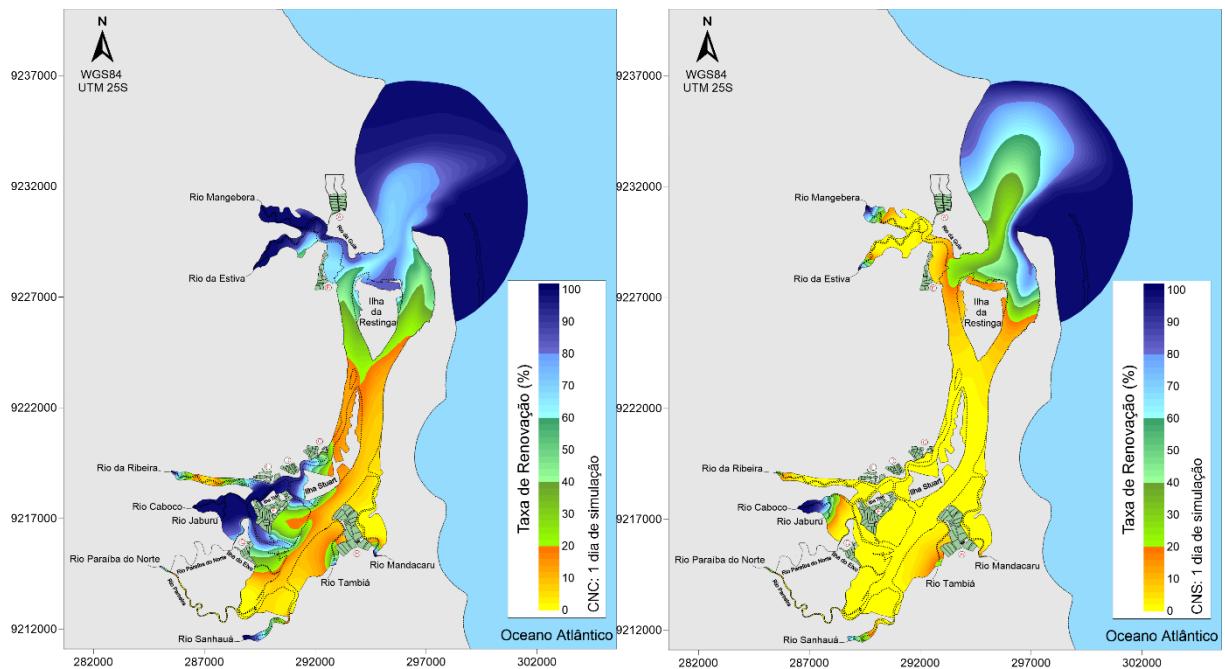


Figura 63. Taxa de Renovação após 1 dia de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).

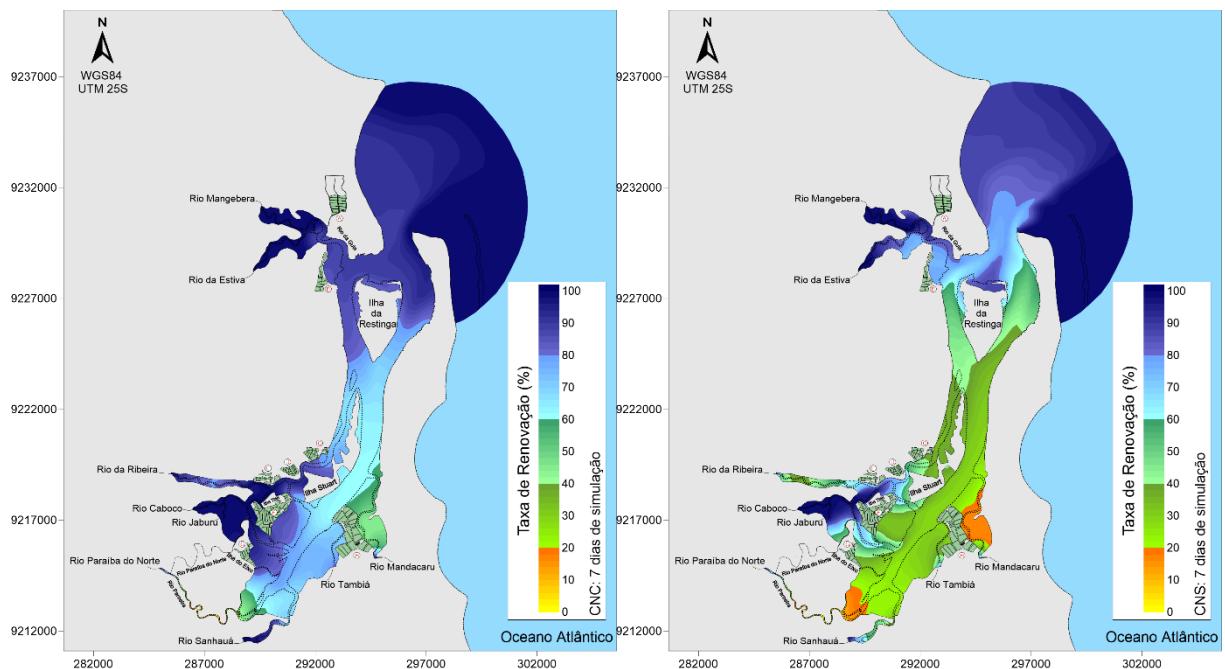


Figura 64. Taxa de Renovação após 7 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).

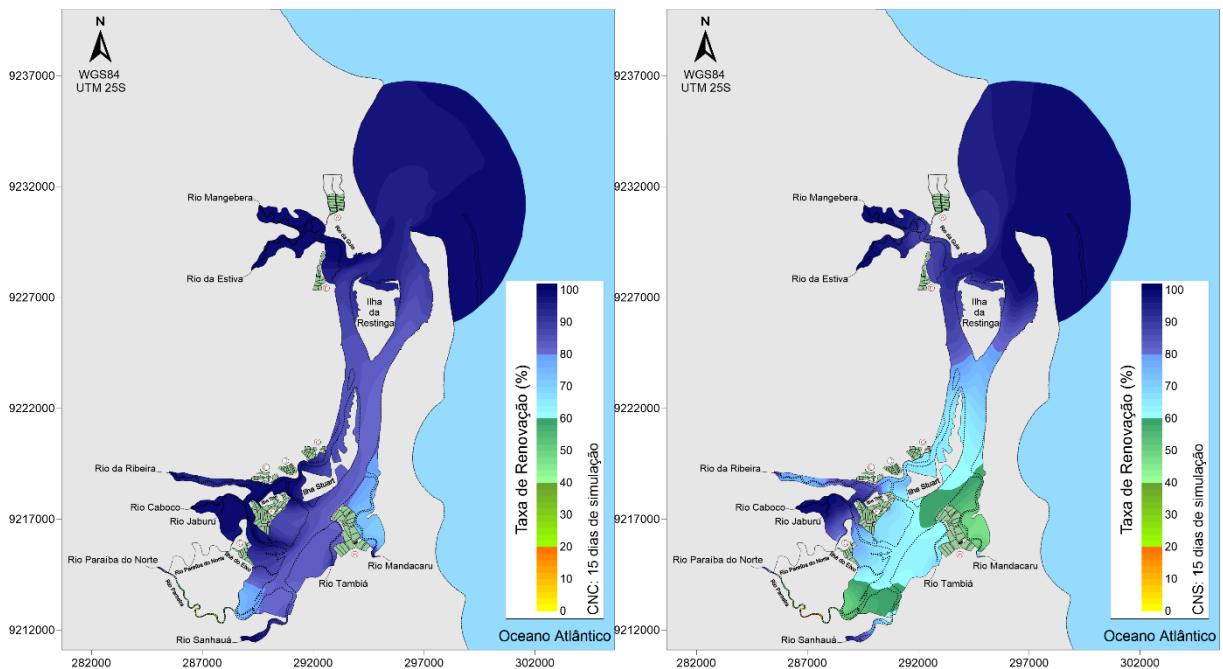


Figura 65. Taxa de Renovação após 15 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).

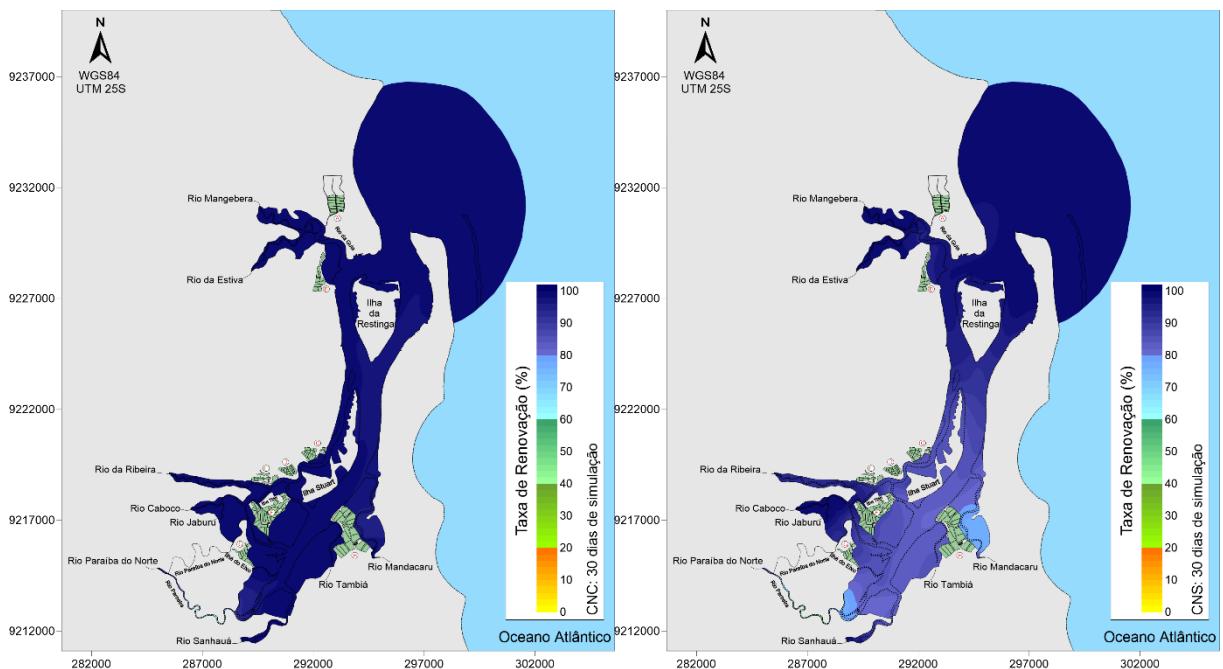


Figura 66. Taxa de Renovação após 30 dias de simulação para os Cenários Representativos de Cheia (à esquerda) e de Seca (à direita).

Ao comparar os resultados em estações específicas localizadas nos manguezais e próximo às fazendas de criação de camarão, observou-se que, os mangues na porção sul do ERPN possuem uma renovação da água mais lenta. Isso ocorre devido às fracas correntes associadas a essas regiões, como também à sua dinâmica de alagamento e secamento. Cabe ressaltar a presença da Unidade de Conservação da Floresta Nacional da Restinga de Cabedelo, localizada nas

adjacências do rio Mandacaru, que se encontra sob influência dessa baixa taxa de renovação em períodos de seca.

Quanto ao resultado das estações próximas aos viveiros de carcinicultura, percebeu-se que, assim como os resultados exibidos nos mapas de isolinhas de renovação, as áreas próximas ao rio Mandacaru são mais críticas em termos de renovação. Nessa região mencionada acima é onde está localizada uma das maiores fazendas do ERPN, a ‘Fazenda H’ e os seus 4 pontos de lançamento de despesca.

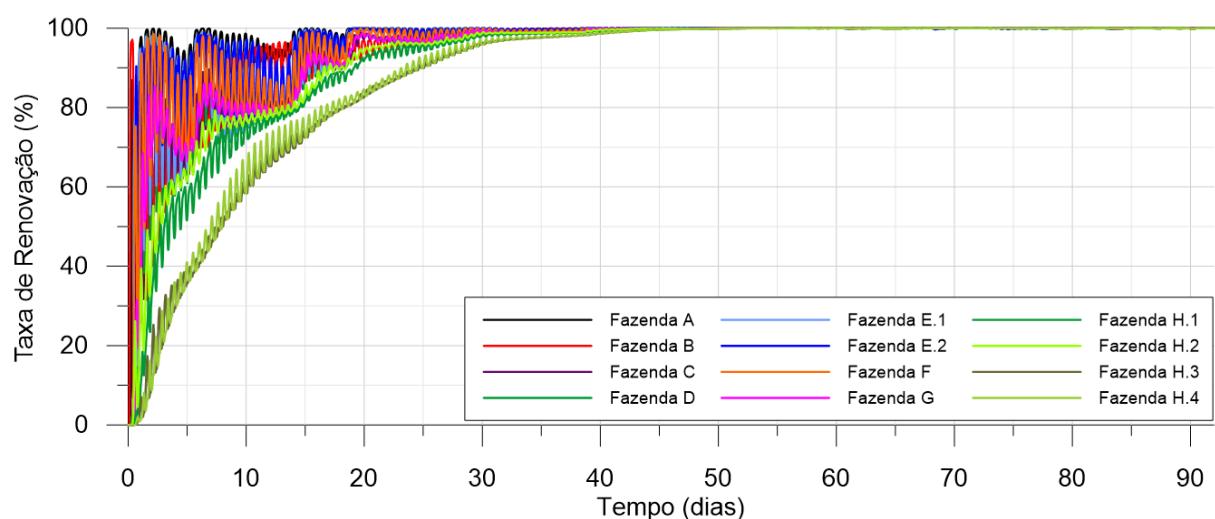


Figura 67. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas próximas ao descarte de efluentes de despesca, durante um período de 92 dias do CNC.

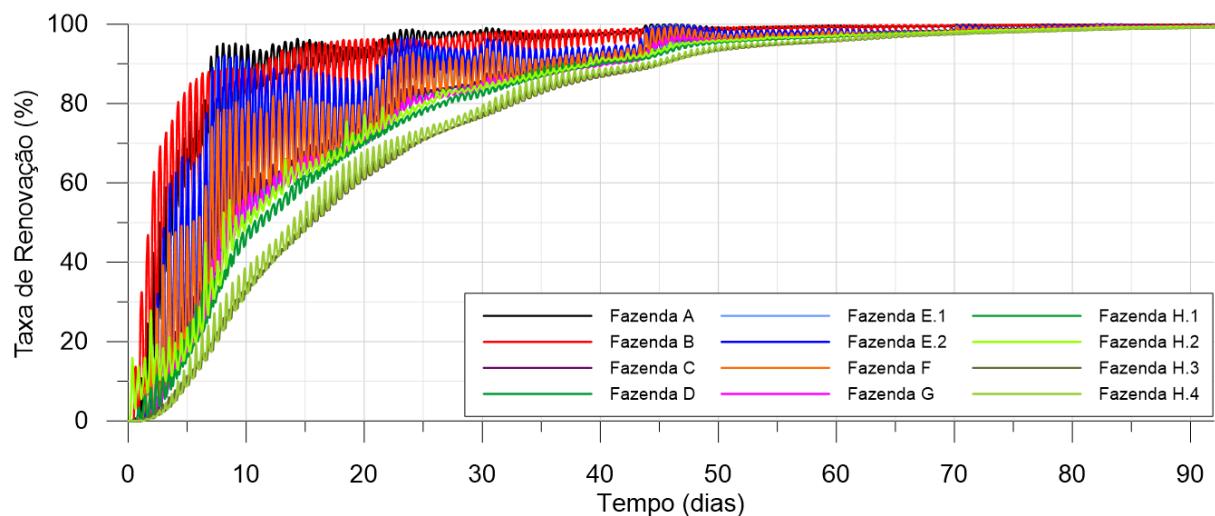


Figura 68. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas próximas ao descarte de efluentes de despesca, durante um período de 92 dias do CNS.

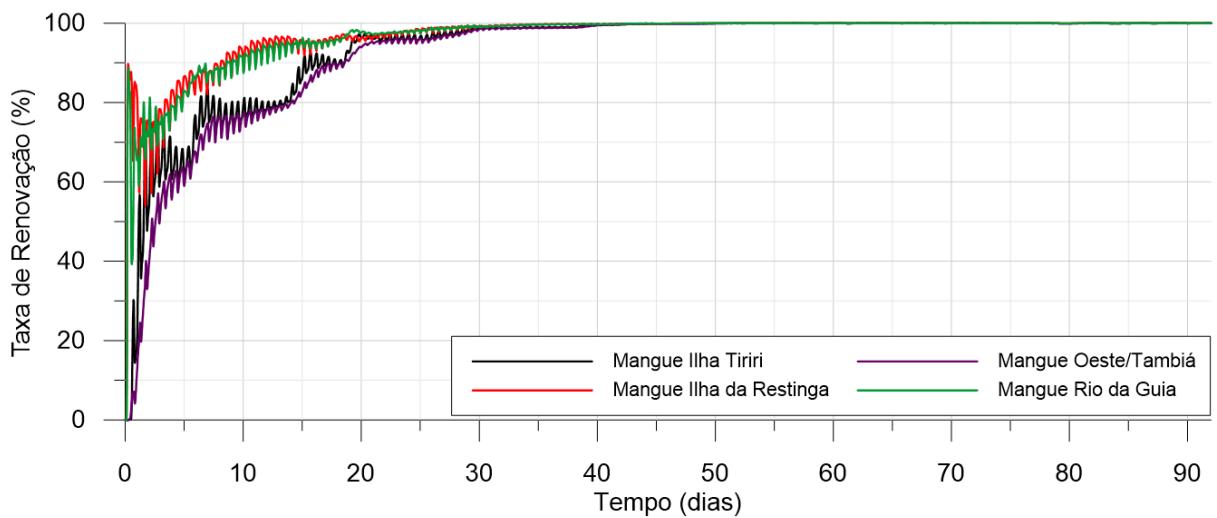


Figura 69. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas em áreas de manguezais durante um período de 92 dias do CNC.

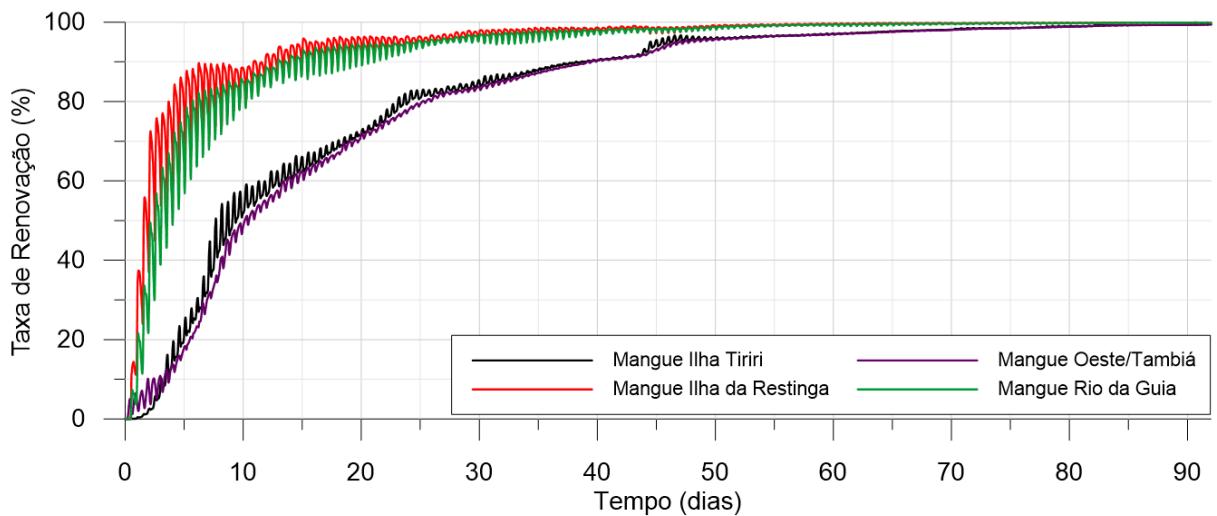


Figura 70. Séries Temporais de Taxa de Renovação para as Estações localizadas em áreas de manguezais durante um período de 92 dias do CNS.

4.3.2 IDADE DA ÁGUA

A Idade da Água, assim como a Taxa de Renovação, é um parâmetro que, a partir de uma visão euleriana do transporte, simula o tempo que a água reside, considerando sua variação espacial. No decorrer da simulação, há uma estabilização do valor de idade da água, ou seja, as águas no interior do domínio de modelagem vão ficando mais velhas, à medida que há o aporte de águas novas no sistema. Assim, quanto maior a renovação em um determinado local, menor será a idade da água nessa mesma região. Em contrapartida, quanto mais estagnada encontrar-se uma área, maior será a idade da água no local.

Os resultados obtidos com o Modelo de Transporte Euleriano mostraram a ação do ciclo da maré nas proximidades da embocadura do estuário. Essas regiões apresentaram uma idade menor que as demais, principalmente no CNC.

