



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

MARIANA KUMMER DA ROCHA PINHEIRO

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO
COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA PARA
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMBOCADURAS**

Natal/RN

2020

MARIANA KUMMER DA ROCHA PINHEIRO

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO
COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA PARA
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMBOCADURAS**

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ada Cristina Scudelari
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha

Natal/RN

2020

MARIANA KUMMER DA ROCHA PINHEIRO

**CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA E RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO
COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA PARA
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMBOCADURAS**

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

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Ada Cristina Scudelari – Orientadora – UFRN

Prof.^a Dr.^a Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha – Coorientadora – UFPR

Dr.^a Bruna Arcie Polli – Examinadora externa – LACTEC/PR

Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto – Examinador interno - UFRN

Natal/RN, 19 de outubro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e contribuíram para a elaboração e conclusão deste trabalho.

À minha família, por todo o apoio incondicional, carinho e incentivo aos estudos. Aos meus amigos, por todos os momentos de descontração, pelas conversas e palavras de incentivo.

À minha orientadora, prof.^a Ada Scudelari, por todos os ensinamentos, conselhos, pela paciência e disposição em me orientar e esclarecer dúvidas ao longo da pesquisa.

À minha coorientadora, prof.^a Cynara Cunha, pelo auxílio na elaboração dos modelos do SisBaHiA[®] e pelas sugestões, críticas e orientações, que foram essenciais para o desenvolvimento e conclusão do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite e pelas avaliações e contribuições para a pesquisa.

Aos alunos e professores do Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagem Costeira e Oceânica (GNOMO), sobretudo à Teresa, Erick e aos professores Maria de Fátima e Venerando, pela companhia diária, pelo auxílio e pelas sugestões para a pesquisa.

Aos demais professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA), por todas as experiências, colaborações e confraternizações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD, projeto n. 88881.068511/2014-01, Edital 071/2013) e o projeto intitulado “Qualidade e circulação de água em ecossistemas costeiros: monitoramento e modelagem para tomada de decisão”.

RESUMO

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é um sistema formado por duas lagunas, Mundaú e Manguaba, que são conectadas por canais estreitos e compartilham uma entrada oceânica que muda de posição dinamicamente. Apesar da grande importância socioeconômica para o estado de Alagoas, o complexo possui um acelerado processo de degradação ambiental devido às práticas antrópicas como o lançamento de esgoto sanitário, efluentes industriais e exploração dos recursos naturais. Diante disso, o objetivo deste trabalho é avaliar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas do complexo estuarino lagunar, levando em consideração as alterações morfológicas ocorridas na embocadura. As modelagens de circulação hidrodinâmica e as análises de tempos hidráulicos característicos foram realizadas com o auxílio do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA[®]) para três cenários com configurações de embocaduras distintas (2006, 2014 e 2017). As simulações foram elaboradas a partir dos dados médios de vazão e de vento, para as estações seca e chuvosa. Os resultados hidrodinâmicos indicaram velocidades e amplitudes de marés mais elevadas nas embocaduras dos canais principais das lagunas Mundaú e Manguaba. A verificação da amplitude da maré revelou que o sistema de canais é um filtro eficiente na redução dos efeitos da maré nas lagunas. O tempo de residência apontou possíveis áreas de estagnação na região norte da laguna Manguaba e nas porções leste e sul da laguna Mundaú. As simulações do tempo de residência, idade da água e taxa de renovação evidenciaram que o CELMM é fortemente influenciado pelo aporte fluvial dos rios Paraíba do Meio e Mundaú. O cenário com a configuração de 2014 apresentou maiores taxas de renovação e, em consequência, menores idades das águas, mostrando que as diferentes configurações de embocaduras interferem de forma significativa na circulação hidrodinâmica e na renovação das águas do complexo estuarino lagunar.

Palavras-chave: SisBaHiA[®]; Lagoas costeiras; Tempo de residência; Taxa de renovação; Idade da água.

ABSTRACT

Title: Hydrodynamic circulation and water renewal in the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon Complex for different inlet configurations.

The Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon Complex (MMELC) is a system formed by two lagoons, Mundaú and Manguaba, which are connected through narrow channels and share an ocean inlet that shifts positions dynamically. Despite the great socioeconomic significance for the state of Alagoas, the complex has an accelerated process of environmental degradation due to anthropic practices such as the discharge of sanitary sewage, industrial effluents and exploitation of natural resources. Therefore, the aim of this study is to evaluate the hydrodynamic circulation and the water renewal of the lagoon complex, considering the morphological changes occurred in the ocean inlet. The hydrodynamic modeling and the analysis of characteristic hydraulic times were performed with the Hydrodynamic Environmental System (SisBaHiA[®]) for three scenarios of different inlet configurations (2006, 2014 and 2017). The simulations were carried out using the average freshwater discharge and wind data for dry and wet seasons. The hydrodynamic results indicated higher velocities and tidal ranges at the inlets of the main channels of the Mundaú and Manguaba lagoons. The tidal range revealed that the channel system is an efficient filter in reducing tidal variability inside the lagoons. The residence time indicated possible stagnation areas in the northern region of the Manguaba lagoon and in the eastern and southern portions of the Mundaú lagoon. The residence time, water age and renewal rate simulations showed that MMELC is strongly influenced by the river discharge of the