Como já exposto anteriormente, há também influência significativa dos rios nos processos de mistura da água por todo o estuário. Visto que, durante o CNC, há um volume mais expressivo de água nova entrando no estuário pelos afluentes, a idade durante esse cenário é menor, ou seja, a água passa menos tempo circulando pelo domínio.

Ao fim dos 92 dias de simulação, é visível que, assim como exposto nos resultados de Taxa de Renovação, a porção sudeste do ERPN é uma região onde não há muita mistura das águas, o que as tornam mais velhas e, portanto, mais aprisionadas nessa região. A Figura 71 exibe a comparação entre os cenários após os 92 dias de simulação.

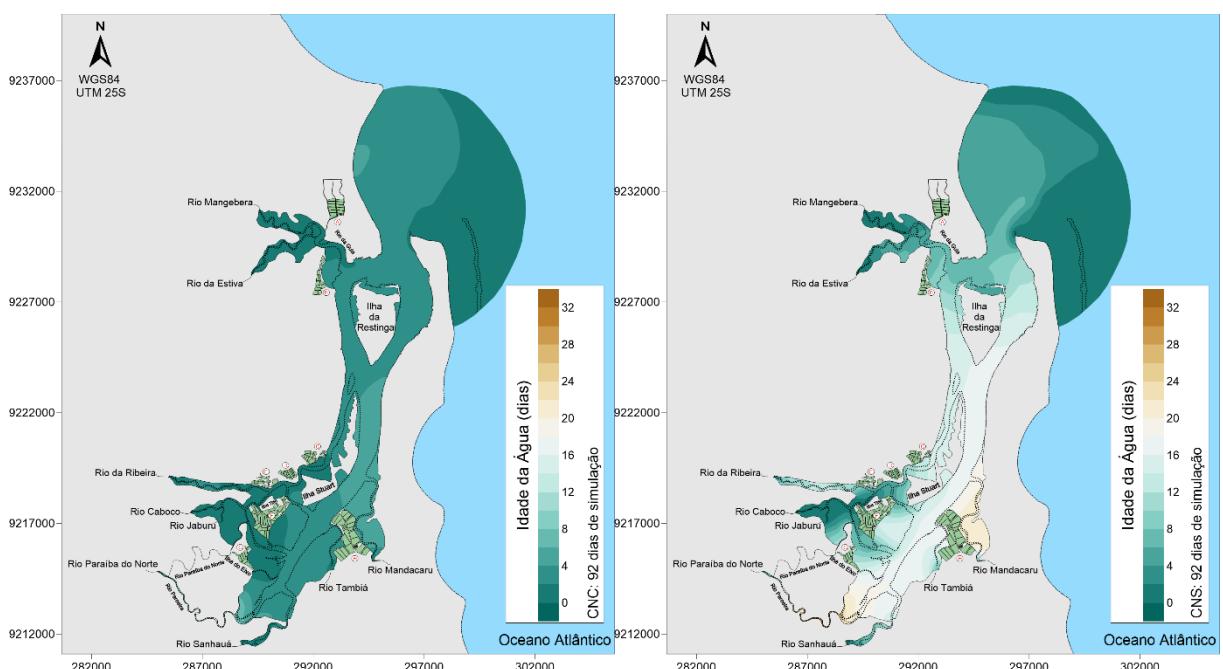


Figura 71. Mapa de isolinhas de Idade da Água no final da simulação de ambos os Cenários de Cheia e de Seca respectivamente.

4.3.3 ANÁLISE DO DESTINO DOS EFLUENTES DA CARCINICULTURA

Os resultados foram gerados usando um modelo probabilístico que calcula a frequência de passagem das partículas oriundas das fontes de despesca ao longo de um período de tempo. Aqui, o tempo de simulação é referente aos Cenários de Cheia e Seca, que são de 92 dias cada.

Conforme explicado na seção 3.2.4, foram simuladas dezoito situações distintas. Em duas dessas simulações as oito fazendas estão atuando em conjunto, exibindo assim uma visão geral

da simulação, representando melhor o comportamento dos efluentes no domínio. A Figura 72 expõe os mapas com os resultados comparativos entre o CNC e o CNS. É importante ressaltar que as simulações não calculam a concentração, apenas a passagem das partículas oriundas da despesca.

Nota-se no mapa de isolinhas que há uma insistência da água da despesca em permanecer à oeste do estuário, principalmente nas proximidades da Ilha da Restinga, Ilha Stuart e na desembocadura. A maior percentagem de ocorrência na margem oeste explica-se pela maioria de fazendas estarem concentradas nessa região, ao contrário da margem leste, onde há apenas uma fazenda. No geral não há o alcance da pluma nas praias adjacentes ao Porto de Cabedelo, nem na região do Parque Estadual Marinho de Areia Vermelha - PEMAV. Em contrapartida, a pluma passou em torno de 25% do tempo de simulação nas praias do município de Lucena, localizadas na margem esquerda da embocadura. Conforme observado nos resultados hidrodinâmicos do escoamento residual, essa região costeira possui baixas correntes residuais, o que faz com que a dispersão da água nessa região seja lenta.

Durante o CNC os efluentes se concentram à esquerda da Ilha da Restinga, próximo à saída do estuário. Isso ocorre por consequência da forte influência das vazões afluentes, que transportam o efluente para a foz estuarina.

Como a renovação é mais lenta durante o CNS, conforme Figura 63, a tendência é que a pluma permaneça mais tempo no domínio. Além disso, de acordo também com os resultados do modelo euleriano, as águas do rio Mandacaru tendem a ficar aprisionadas, sendo essa a região que apresentou a maior idade da água e consequentemente os efluentes ali despejados têm mais dificuldade em sair do domínio de modelagem, ou se difundir em outras regiões.

Se verifica também uma maior ocorrência de passagem das plumas em áreas de manguezais durante o período de secas fluviais. Principalmente próximo a Fazenda B e às regiões de mangues do rio da Guia.

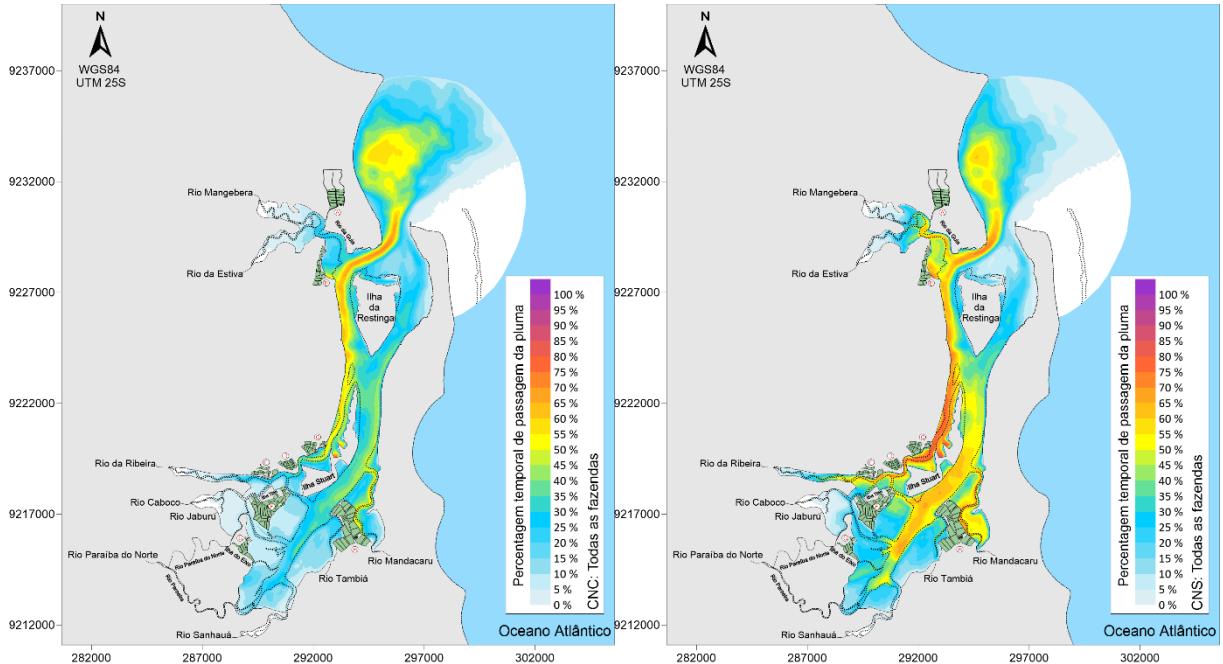


Figura 72. Comparação da persistência de passagem de plumas de todas as fazendas inseridas no modelo durante os 92 dias de simulação de cenário de cheia (CNC) à esquerda e de seca (CNS) na direita respectivamente.

As demais simulações foram feitas separadamente para cada fazenda, com o intuito de melhor visualizar a influência de cada uma no domínio de modelagem. Assim, da Figura 73 a Figura 80 estão apresentados os mapas com as comparações isoladas de cada fazenda, em ambos os cenários admitidos. A pergunta que se deseja responder com essas simulações individuais é: por onde passam as águas provenientes de cada fazenda, considerando um ciclo de cultivo?

As fazendas localizadas na região norte do estuário, e mais próximas à sua foz, tiveram resultados semelhantes, são elas as Fazendas A e B, representadas na Figura 73 e Figura 74 respectivamente. Nelas, as partículas da despensa situam-se com mais frequência no rio da Guia e nas praias de Lucena, isso ocorre devido à influência das correntes longitudinais dessas praias, que transportam a água nessa direção. Como as correntes nessa região são pouco intensas, há uma tendência em as águas permanecerem no local.

A linha vermelha representa o limite dos 5% de passagem da pluma, i.e., na região externa à linha, só houve passagem da pluma naquelas regiões apenas em 5% ou menos do tempo da simulação.

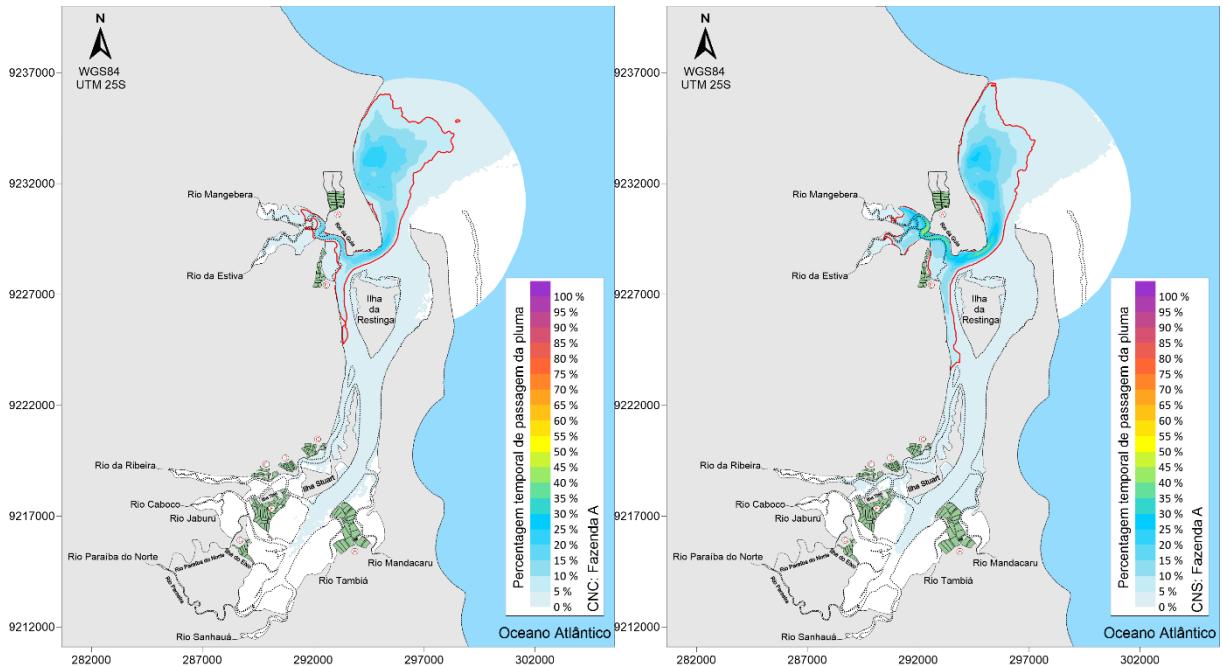


Figura 73. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda A durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

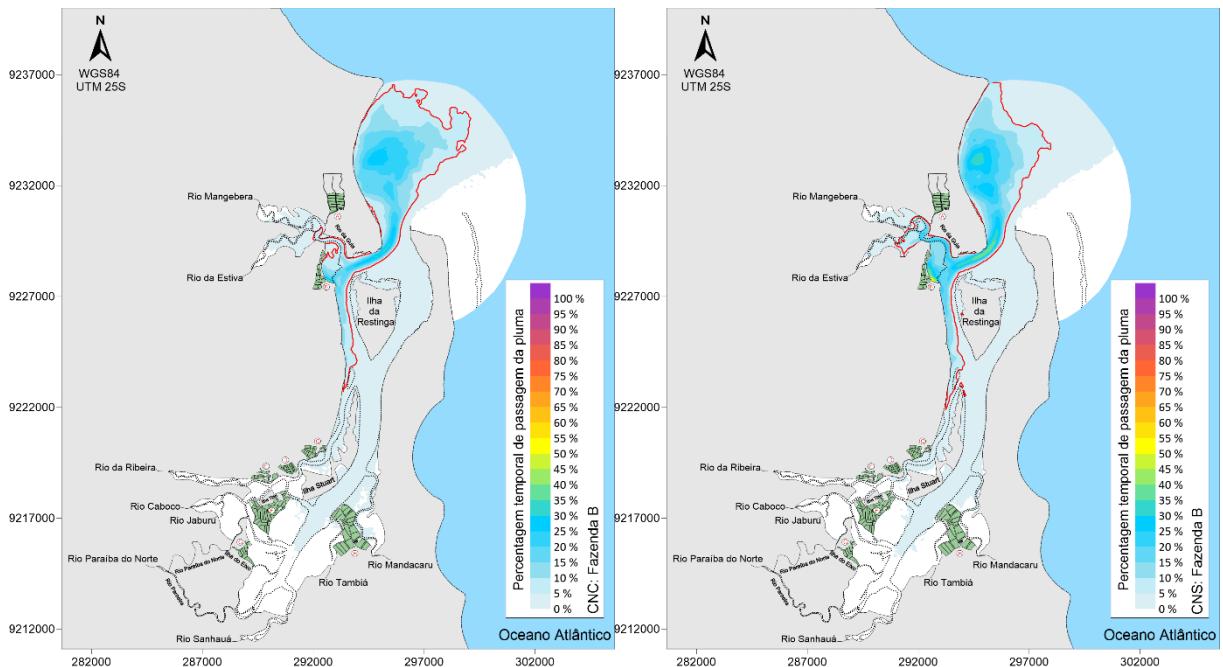


Figura 74. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda B durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

Observando os resultados da Fazenda C, D e E na Figura 75, Figura 76 e Figura 77 respectivamente, nota-se que, apesar da proximidade entre elas, há uma diferença no alcance e na porcentagem de passagem no domínio. Essa diferença é mais notável no CNS, pois as águas tendem a permanecer mais tempo no domínio, o que nos permite observar que a intensidade da despesca na Fazenda C é maior que as demais, devido ao maior volume de água nos viveiros.

Os efluentes dessas três fazendas residem principalmente ao longo do rio da Ribeira em ambos os cenários.

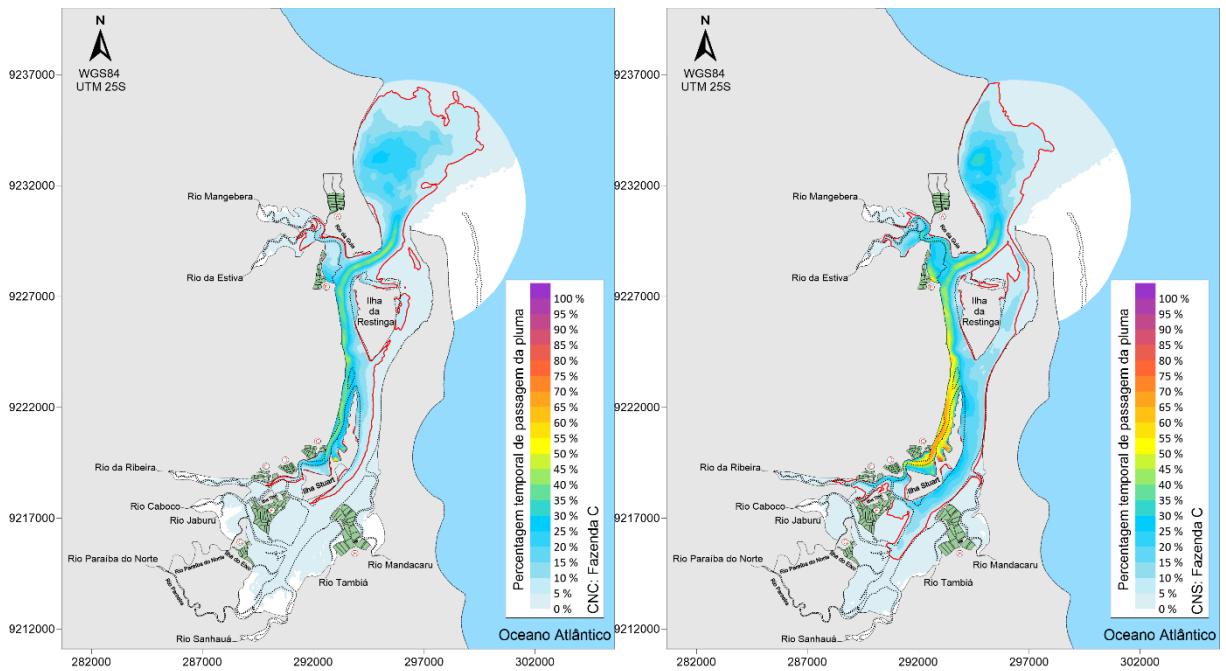


Figura 75. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda C durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

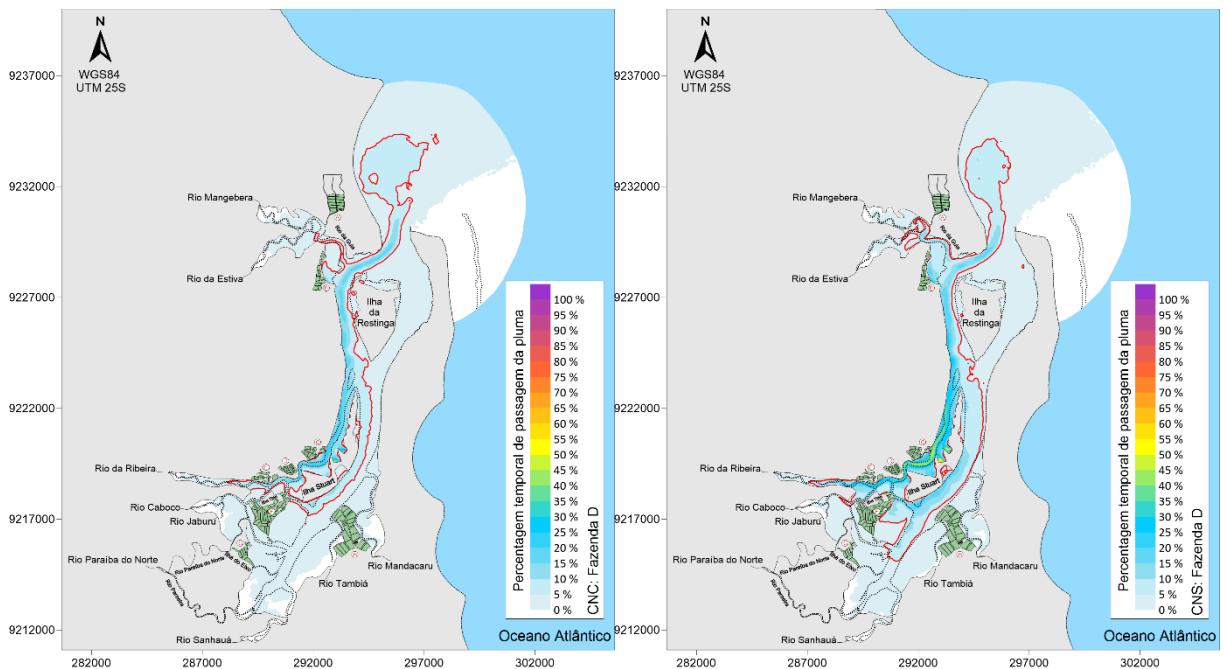


Figura 76. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda D durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

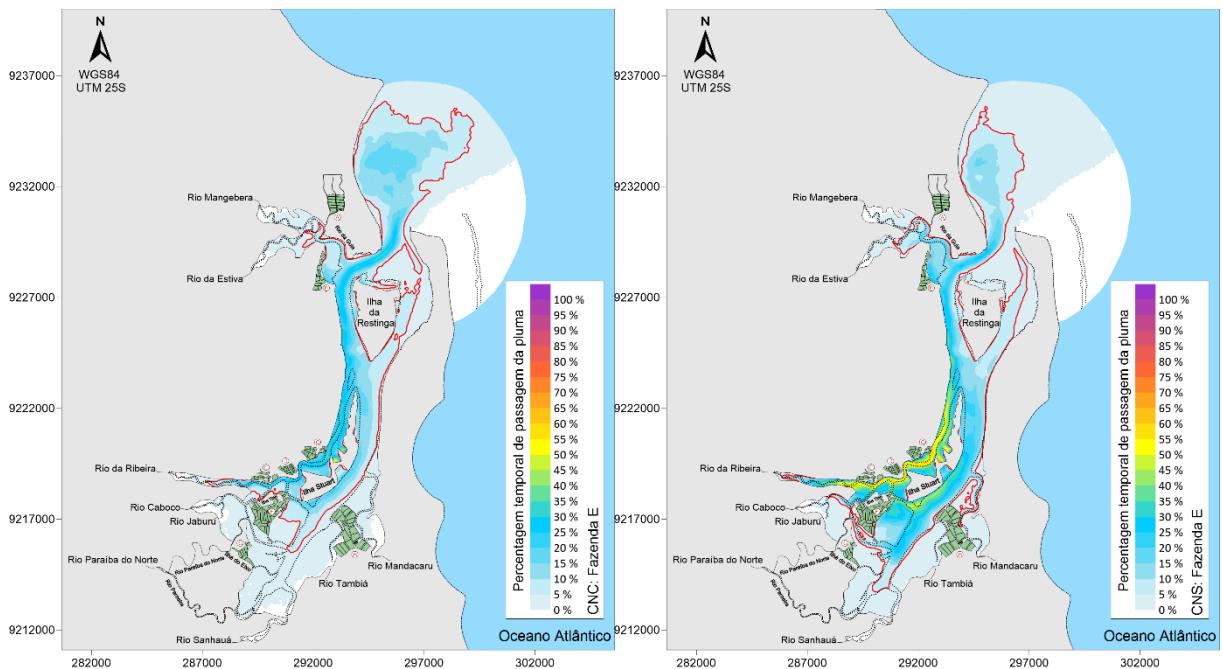


Figura 77. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda E durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

A pluma oriundas das Fazendas F e G, localizadas ao sul do estuário e expostas na Figura 78 e Figura 79, tendem a percorrer o rio Paraíba na maior parte do tempo, principalmente a mancha decorrente da Fazenda G.

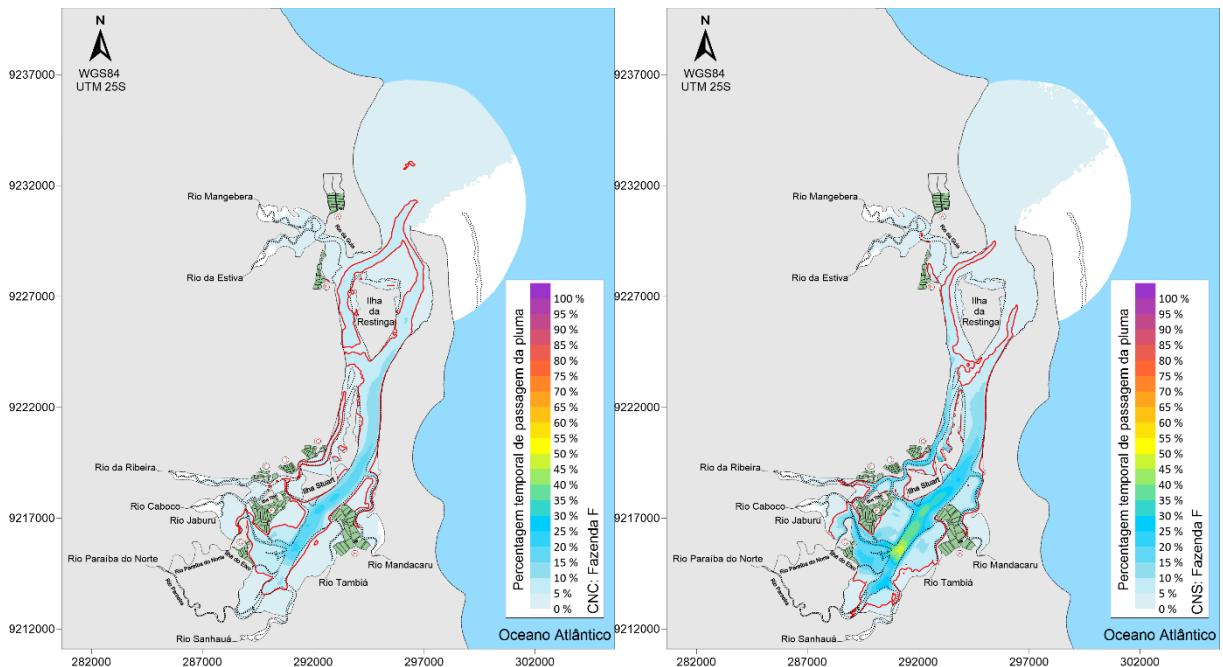


Figura 78. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda F durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

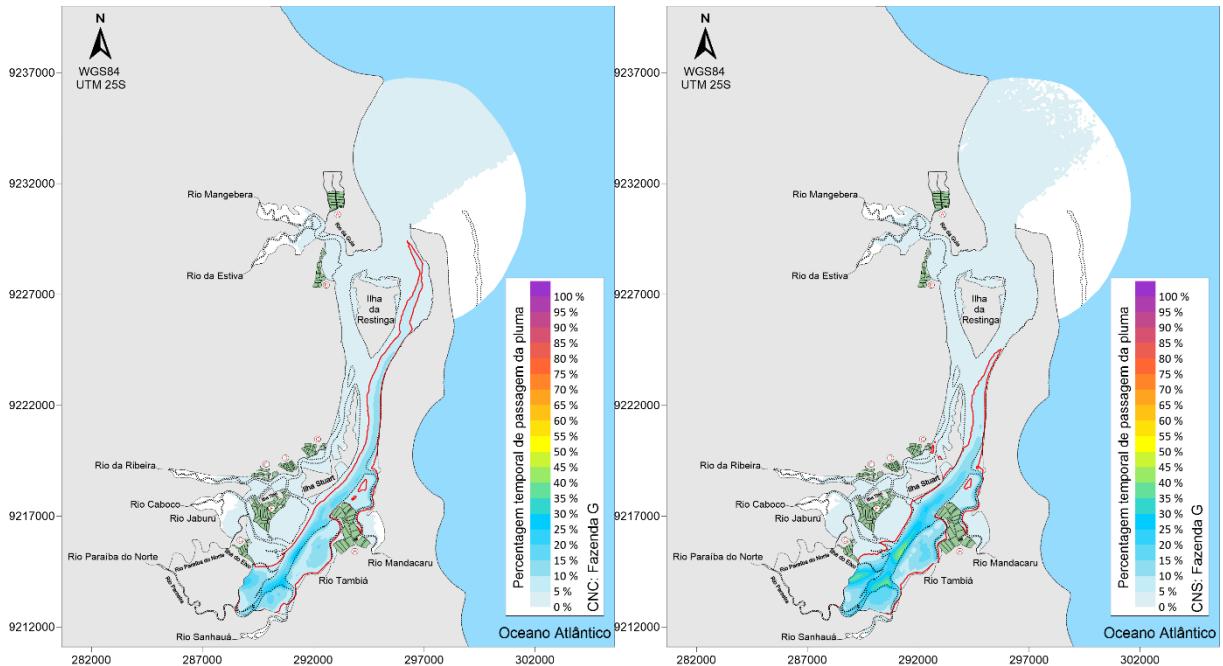


Figura 79. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda G durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

A despessa da Fazenda H (Figura 80) ocorre por quatro fontes distintas, duas localizadas no rio Tambiá, e duas no rio Mandacaru. É notável a tendência da pluma em permanecer neste último e em suas margens, que são compostas por vegetação de manguezais que ora alagam, e ora secam, recebendo a contribuição direta dessa despessa em torno de 50% do tempo no CNS e 30% no CNC.

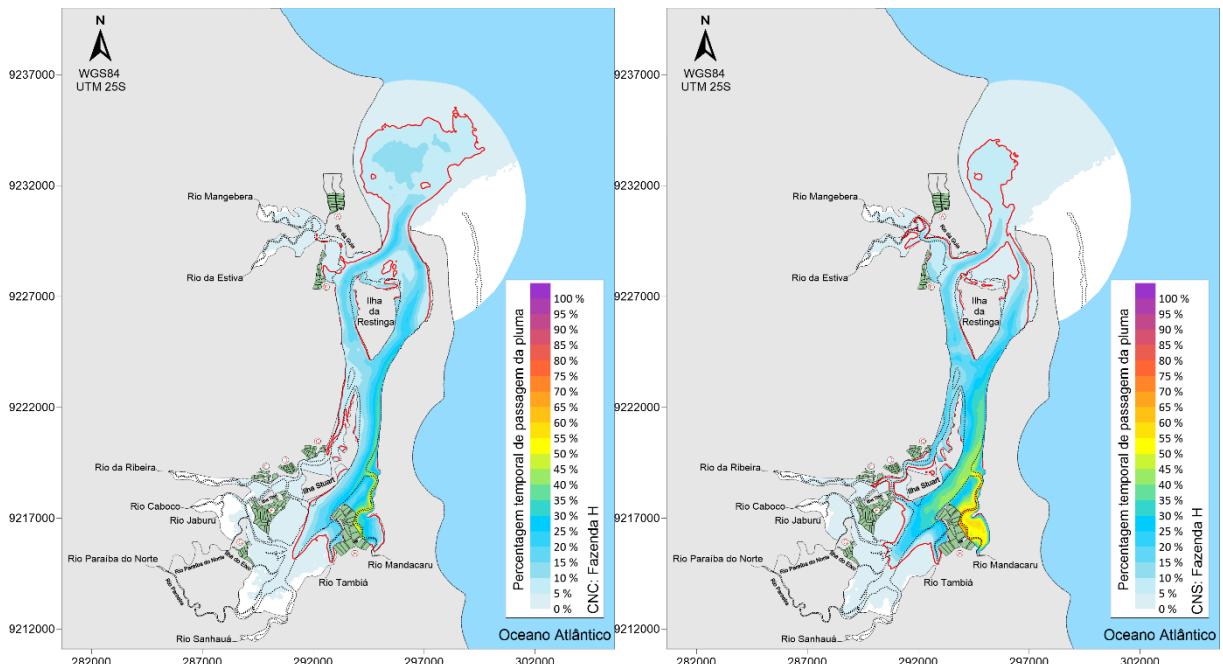


Figura 80. Comparação da persistência de passagem da pluma da Fazenda H durante os 92 dias de simulação do CNC e CNS respectivamente.

4.3.4 ANÁLISE DA INTRUSÃO SALINA

As variações de isolinhas de salinidade foram geradas para os instantes de maior e menor salinidade para ambos os Cenários de Cheia e Seca. A Figura 81 e a Figura 82 exibem a comparação dos resultados obtidos com o Mqa. A linha vermelha representa o limite entre águas consideradas salinas e salobras de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.

As mínimas intrusões salinas observadas em ambos os cenários ocorreram durante instantes de maré vazante, isso ocorre devido ao maior aporte de água doce oriunda da bacia hidrográfica. Em contrapartida, as máximas salinidades foram identificadas durante instantes de enchente, momentos estes em que a onda de maré possui mais força para entrar no estuário. Isso ocorre devido ao gradiente de pressão ocasionado pelas diferenças de níveis entre a região oceânica e o estuário. Assim, a variação dos níveis de salinidade no ERPN é condicionada pelos instantes de maré.

Ao comparar as diferenças quanto a sazonalidade, observa-se que em ambos os casos (máximas e mínimas), a intrusão salina será maior durante o CNS. Isso ocorre devido às descargas fluviais serem mais preponderantes durante o período de cheia e serem menos influentes durante a seca.

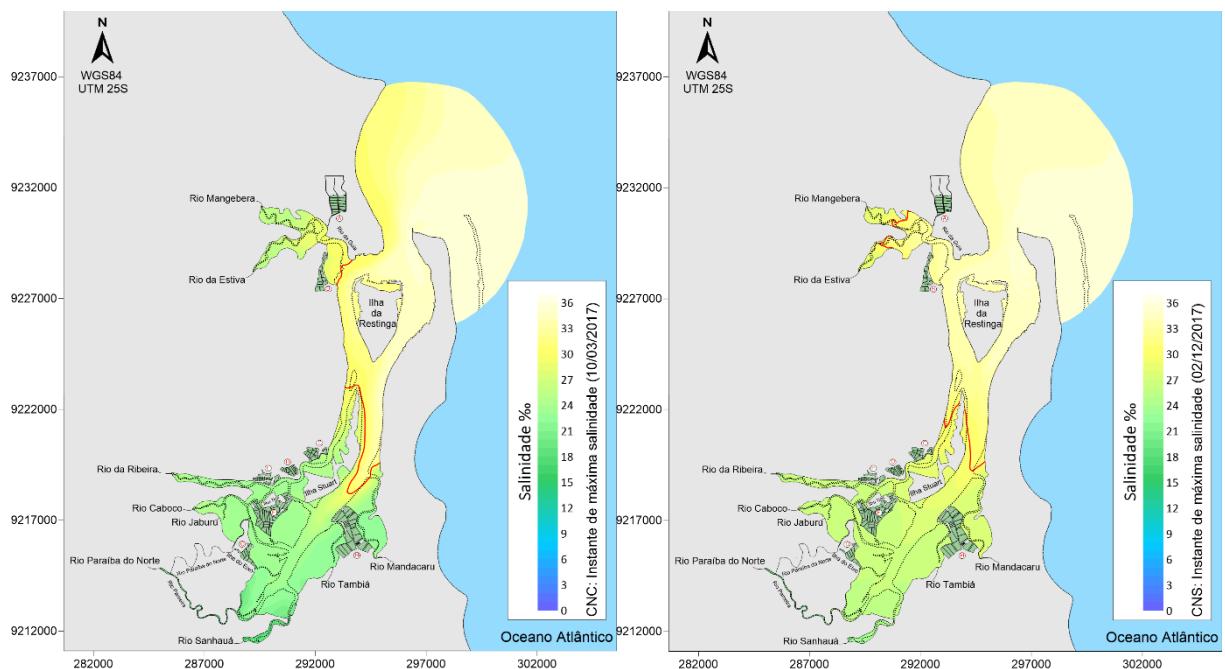


Figura 81. Comparação entre os momentos de máxima salinidade observados no Cenário de Cheia (à esquerda) e no Cenário de Seca (à direita). A linha vermelha representa o limite entre águas salinas e salobras.

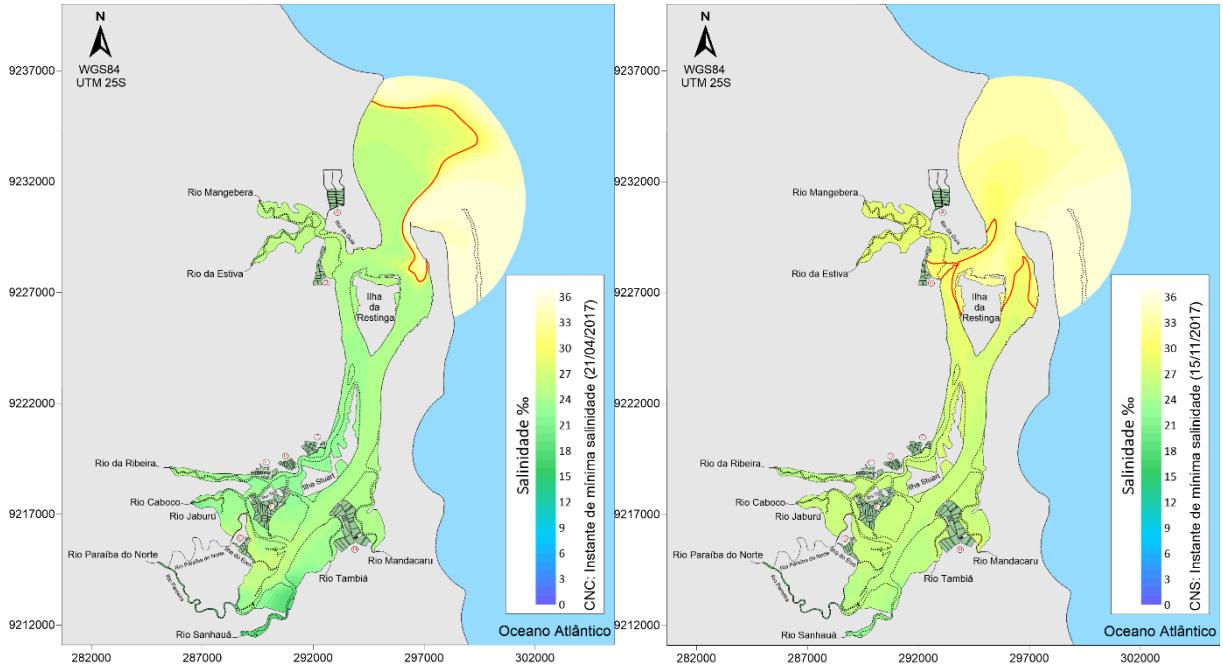


Figura 82. Comparação entre os momentos de mínima salinidade observados no Cenário de Cheia (à esquerda) e no Cenário de Seca (à direita). A linha vermelha representa o limite entre águas salinas e salobras.

4.3.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE OD E DBO

O comportamento de um estuário quanto à presença de cargas de efluentes varia conforme o padrão hidrodinâmico local. As correntes transportam os constituintes e os diluem ao longo do tempo. Assim, locais com menor circulação tendem a possuir concentrações de determinados parâmetros maiores, acarretando no maior consumo de oxigênio dissolvido nessas regiões.

A fim de identificar quais áreas são mais suscetíveis aos impactos oriundos da carcinicultura em conjunto com as descargas líquidas dos rios afluentes, os resultados foram comparados entre si e expostos em isolinhas com variação de probabilidade de ocorrência abaixo ou acima de um determinado valor. Para o oxigênio dissolvido, esse valor limite foi baseado no padrão de qualidade impostos pela CONAMA nº 357/2005, que delimita o valor mínimo de 5 mg/l de OD para rios de água salobra classe 1. Como a resolução não determina valores de DBO para a mesma classe de rios, foi adotado o valor máximo de 10 mg/l.

Os mapas dos resultados de OD nos seis cenários estão expostos da Figura 83 a Figura 85. Nota-se que em todos os cenários, independente da presença da atividade de carcinicultura, a porção sul estuarina é a que obteve maior probabilidade de ocorrer OD inferior ao limite estabelecido. Como dito anteriormente, isso ocorre por essas áreas estarem propensas a ter suas águas estagnadas, ou seja, com menor circulação. Ressalta-se também que na região costeira, mais

precisamente na praia de Costinha, há uma insistência da corrente em permanecer próxima à praia, principalmente durante o CNC.

A variação quanto à presença do efluente da despesca e as suas diferentes concentrações é pequena. No entanto é possível observar que durante os períodos de cheia, i.e., quando as vazões afluentes são maiores, há uma redução da concentração de OD na água. Isso se explica pelo fato dos afluentes possuírem uma carga de OD abaixo do valor recomendado. Por isso, ao comparar o efeito da variação da sazonalidade com as atividades presentes nas margens do estuário, percebe-se que o primeiro irá interferir mais na qualidade da água, como consequência da poluição oriunda da bacia hidrográfica.

As praias do município de Lucena, localizadas na margem oeste da desembocadura, como a praia de Costinha, Fagundes e Gameleira apresentara em todos os cenários probabilidade máxima de ocorrência de OD abaixo de 5 mg/l. Correlacionando essa constatação com os resultados da modelagem hidrodinâmica em 4.2, observa-se que as correntes costeiras nessa região possuem baixas velocidades na maior parte do tempo. Ao comparar os resultados com as análises de trajetória das plumas da despesca expostas em 4.3.3, percebe-se que a persistência da água nessa região independe da atividade de carcinicultura.

Conforme os boletins de monitoramento de qualidade da água das praias do Estado disponíveis no site da SUDEMA, as praias citadas acima, localizadas na margem esquerda da embocadura encontram-se na maioria do tempo impróprias para banho, o que condiz com o observado na modelagem.

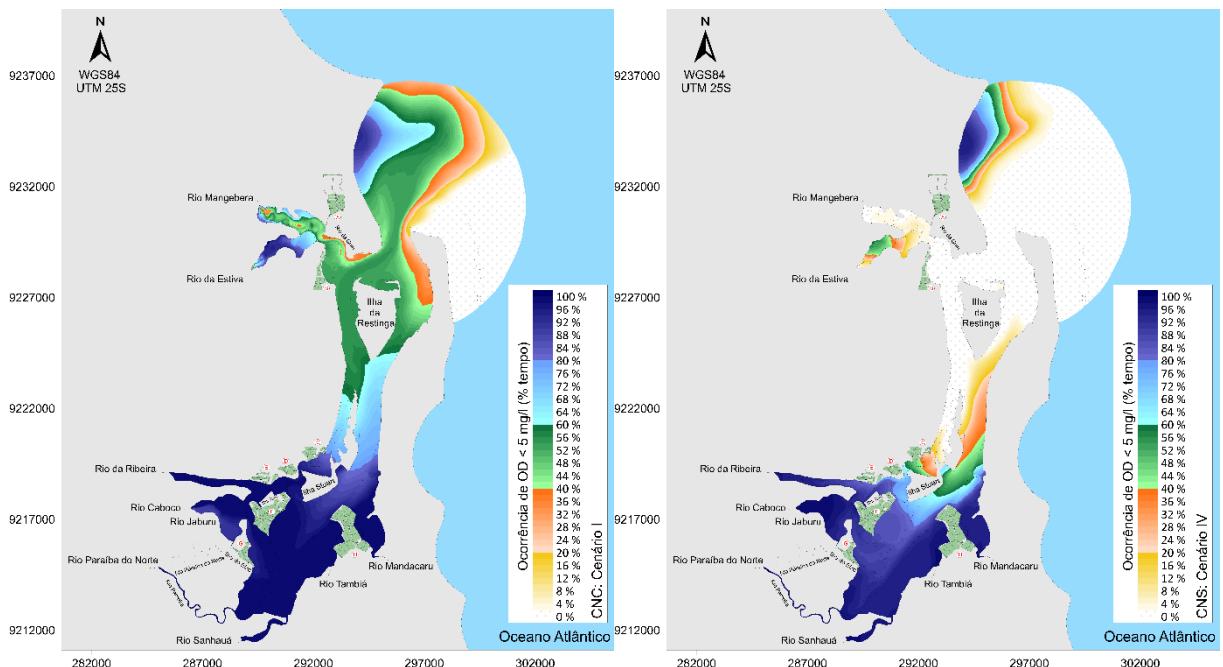


Figura 83. Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários I e IV. Ambos representam a simulação sem o descarte do efluente da despesca.

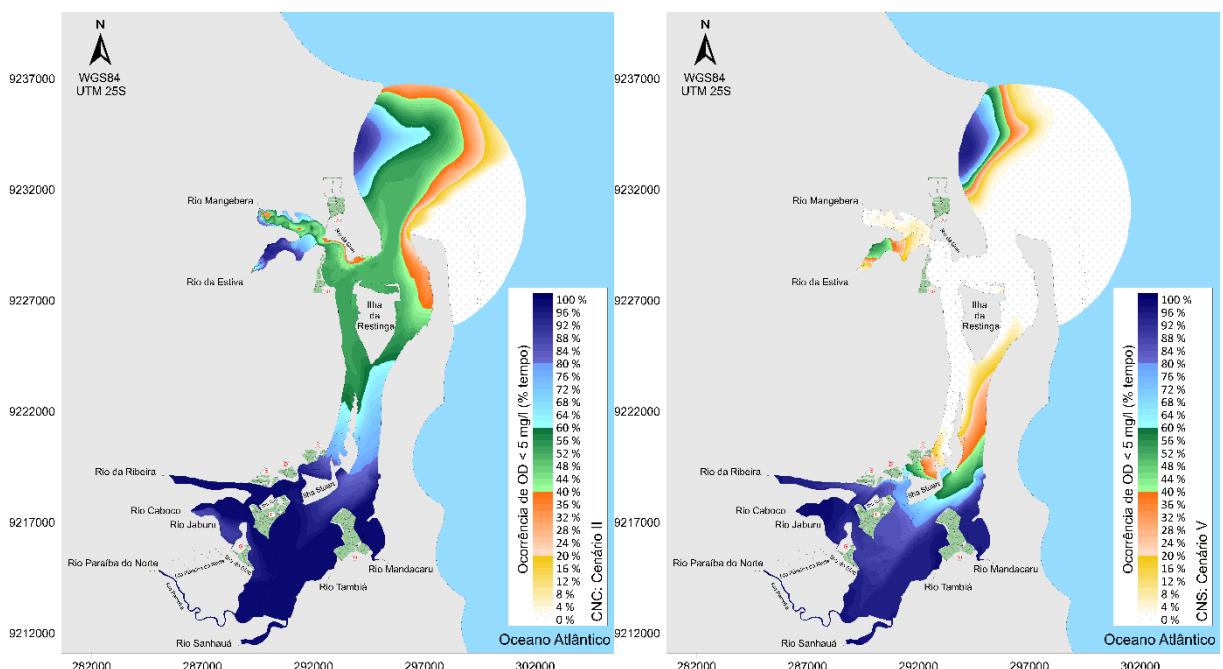


Figura 84. Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários II e V. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de OD em 5mg/l.

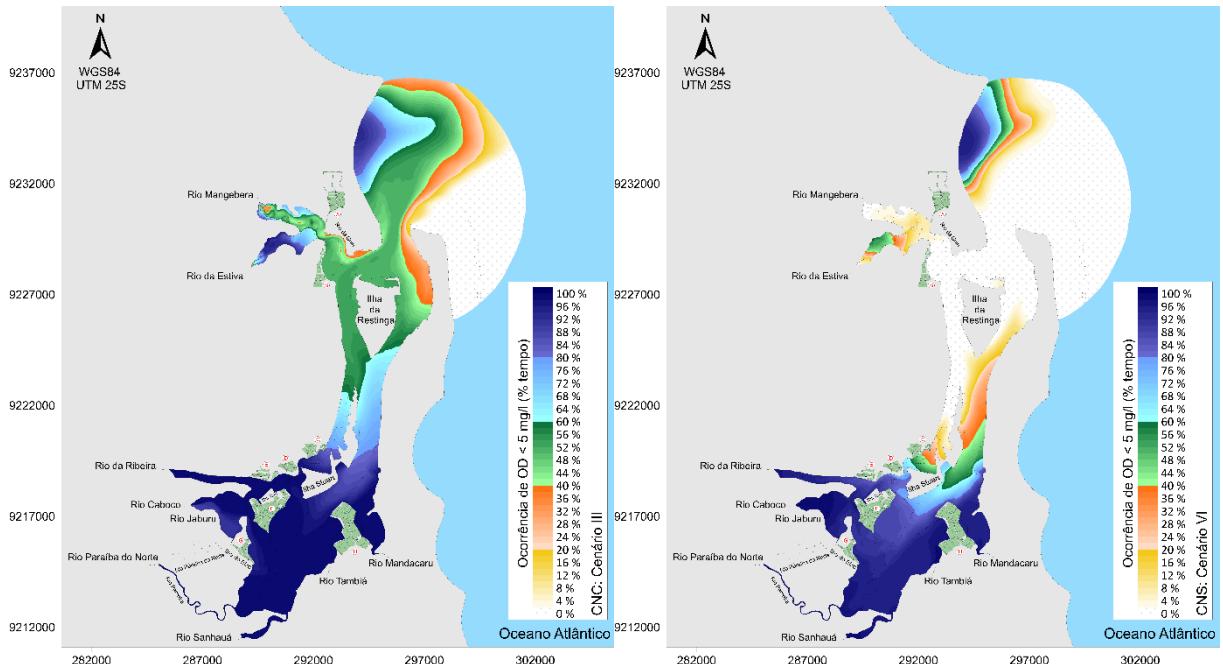


Figura 85. Comparação entre os percentuais de ocorrência de OD menor que 5 mg/l nos Cenários III e VI. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de OD de 3mg/l.

Os resultados encontrados referentes a DBO nos seis cenários estão apresentados da Figura 86 a Figura 88. Assim como para o OD, as variações significativas de DBO ocorrem com os períodos sazonais distintos.

No entanto, durante o CNC, a região do rio Tambiá apresenta em 100% do tempo DBO acima do limite fornecido. É descartada a hipótese da influência da despesca nessas altas taxas de DBO, pois o Cenário IV – onde a simulação não inclui a despesca, apresentou as mesmas condições de DBO. Assim, essa situação é explicada devido às condições iniciais impostas ao modelo, onde os dados monitorados e inseridos na região do rio Tambiá apresentavam valores superiores ao limite de análise dos resultados. Isto é, a qualidade da água do rio Tambiá já se encontrava degradada, e como a região tende a possuir águas mais velhas devido à baixa circulação local (ver 4.3.2), há uma maior demanda bioquímica de oxigênio. Conforme comentado em 2.3, o rio Tambiá recebe a contribuição da ETEPB, o que explica os valores mais altos monitorados pela SUDEMA.

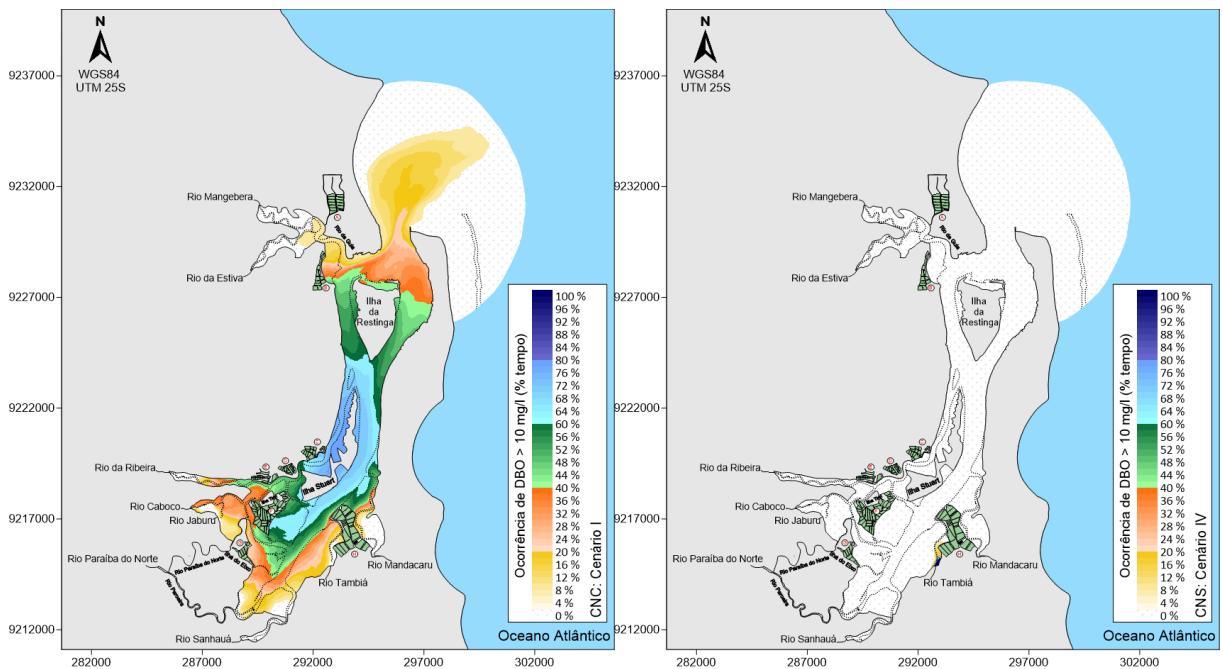


Figura 86. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários I e IV. Ambos representam a simulação sem o descarte do efluente da despesca

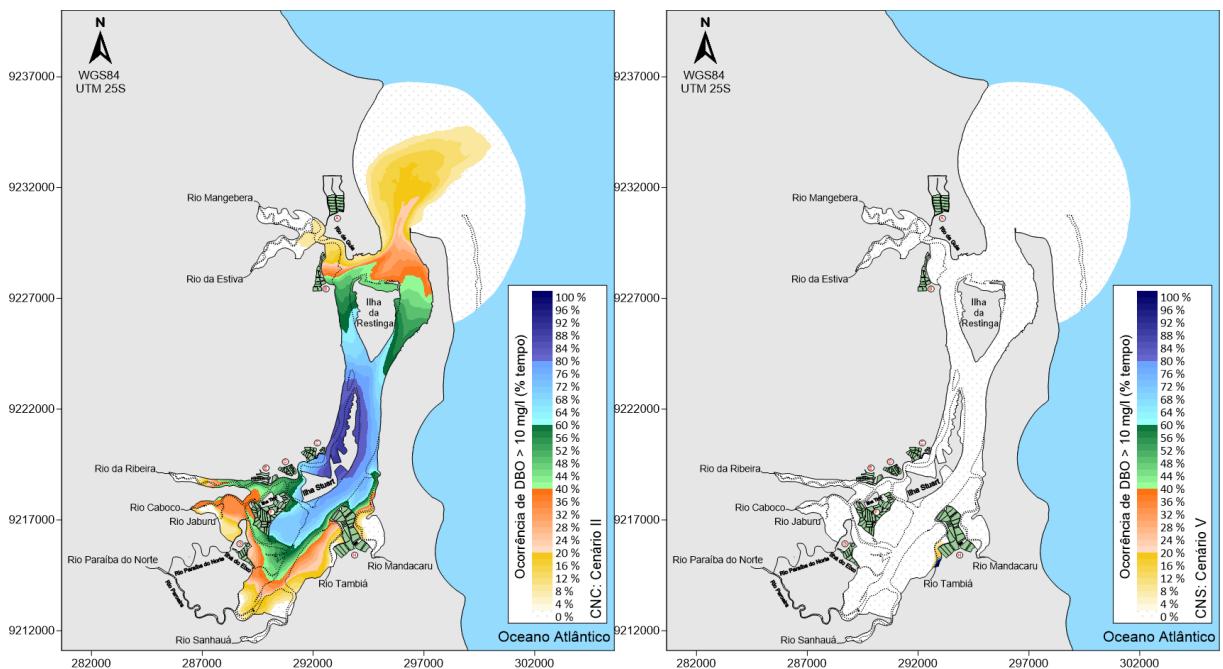


Figura 87. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários II e V. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de DBO em 30 mg/l.

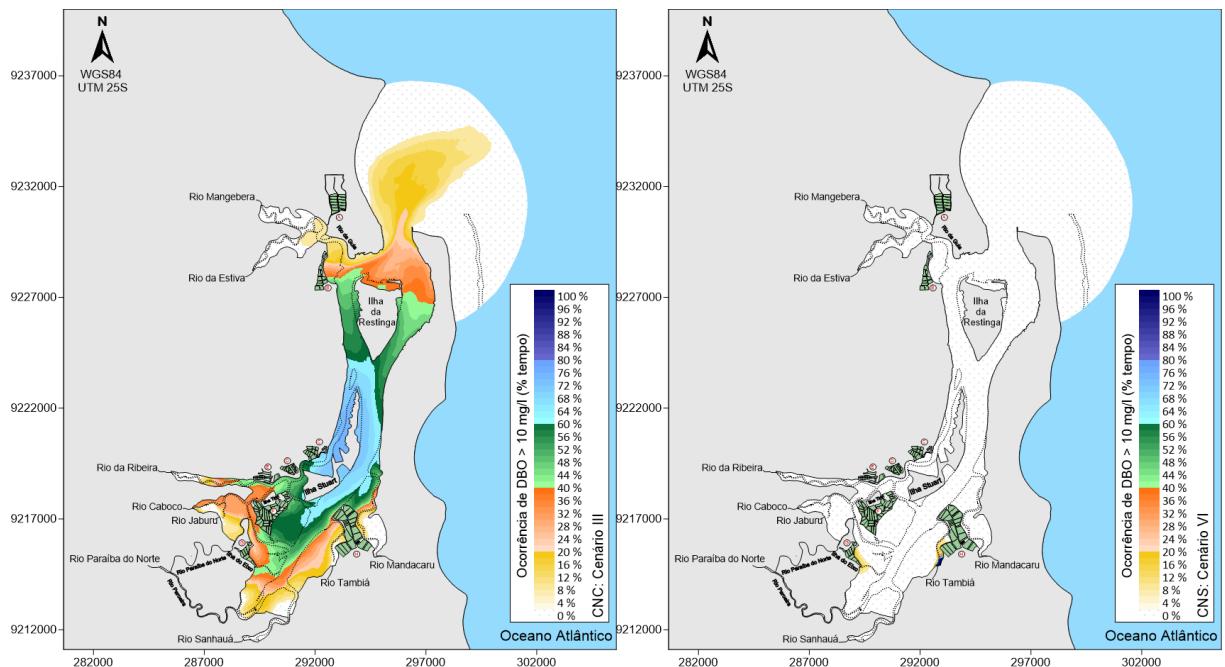


Figura 88. Comparação entre os percentuais de ocorrência de DBO maior que 10 mg/l nos Cenários III e VI. Ambos representam a influência da despesca com concentrações de DBO em 200 mg/l.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estudos envolvendo a hidrodinâmica e a qualidade da água do ERPN são extremamente escassos. No entanto, conhecer e compreender os processos que atuam no estuário é uma ferramenta essencial para a gestão hídrica de uma região. A possibilidade que os modelos computacionais fornecem em considerar diversos fenômenos atuando em conjunto enriquece ainda mais o entendimento da dinâmica de um corpo d'água. Assim, com o auxílio da modelagem, foi possível compreender como as características do estuário interagem entre si e influenciam na qualidade da água do ERPN.

De forma geral, a maré é a principal força responsável pela circulação hidrodinâmica no ERPN. Ao se propagar no estuário a onda de maré sofre distorções verticais e horizontais devido à alguns fatores característicos da região, como o afunilamento das margens do estuário, que tendem a amplificar o nível da água estuário adentro, e à presença dos manguezais, que são responsáveis por armazenar água e causar assimetria na velocidade de propagação da onda, aumentando assim a intensidade dos momentos de vazante do estuário.

As planícies de maré que margeiam o estuário só sofrem alagamento durante as preamarés de sizígia. Neste momento o nível d'água é suficientemente alto para ultrapassar a média das preamarés de quadratura, limite definido nas bordas dos mangues. A dinâmica de alagamento e secamento destes ambientes não sofreu mudanças nas simulações para cenários diferentes.

Os empreendimentos de carcinicultura localizados no ERPN são responsáveis por ocupar grande parte das suas margens e pelo maior uso de suas águas. Além disso, a captura dos camarões é feita por meio da drenagem dos viveiros, resultando no despejo de efluentes no estuário. Esses efluentes, ricos em nutrientes e matéria orgânica, causam a redução do oxigênio dissolvido presente no corpo d'água, devido aos processos de decomposição.

Assim, um dos objetivos do trabalho foi compreender como o estuário reage diante da presença dos processos de despesca. A princípio, foi estudada a dispersão das plumas diante de cenários sob variações sazonais. De um modo geral, as plumas tendem a permanecer no canal principal do estuário, percorrendo por pouco tempo as áreas de manguezais, por estes não sofrerem alagamento na maioria do tempo. Como há um agrupamento maior de empreendimentos na margem oeste, a passagem das plumas nessa região do rio da Ribeira é mais elevada que as demais. Na margem oposta, foi identificado que os efluentes oriundos da Fazenda H estão propensos a transitarem por mais tempo pela região do rio Mandacaru e em seus manguezais,

principalmente em cenários de pouca vazão fluvial, devido a lenta circulação hidrodinâmica da região.

Vale destacar a sensibilidade dos camarões quanto às condições da água em que vivem. Sabe-se que a área de influência da pluma abrange os locais onde há o bombeamento de água para os viveiros, o que aumenta os riscos de desequilibrar o meio de criação. Assim, o uso da modelagem permite indicar os melhores momentos de captação da água do ERPN para os empreendimentos, sem que haja contaminação dos viveiros.

Na região costeira, há uma tendência das plumas em ficarem circulando próximas às praias do município de Lucena. Isso ocorre devido à insistência dos ventos alísios que atuam aprisionando a água nessa região, além das correntes no local possuírem menores intensidades. Como grande parte da região costeira é composta por fundos rochosos, durante as marés de quadratura, os recifes de corais encontram-se emersos, fazendo com que as ondas tenham sua energia dissipada antes de chegar na costa, gerando poucas correntes longitudinais à praia.

Sabendo que a qualidade da água está ligada diretamente com os processos de mistura que ocorrem no meio, foi proposto um estudo dos tempos característicos do ERPN. Diante dos resultados ficou evidenciado que as regiões mais propensas a terem águas mais calma e com menor turbulência são as regiões à sudeste do estuário, principalmente nos rios Mandacaru, Tambiá e Sanhauá. Nessas regiões as correntes tendem a ser mais fracas e a permanecerem circulando por mais tempo pelo local, o que resultou em menores taxas de renovação nesses rios e em suas adjacências. É importante destacar que a alta taxa de renovação não é um indicador de boa qualidade, porém caracteriza regiões com alta capacidade de mistura e deslocamento das águas.

Assim, com o conhecimento da dinâmica das plumas e das principais características hidrodinâmicas do ERPN, foram considerados constituintes não conservativos agindo no meio. O objetivo foi determinar qual o peso das descargas fluviais e da despesca no consumo de oxigênio da água. Sabe-se que locais com taxas de renovação baixas, i.e., pouca circulação, são mais suscetíveis à poluição quando a água responsável pela mistura se encontra poluída, sendo consequentemente a importância das reações cinéticas que ocorrem no corpo d'água maior. Como essas condições variam no tempo e no espaço, as simulações buscaram abranger as mais variadas situações, como: comportamento do estuário com e sem a presença dos efluentes da carcinicultura, simulações pessimistas e otimistas quanto às concentrações dos efluentes, além disso, as simulações também variaram no tempo, considerando a mudança sazonal.

Em uma escala temporal, as piores condições de OD e DBO foram observadas durante as simulações do CNC. Nota-se que isso é um indicativo das condições de qualidade dos afluentes, visto que há uma maior contribuição destes durante a cheia. Além disso, não foram vistas grandes diferenças de concentrações ao serem comparados os cenários com e sem a ocorrência da despresa, o que destaca ainda mais o peso da qualidade dos rios afluentes, sendo este o maior determinante das concentrações de OD e DBO no ERPN.

O estudo espacial mostrou que na porção sul e sudeste estuarina é onde está localizada a maior chance de se ter concentrações reduzidas de OD e elevadas de DBO, assim como nas praias do município de Lucena, localizada na margem esquerda da embocadura. Esses resultados de OD e DBO foram observados também na bibliografia consultada e citada em 2.3. Quanto à região costeira, segundo os Boletins de Qualidade da Água emitidos pelo órgão ambiental do Estado, as praias deste município tendem a estarem sempre impróprias para banho.

Assim, os resultados obtidos conseguem mostrar como os processos que ocorrem no ERPN estão interligados e podem ser explicados e contornados com estudos de modelagem ambiental hidrodinâmica. A modelagem é uma ferramenta de gestão ambiental que possibilita dar suporte a diversas tomadas de decisões, no ERPN é possível melhorar o planejamento de campanhas de monitoramento, sejam elas de parâmetros de qualidade da água ou hidrodinâmicos, como medições de níveis e correntes. Além de ser um indicativo de regiões mais críticas, que demandam maior atenção e trabalho, também indica os agentes responsáveis pelas condições dos cenários observados. A modelagem também fornece suporte ao manejo da carcinicultura, seja através da indicação dos locais ideais para sua instalação, como também quais as regiões e os períodos mais apropriados para realização do despejo dos efluentes, além dos melhores locais e momentos para realizar a captação de água necessária à atividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. **Computational Fluid Dynamics: An introduction for engineers**. Longan Group, UK Limited. 1989.
- ABCC. Associação Brasileira de Criadores de Camarão. **O Censo da carcinicultura nacional em 2011**. Revista ABCC. Brasil, 2013.
- _____. Associação Brasileira de Criadores de Camarão. **Produção Brasileira de Camarão Cultivado por Estado – Ano 2015**. Brasil, 2016.
- _____. Associação Brasileira de Criadores de Camarão. **Setor Carcinícola, Aquícola e Pesqueiro: Potencialidades, Desafios e Oportunidades para uma Efetiva Contribuição com o Fortalecimento da Sócia Economia Pesqueira do Brasil**. Revista ABCC. João Pessoa - Brasil, 2018.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas**. Brasil. 2017.
- ARAÚJO, D. S. de. **Metamorfozes da Paisagem dos Manguezais do Estuário do Rio Paraíba**. 2014. 63 f. Monografia - Curso de Bacharel em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- BARROS, S. R. R. C. de. **Estudo da participação de metais traço em uma linha d'água de um tanque de cultivo de camarão marinho no município de Santa Rita – PB**. 94 f. Dissertação – Mestrado em Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.
- BOYD, C. E. **Water quality management and aeration in shrimp farming**. Fisheries and Allied Aquacultures Department Series No. 2, Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Auburn, Alabama. 1989.
- BOYD, C. E., e TUCKER, C. S. **Pond Aquaculture Water Quality Management**. Springer Science + Business Media. New York, USA. 1998.
- BRAGA, B. *et al.* **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.
- BRASIL. Governo do Estado da Paraíba. **Lei nº 11.180, de 16 de julho de 2018**. Paraíba, 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CIRM nº 01, de 21 de novembro de 1990.** Brasília, 1990.

_____. Presidência da República. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Brasília, 2012.

_____. Presidência da República. **Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988.** Brasília, 1988.

_____. Presidência da República. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997.** Brasília. 1997.

CAMERON, W. N., PRITCHARD, D. W. **Estuaries.** In: Hill, M. N. **The Sea.** New York, John Wiley & Sons. p. 306-324. USA, 1963.

CAVALCANTI, L. B. **Variações das condições hidrológicas e da clorofila a associadas ao cultivo do camarão marinho *litopenaeus vannamei* (BOONE, 1931), na região estuarina do rio Paraíba do Norte (Paraíba - Brasil).** 151 f. Tese – Doutorado em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

CBH/PB. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. **Proposta de instituição do CBH-PB, conforme Resolução nº 1, de 31 de agosto de 2003, do CERH/PB.** 82p. Paraíba, 2004.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº357, de 17 de março de 2005.** Brasília, 2005.

_____. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº312, de 10 de outubro de 2002.** Brasília, 2002.

COSTA, M. D. **Qualidade da água do estuário do rio Sanhauá na Paraíba e conflitos de usos existentes na área de influência do antigo Lixão do Roger.** 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

CUNHA, M. C. S. **Contribuições da engenharia costeira para a carcinicultura.** Dissertação (Mestrado) em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J. *et al.* **The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.** Q.J.R. Meteorol. Soc., 137: p. 553–597. 2011.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Carta Náutica nº 806 – Porto de Cabedelo. Marinha do Brasil.** Brasil, 2016.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Carta Náutica nº 830 – Proximidades do Porto de Cabedelo. Marinha do Brasil.** Brasil, 2018.

DYER, K.R. **Estuaries: A physical introduction.** 2nd Ed. New York: John Wiley and Sons. 195 p. USA, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Agência de Informação Embrapa - Árvore do Conhecimento.** Disponível em: <www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 20 mar. 2011.

FEMAR. Fundação de Estudos do Mar. **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras.** Rio de Janeiro, 2000.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. *et al.* **Impactos ambientais do lançamento de efluentes da carcinicultura em águas interiores.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v.10, nº2, p.167-174. Brasil, 2005.

FRIEDRICH, C. T., AUBREY, D. G. **Non-linear Tidal Distortions in Shallow Well-Mixed Estuaries: A Synthesis.** *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 27: 521-545. 1988.

GAA. Global Aquaculture Alliance. **Aquaculture Facility Certification: Finfish and Crustacean Farms.** Best Aquaculture Practices. Certification Standards, Guidelines. Issue 2.4. USA, 2017

GUEDES, L. S. **Monitoramento geoambiental do rio Paraíba do Norte - PB, por meio de cartografia temática digital e de produtos de sensoriamento remoto.** 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

HOPKINS, J. S. *et al.* **The relationship between feeding rate, paddlewheel aeration rate and expected dawn dissolved oxygen in intensive shrimp ponds.** *Aquacultural Engineering,* 10(4), 281–290. South Carolina - USA, 1991.

HOPKINS, J. S., *et al.* **Effect of water exchange rate on production, water quality, effluent characteristics and nitrogen budgets of intensive shrimp ponds.** *Journal of the World Aquaculture Society.* 304 p - 320 p. 1993.

HUNT, J. N. **Tidal Oscillations in Estuaries.** *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1:271-283. 1964.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas Geográfico do Estado da Paraíba**. Secretaria da Educação - Governo do Estado da Paraíba. Grafset. 99p. João Pessoa, 1985.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Estação Meteorológica Automática de João Pessoa – PB**. Paraíba, 2018.

JERONIMO, C. E. e BALBINO, C. P. **Caracterização físico-química de efluentes da carcinicultura e seus impactos ao meio ambiente**. Rev. Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. V (8), nº 8, p. 1639-1650. Santa Maria, 2012.

LIMA, L. S. **Acoplamento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para prognóstico ambiental detalhado de longo prazo**. 144p. Tese (Doutorado) em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.

LÚCIO, M. M. L. M. **Avaliação preliminar do efeito da carcinicultura sobre o sedimento de um trecho do rio da Ribeira, Santa Rita – PB**. 65 f. Dissertação – Mestrado em Química, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2009.

MIRANDA, L. B. de, CASTRO, B. M. de, KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. 1 ed. Edusp. São Paulo, 2002.

MORAES, A. C. R. **Contribuições para a gestão da zona costeira no brasil: Elementos para uma Geografia do Litoral Brasileiro**. Annablume. 232 p. São Paulo, 2007.

MORAIS, L. M. F. A. **Expansão urbana e qualidade ambiental no litoral de João Pessoa - PB**. 156p. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Geografia – Universidade Federal da Paraíba, 2009.

MOTTA, V. F. **Processos sedimentológicos em estuários**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ – PENO. 9p. Rio de Janeiro, 1978.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and water assessment tool: theoretical documentation**. Texas Water Resources Institute Technical Report. USA, 2011.

NEPREMAR. Núcleo de Estudos e Pesquisas dos Recursos do Mar. **Estudos ecológicos no estuário do rio Paraíba do Norte – PB**. Universidade Federal da Paraíba. Relatório Técnico Final. 162p. João Pessoa, 1980.

NUNES, A. J. P. **Tratamento de efluentes e recirculação de água na engorda de camarão marinho**. Revista Panorama da Aquicultura, vol. 71. Brasil, 2002.

PERILLO, G. M. E. **Geomorphology and Sedimentology of Estuaries**. Amsterdam, Elsevier. 1995.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. John Wiley & Sons Ltd. Swindon, UK. 1987.

PINTO, A. C. B. **Um Modelo Numérico para análise da Estabilidade Hidráulico Sedimentológica de Canais de Maré**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA®, V. 9d**. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

ROSMAN, P. C. C. **Subsídios Para Modelagem de Sistemas Estuarinos**. In: Rosman, P.C.C., Almeida, A.B., Eiger, S., Eds., **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**, 3rd Edition, ABRH, Porto Alegre, 238-348. 1997.

ROVERSI, F. **Análise da influência da atividade de carcinicultura sobre aspectos hidromorfodinâmicos e de qualidade da água de corpos d'água costeiros: um estudo de caso no Sistema Lagunar de Guaraíras, RN**. Tese (Doutorado) em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018

SEMARH. Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Norte**. Unidade Estadual de Gerenciamento do Proágua. Volume I, 227 p. Paraíba, 2001.

SILVA, L. M. D. da, *et al.* **Modelagem de processos sedimentológicos no estuário do rio Paraíba do Norte, com foco nos acessos aquaviários do Porto de Cabedelo – PB**. In: XIII ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos e I PiA - Partículas nas Américas (Particles in the Americas). 8p. Anais... Vitória – Espírito Santo, 2018.

SOUZA, A. C. de *et al.* **Análise exploratória da qualidade da água do estuário do rio Paraíba, Cabedelo-PB, empregando análise de componente principal**. In: ENCONTRO INTERCONTINENTAL SOBRE A NATUREZA, 7. Fortaleza. IHAB, 2015.

SUDEMA. Superintendência de Administração do Meio Ambiente da Paraíba. **Programa de monitoramento de corpos d'água**. Coordenadoria de Medição Ambiental. Paraíba, 2018.

USGS. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. USA, 2018.

ZHANG, P. *et al.* The effects of body weight, temperature, salinity, pH, light intensity and feeding condition on lethal DO levels of whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931). *Aquaculture*, v. 256. Issues 1-4, 579–587p. 2006.

ANEXO I

MAPAS DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA PARA O CENÁRIO REPRESENTATIVO DE SECA – CNS

Devido à similaridade entre os resultados obtidos entre os Cenários Representativos de Cheia e de Seca, conforme explicado em 4.2, optou-se em pôr os mapas com os resultados dos padrões de circulação hidrodinâmica referentes ao CNS em anexo.

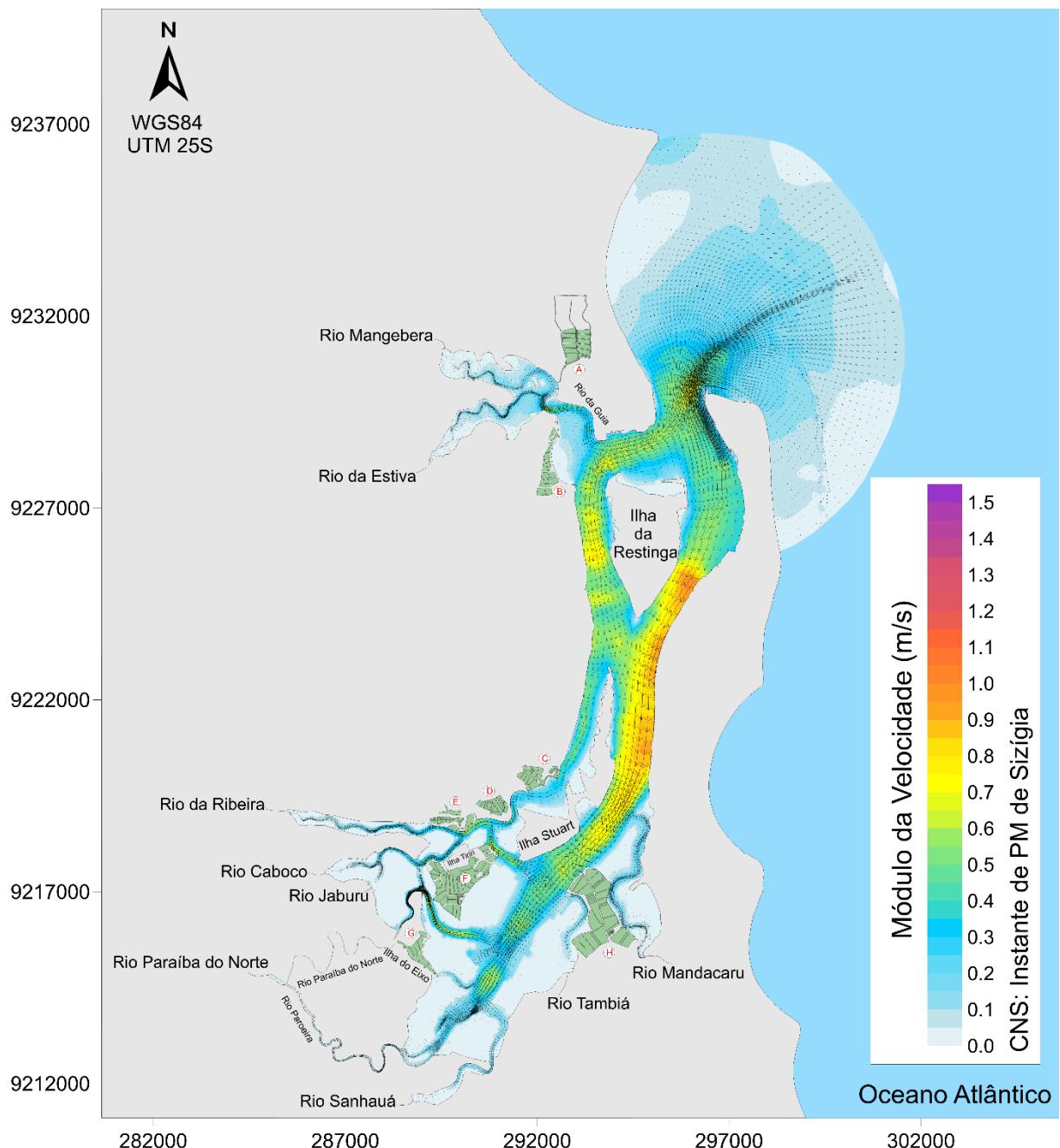


Figura A. 1. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em PM de sizígia do CNS.

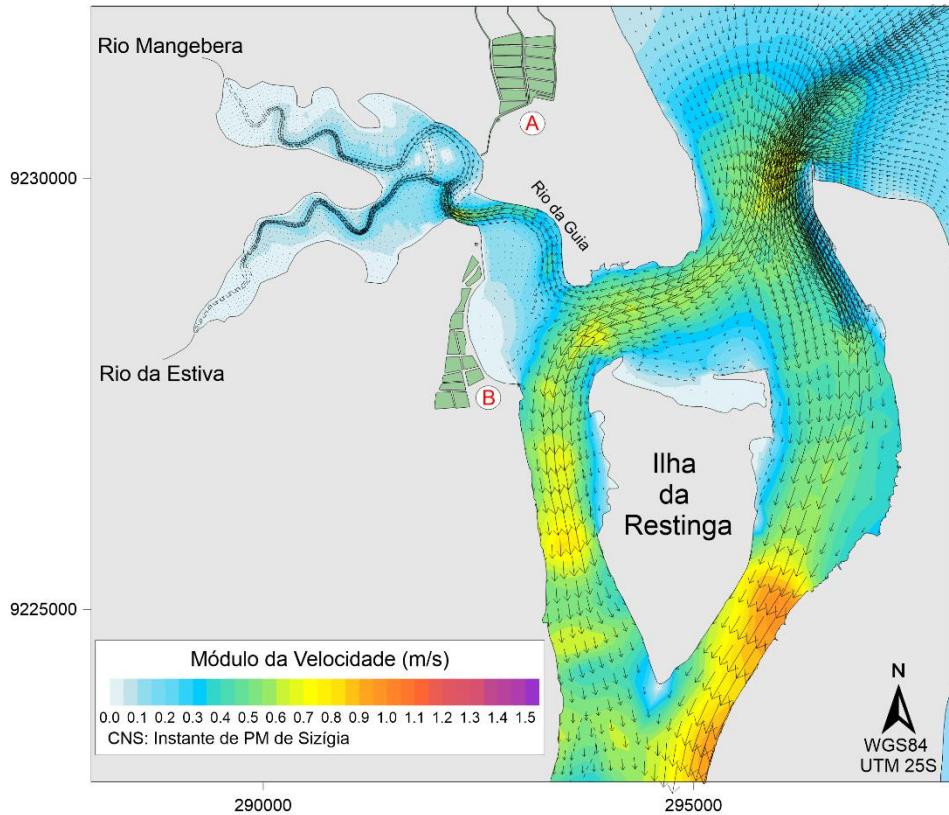


Figura A. 2. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se a presença de pequenas velocidades apenas em parte dos manguezais, devido a ocorrência conjunta de maiores elevações com o momento de enchente.

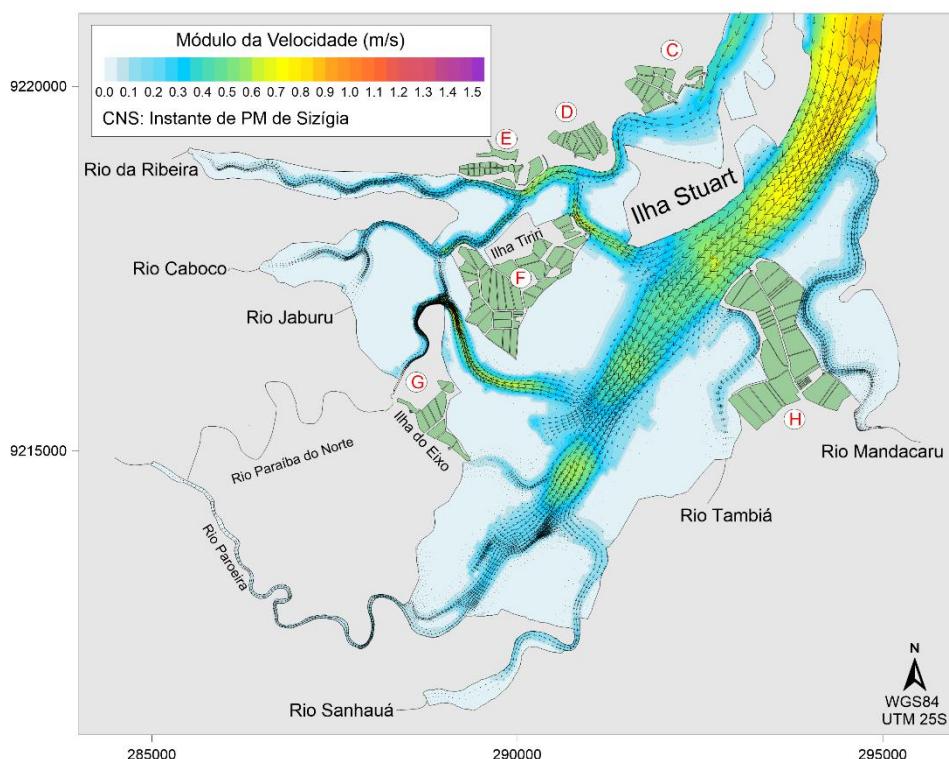


Figura A. 3. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de sizígia na região sul do ERPN. Nota-se que os manguezais apresentam velocidades baixas ou nulas, por estarem secos.

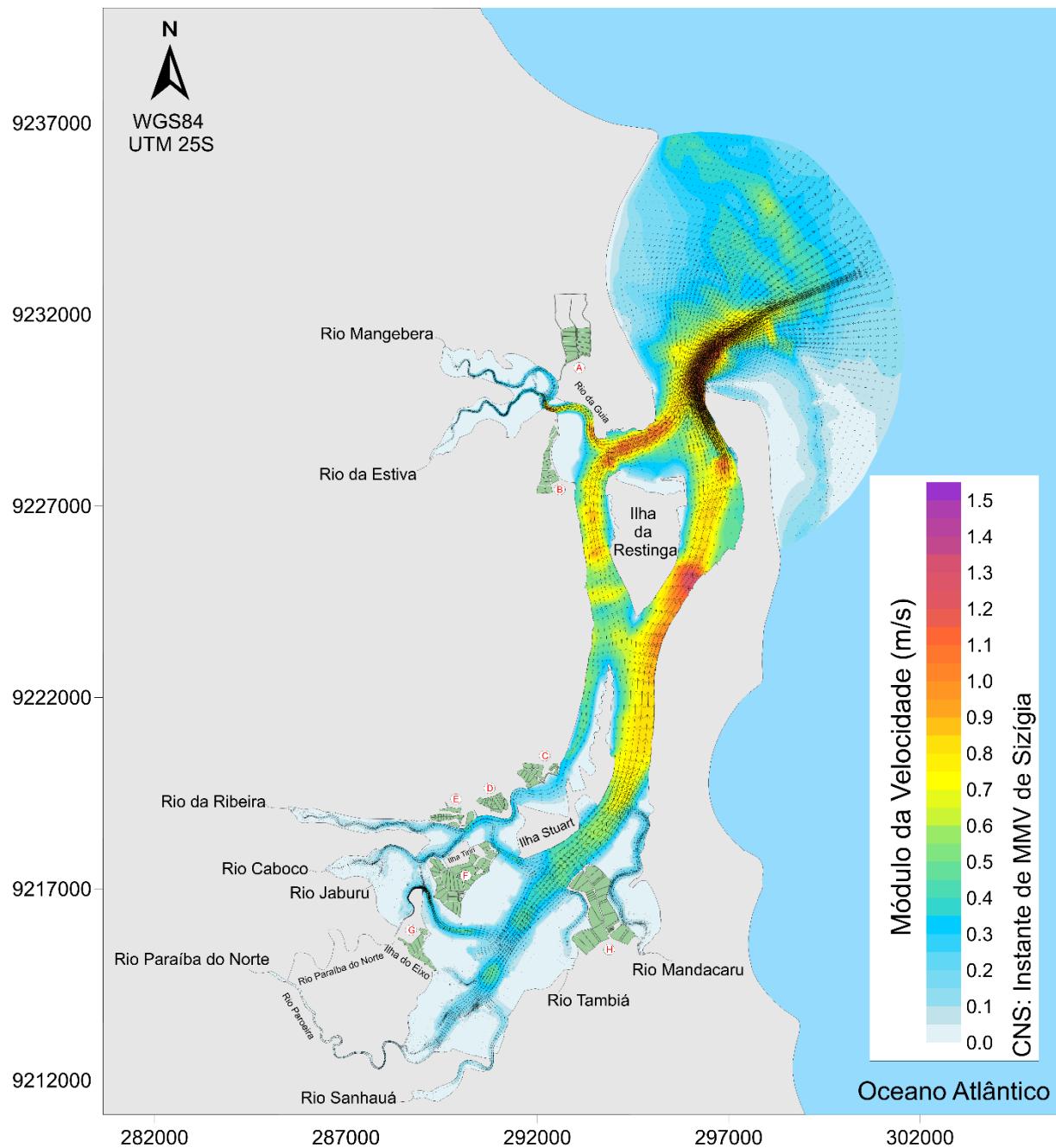


Figura A. 4. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MMV de sizígia do CNS. No instante de MMV, as regiões dos manguezais encontram-se secos, não havendo correntes no local. Nota-se que as praias adjacentes à embocadura possuem baixas velocidades, por estarem protegidas pela formação de corais.

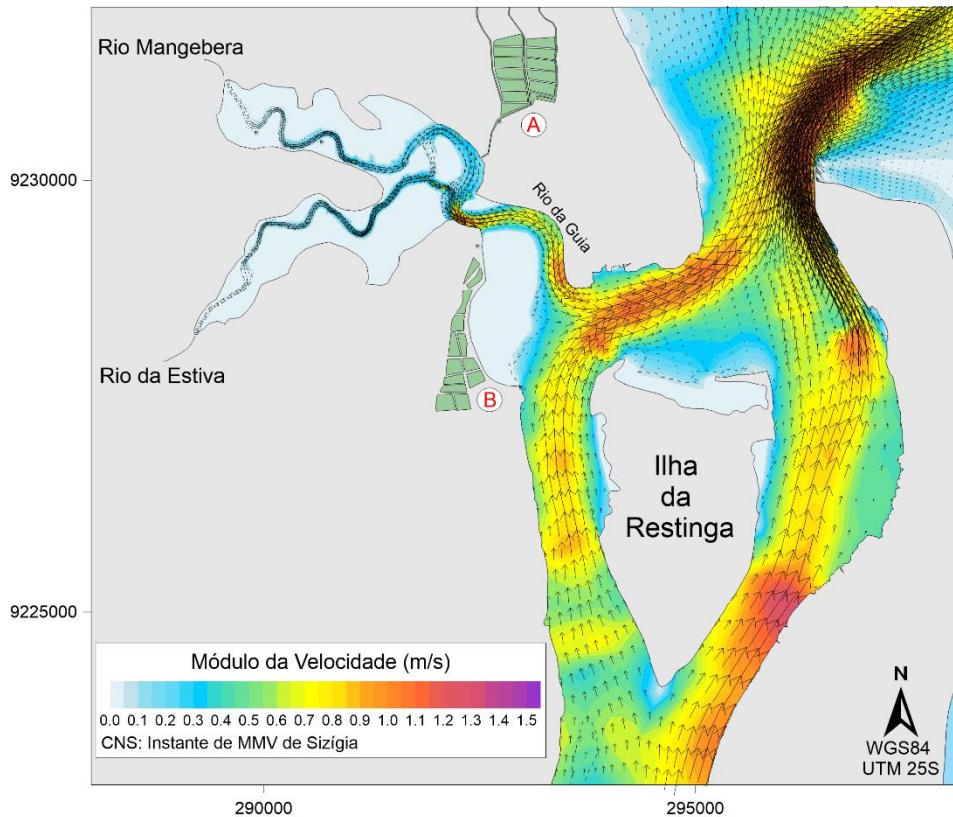


Figura A. 5. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de sizígia na região norte do EPN. Nota-se maior intensidade das correntes nos canais principais do estuário devido às características da onda de maré.

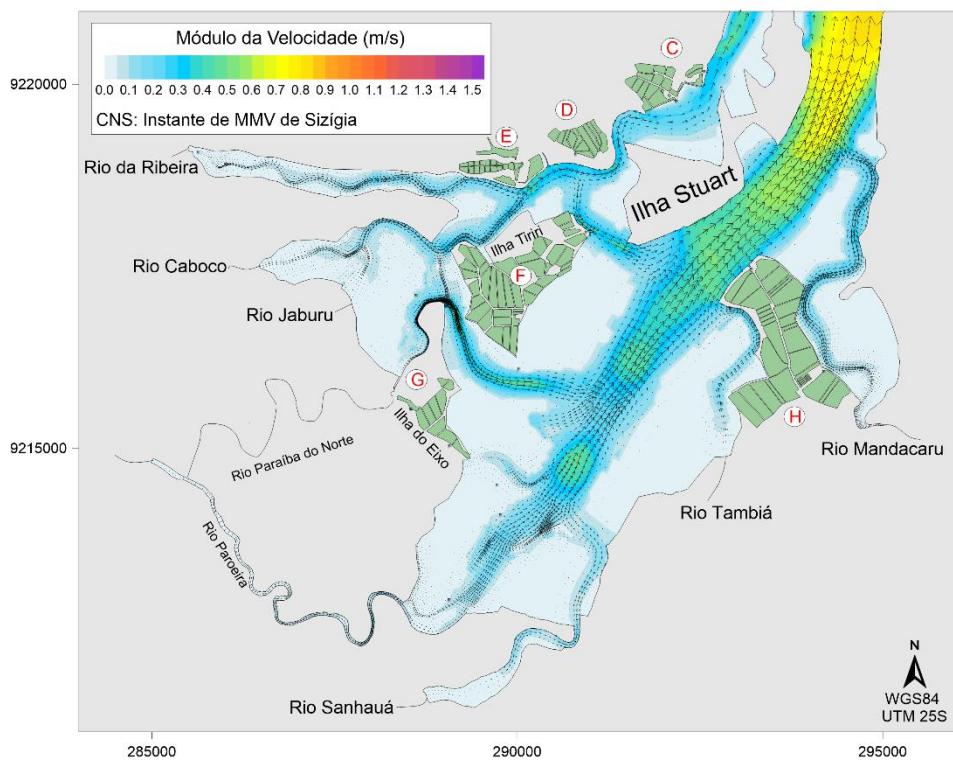


Figura A. 6. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de sizígia na região sul do EPN. As velocidades são nulas na maior parte dos manguezais, enquanto que os rios possuem velocidades mais altas.

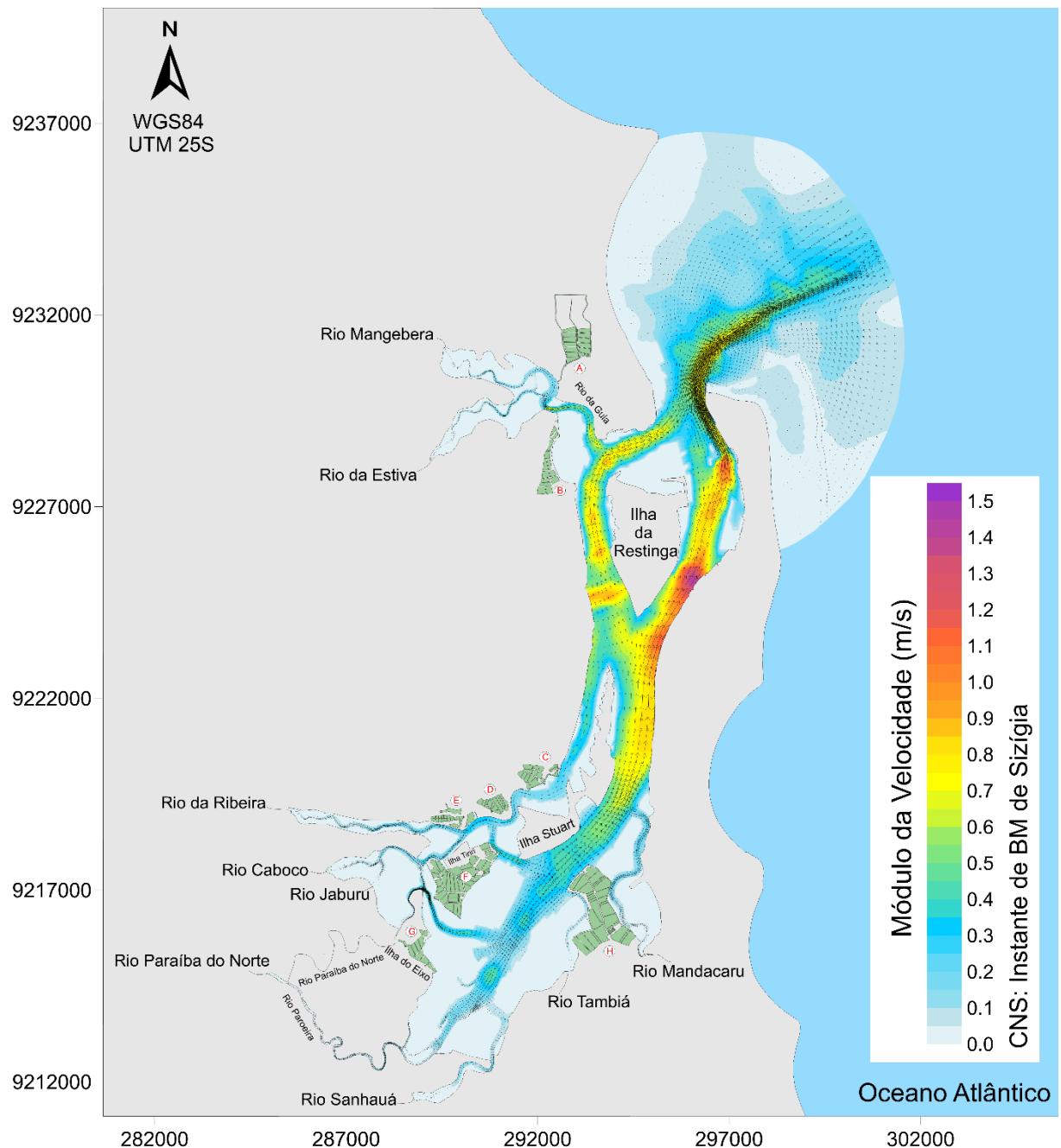


Figura A. 7. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de sizígia do CNS. Nota-se a fraca intensidade das correntes costeiras nas praias adjacentes à embocadura do estuário, agindo o PEMAV como proteção costeira, causando a quebra das ondas ao largo.

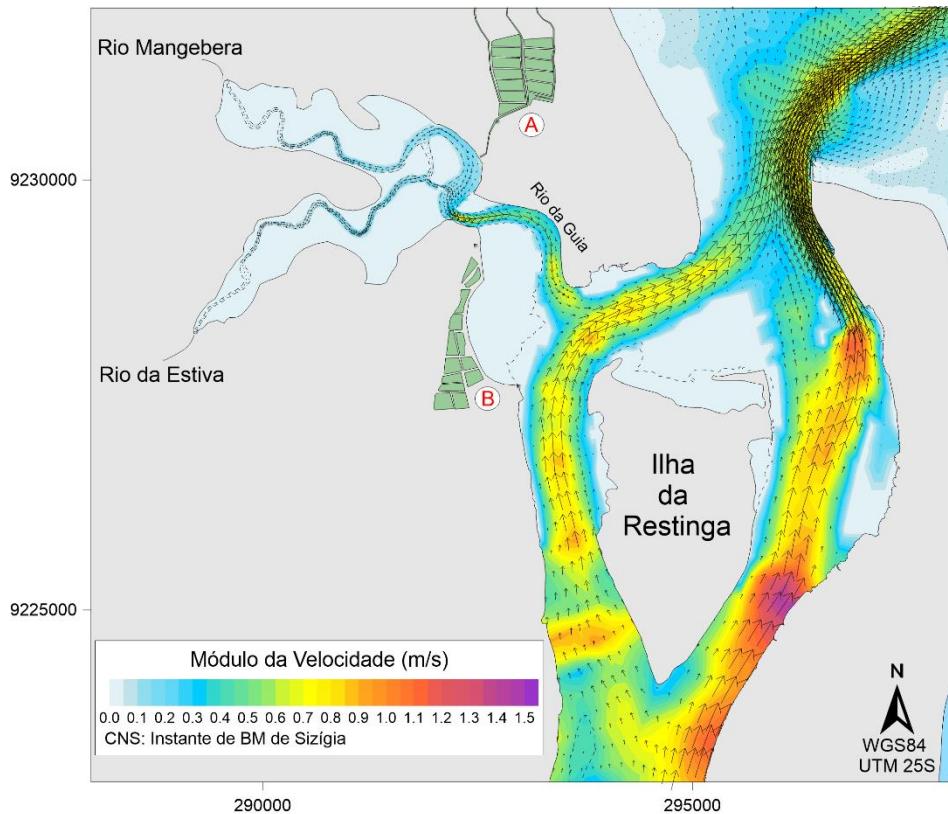


Figura A.8. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região norte do ERPN. Nota-se que durante a BM, as velocidades são nulas tanto nos mangues, como em parte do próprio estuário, devido às baixas elevações característica da BM.

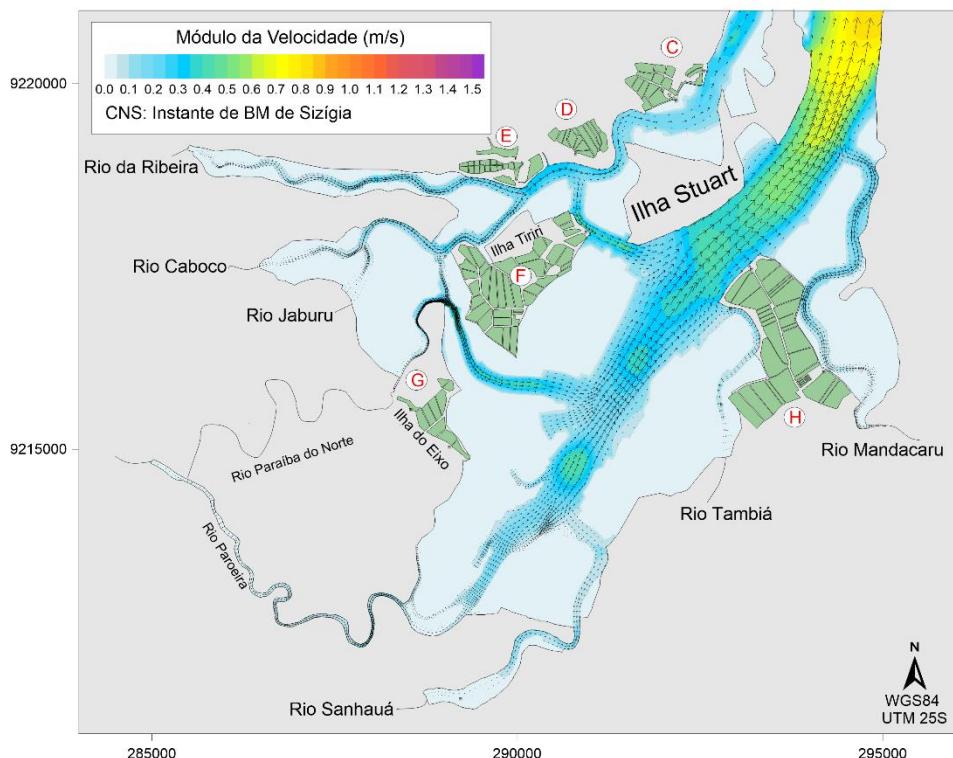


Figura A.9. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de sizígia na região sul do ERPN.

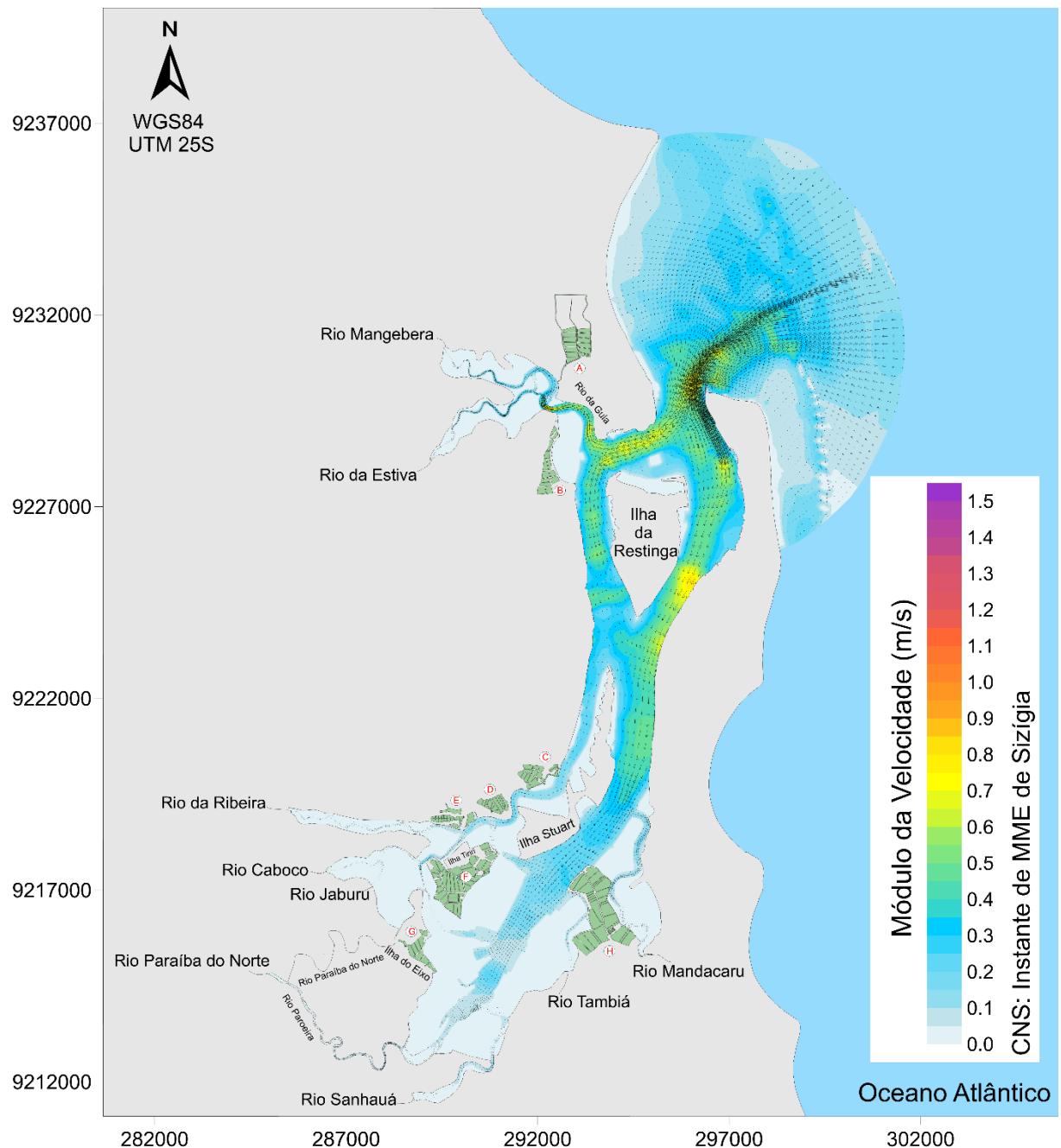


Figura A. 10. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de sizígia do CNS.

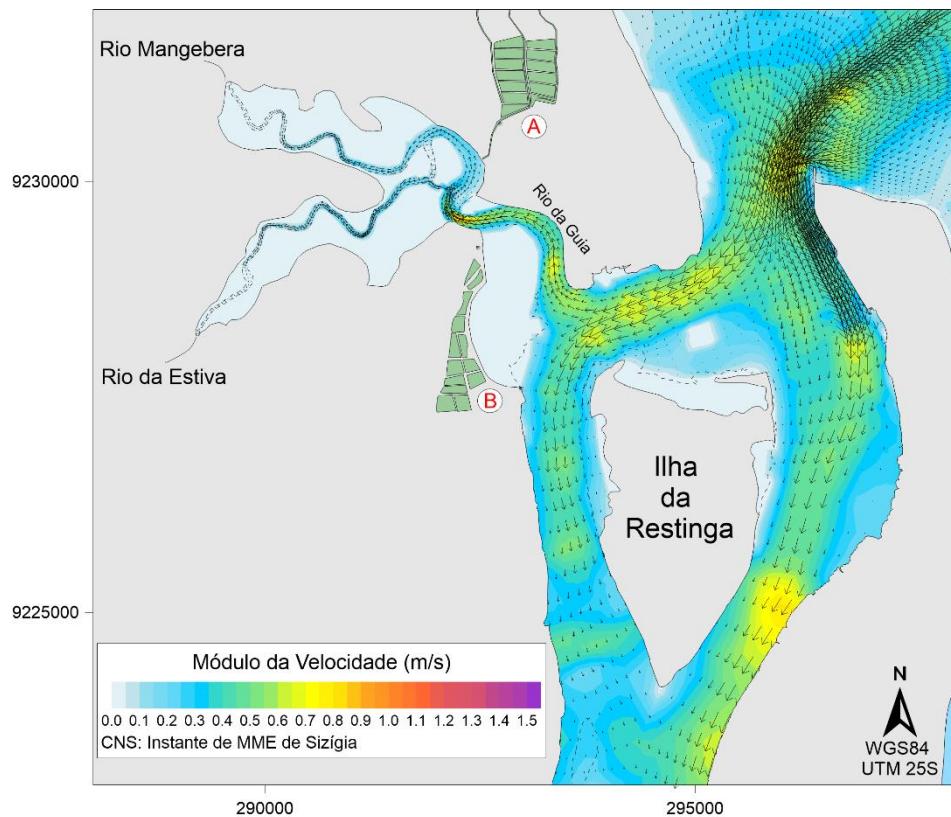


Figura A. 11. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região norte do ERPN.

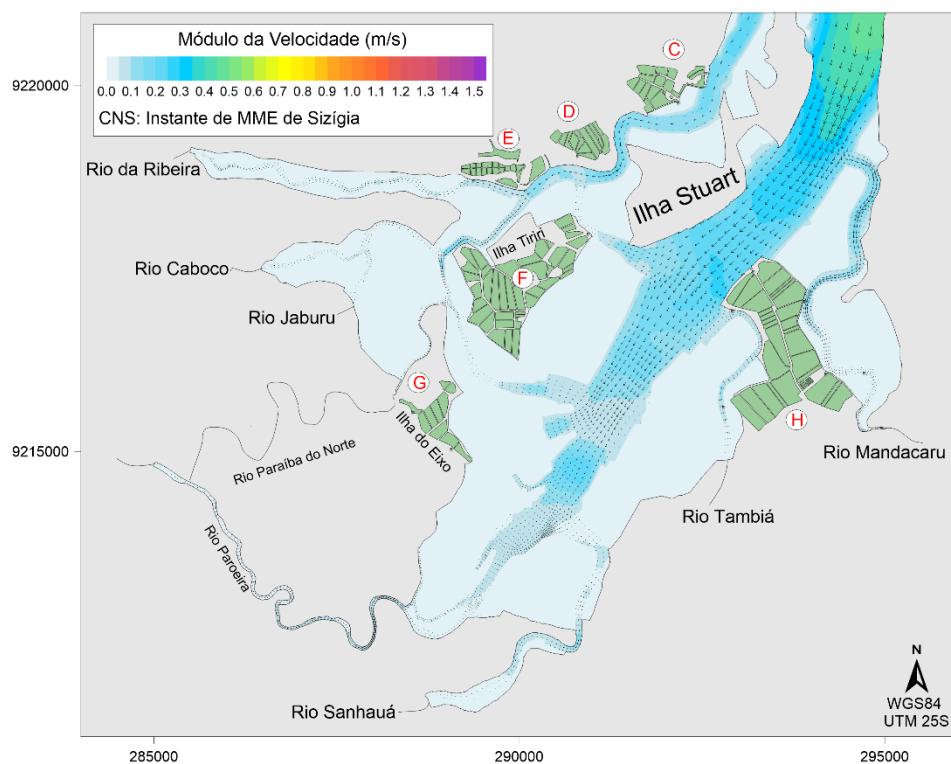


Figura A. 12. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de sizígia na região sul do ERPN.

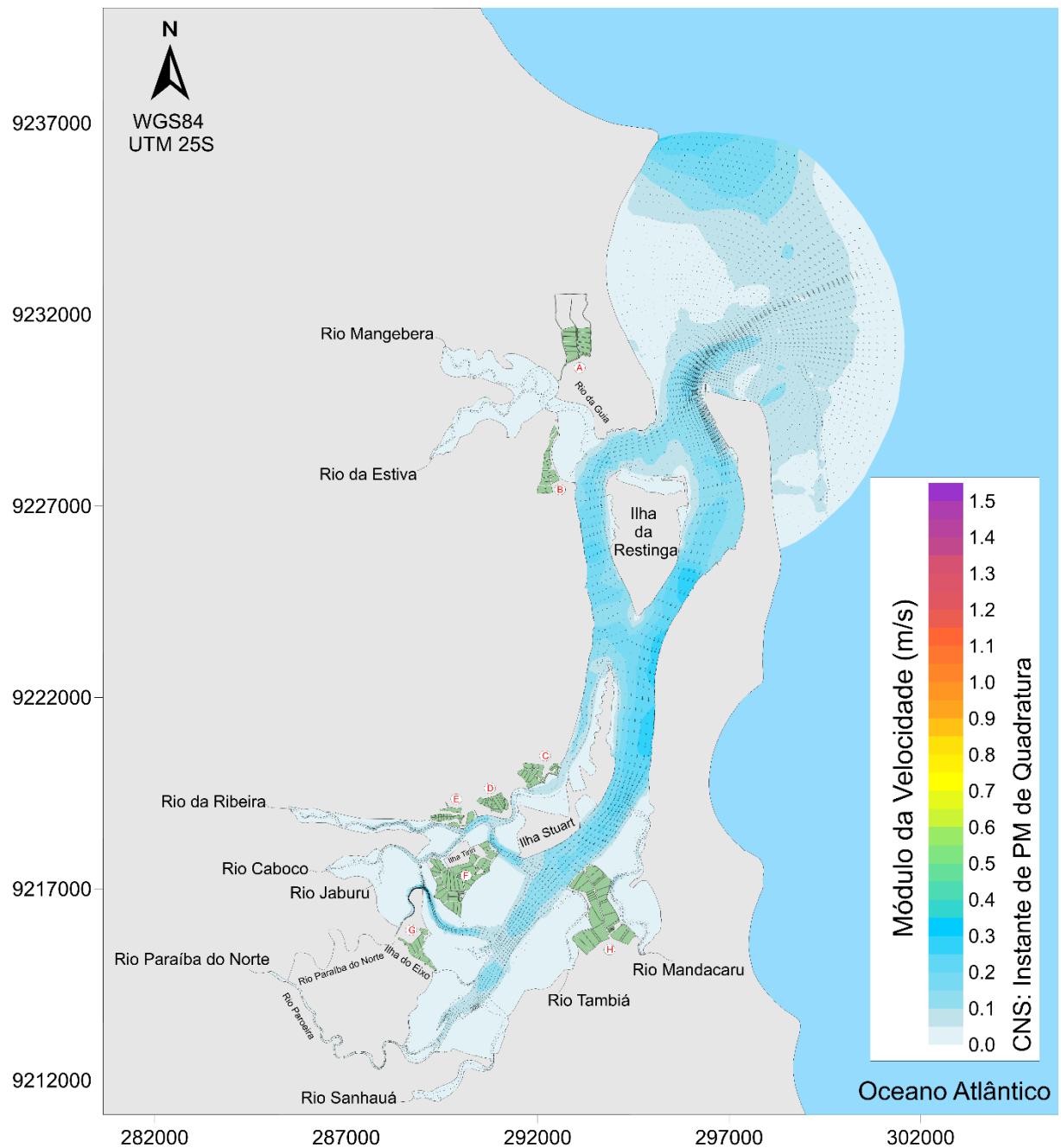


Figura A. 13. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em PM de quadratura do CNS.

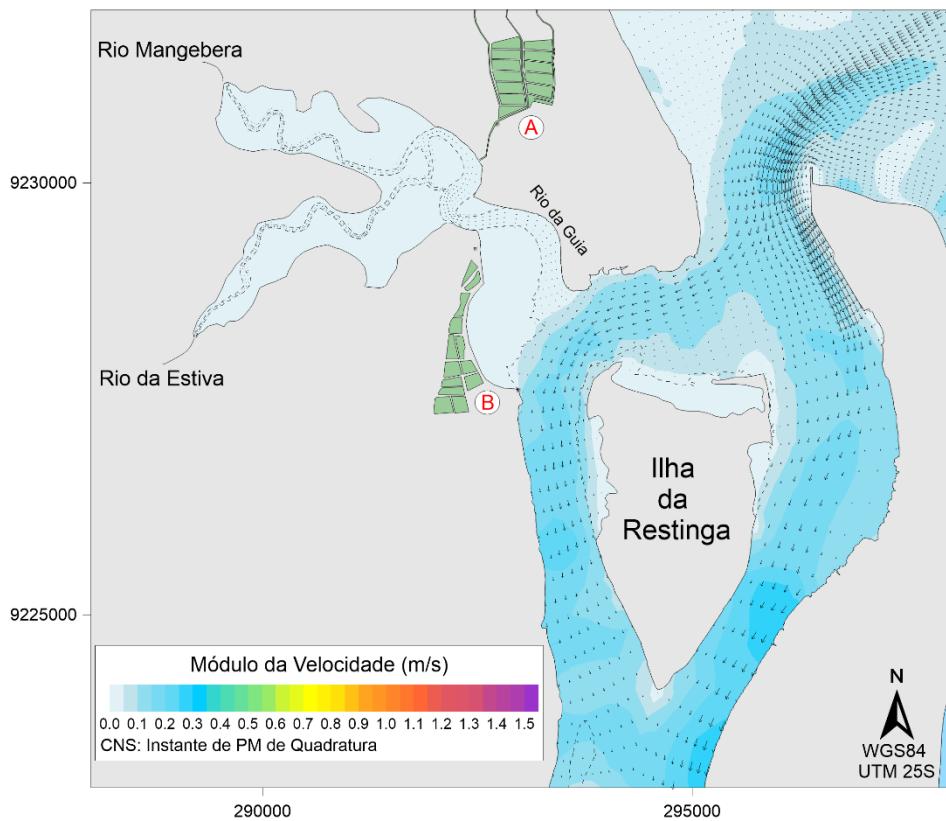


Figura A. 14. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio da Guia e em seus contribuintes.

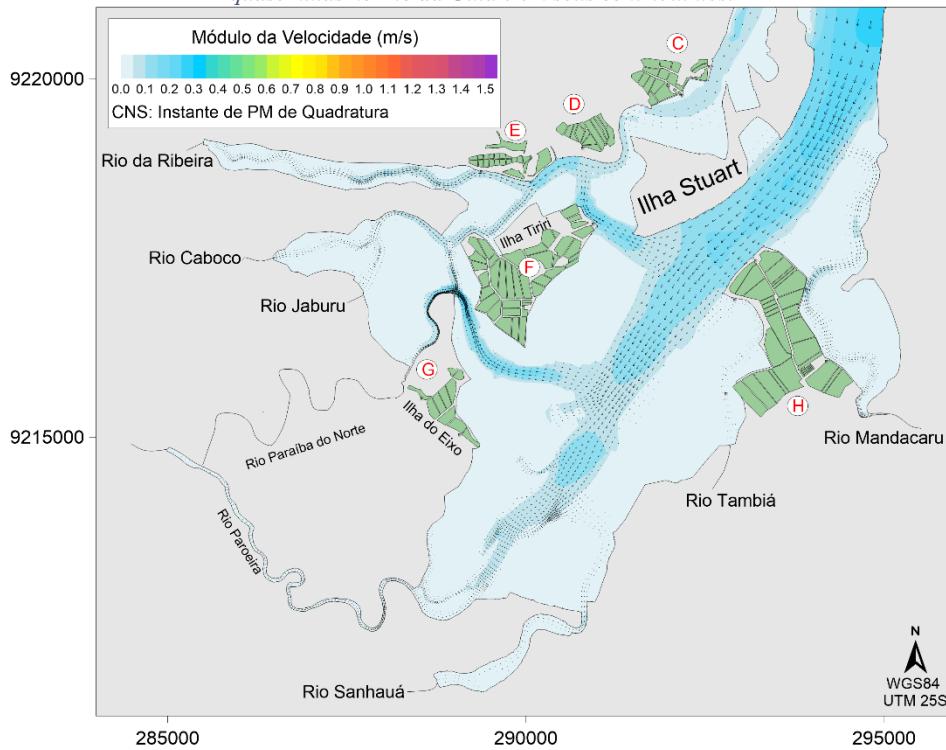


Figura A. 15. Padrão de circulação hidrodinâmica em PM de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio Sanhauá, Tambiá e Mandacaru.

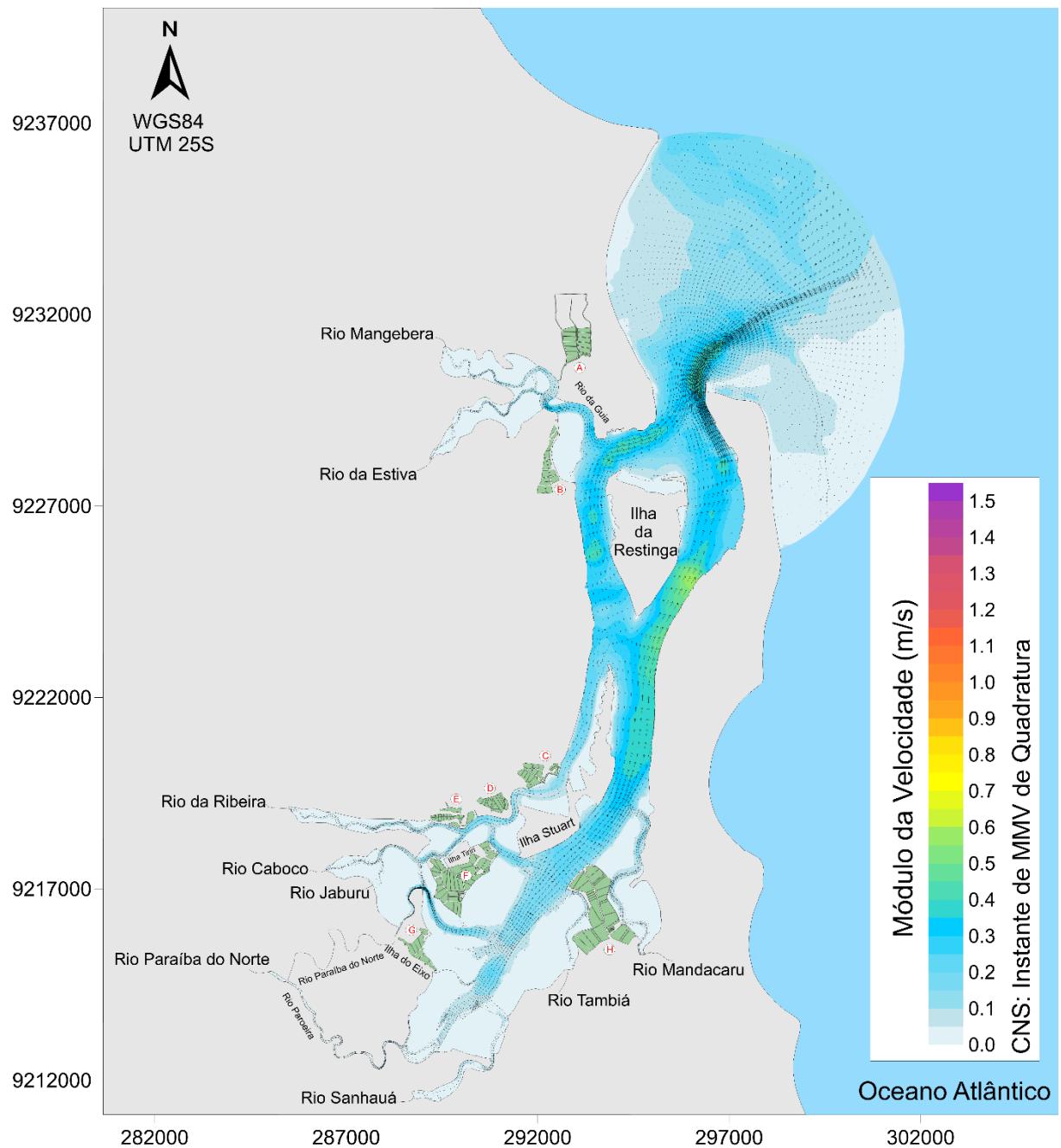


Figura A. 16. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MMV de quadratura do CNS.

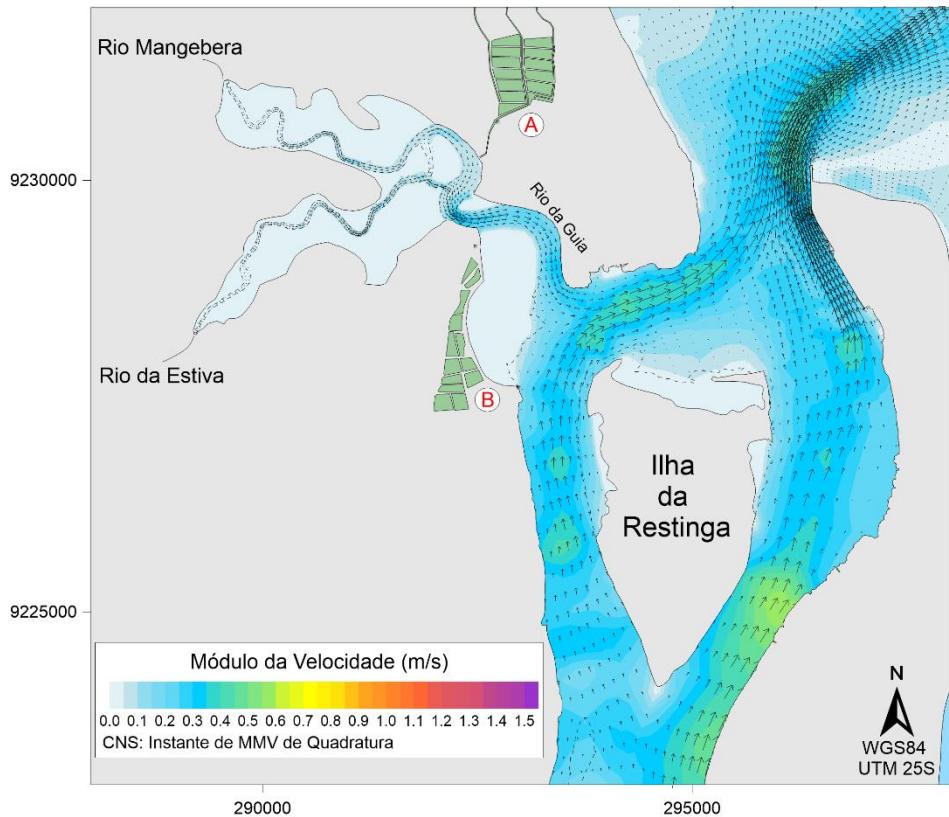


Figura A. 17. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região norte do ERPN.

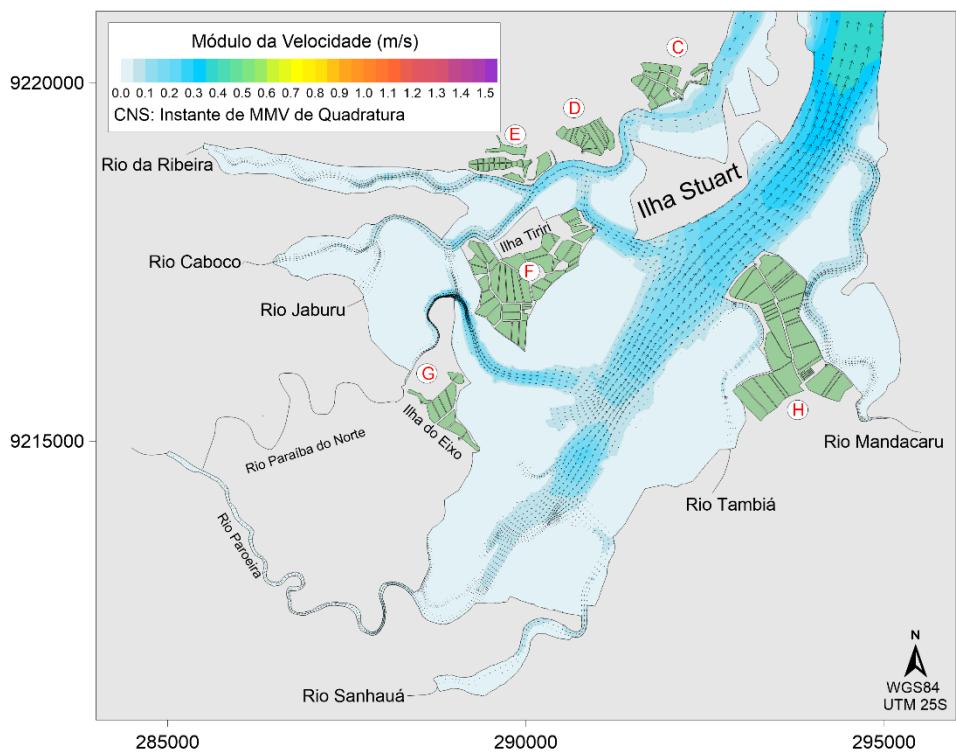


Figura A. 18. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN.

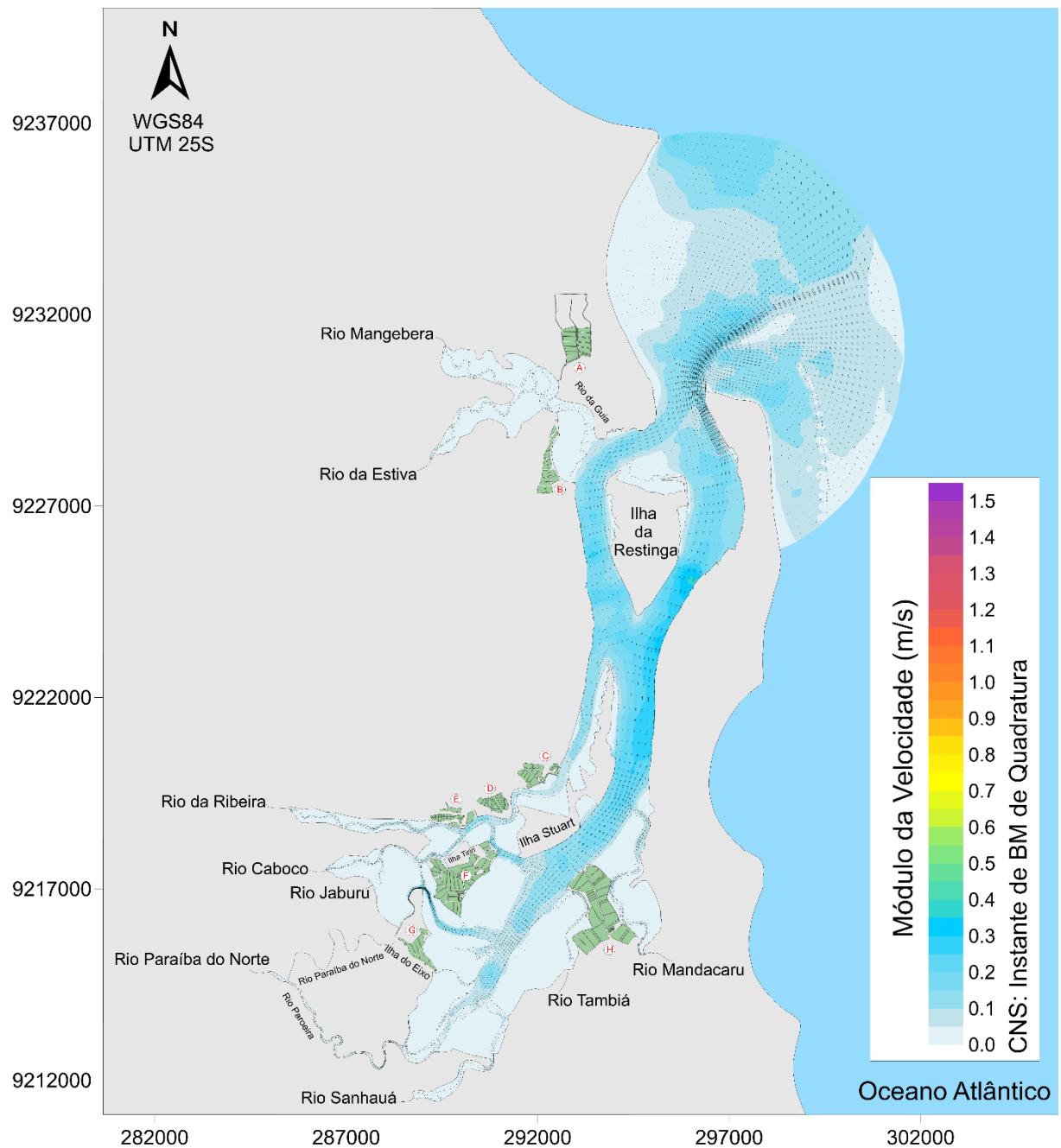


Figura A. 19. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em BM de quadratura do CNS.

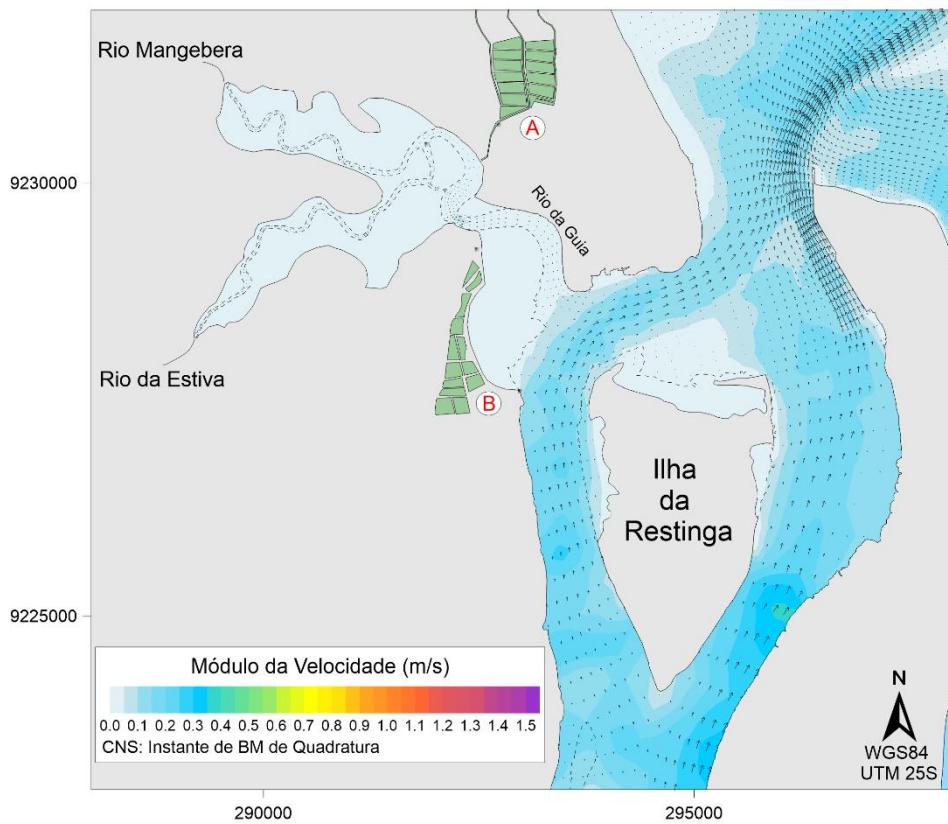


Figura A. 20. Padrão de circulação hidrodinâmica em BM de quadratura na região norte do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio da Guia e em seus contribuintes.

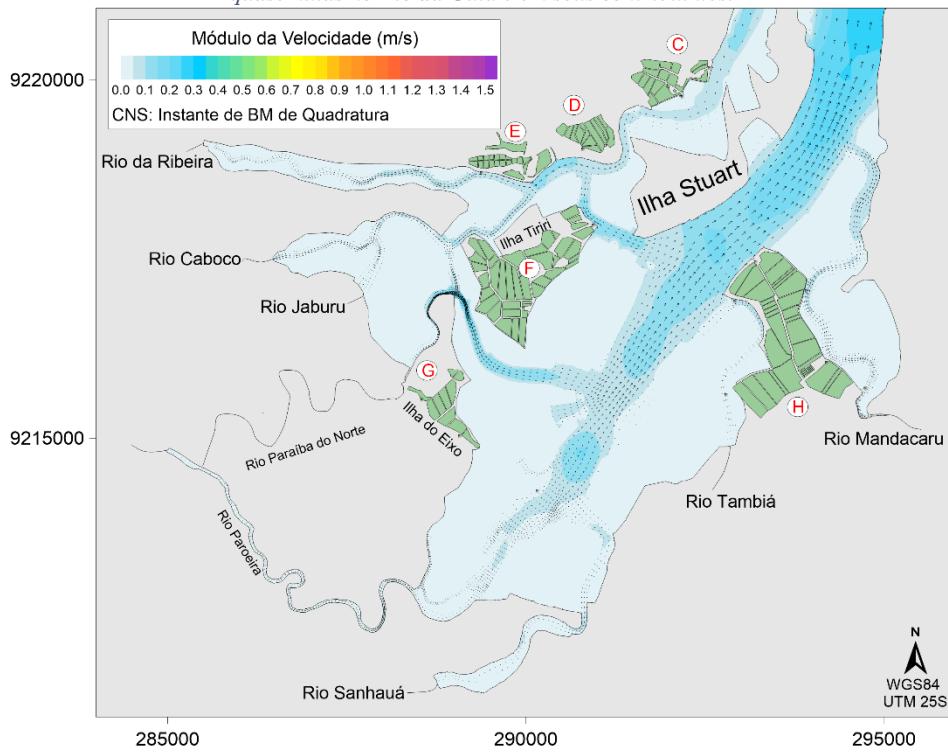


Figura A. 21. Padrão de circulação hidrodinâmica em MMV de quadratura na região sul do ERPN. Nota-se as velocidades quase nulas no Rio Sanhauá, Tambiá e Mandacaru.

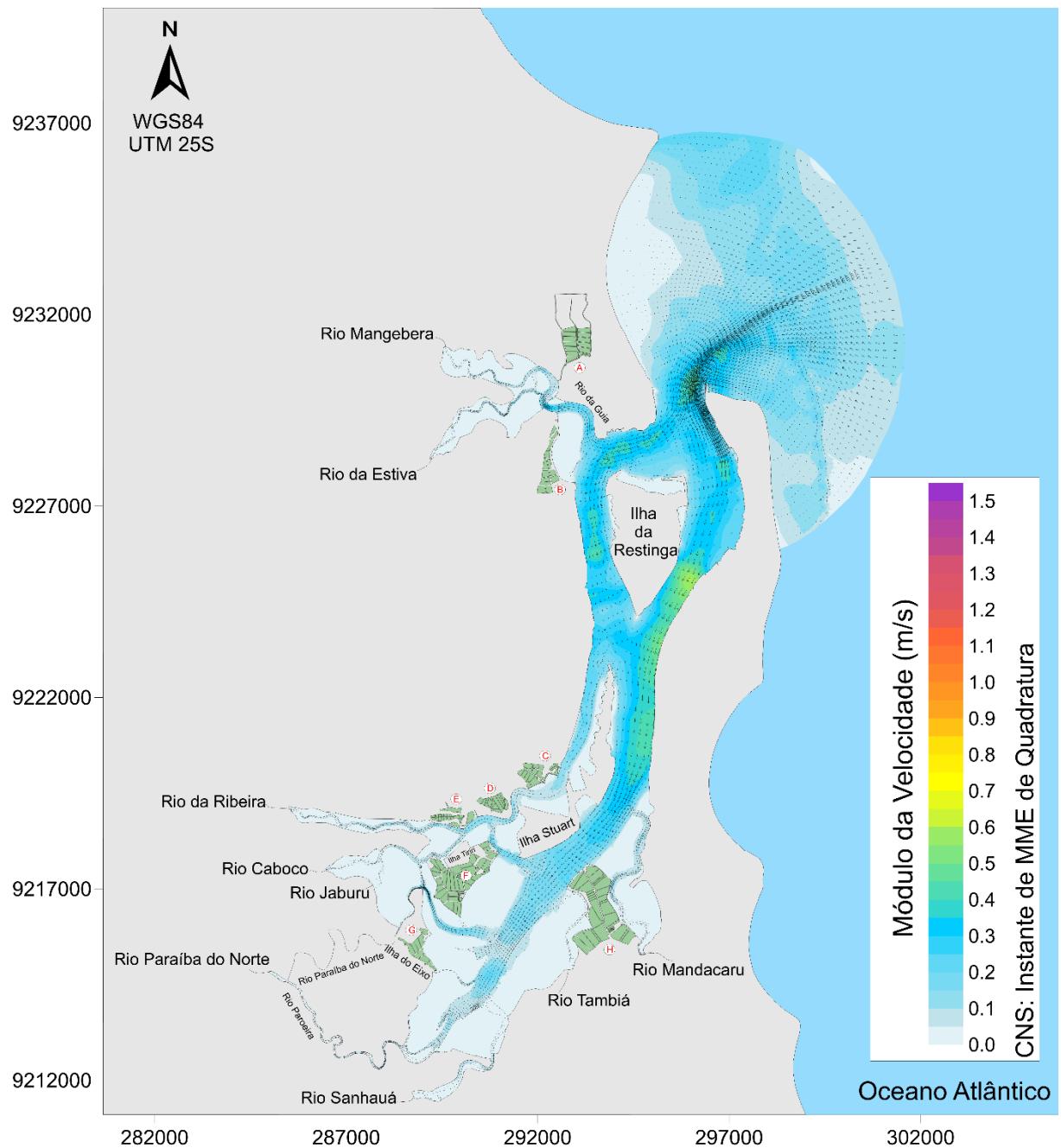


Figura A. 22. Padrão de circulação hidrodinâmica contendo as isolinhas de velocidade (m/s) das correntes e vetores de vazões (m^3/s) em MME de quadratura do CNS.

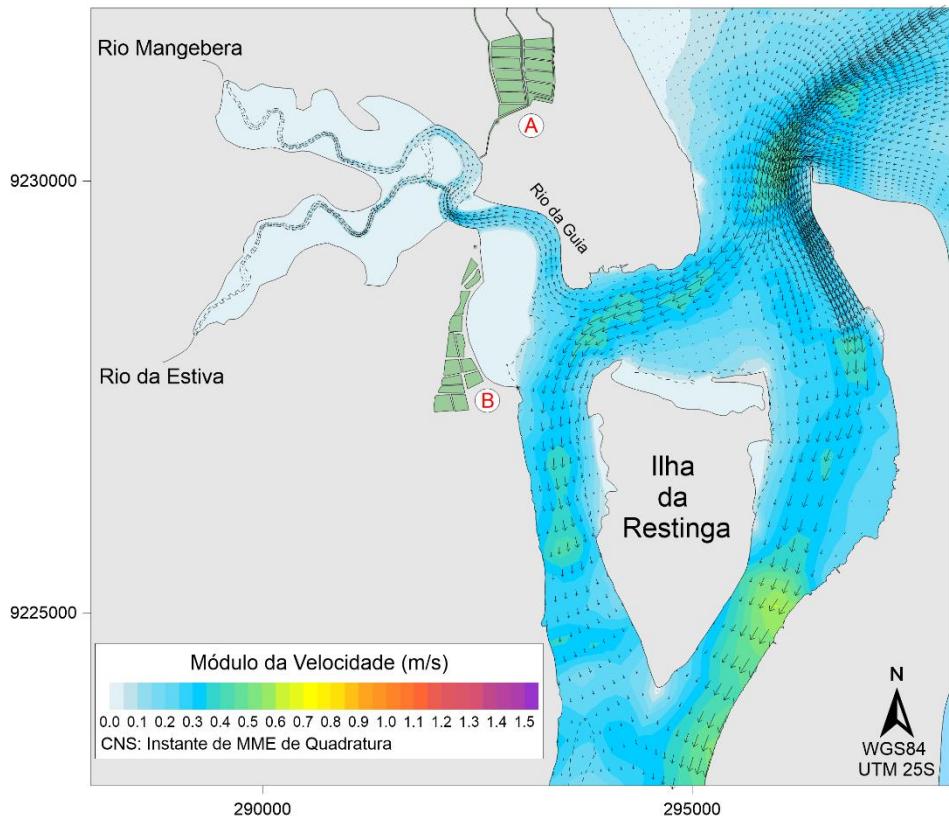


Figura A. 23. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região norte do ERPN.

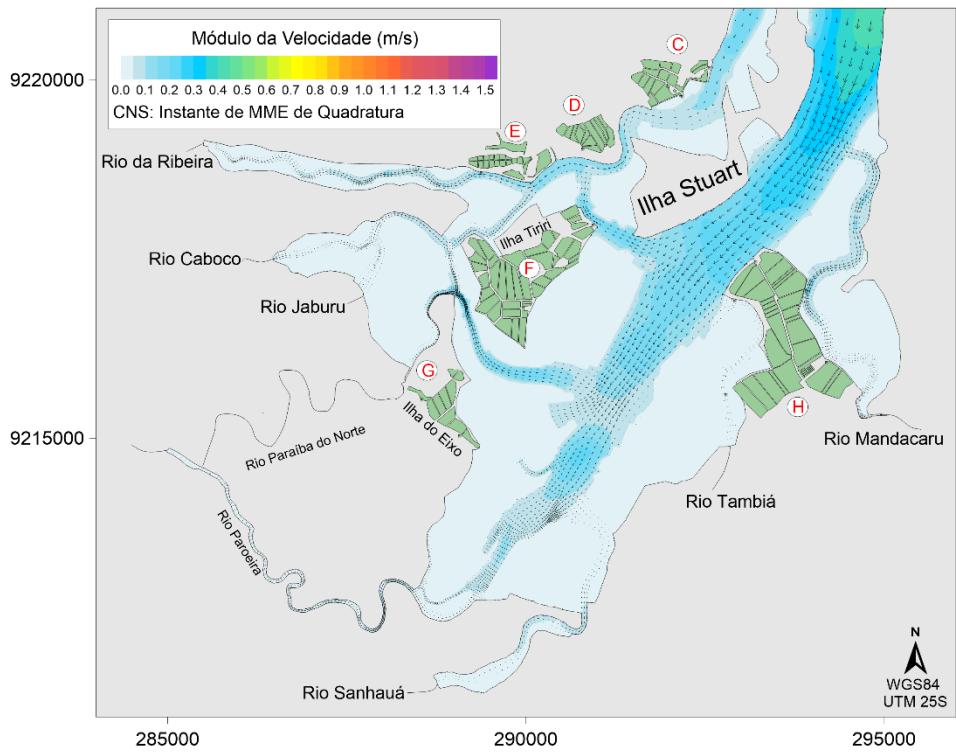


Figura A. 24. Padrão de circulação hidrodinâmica em MME de quadratura na região sul do ERPN.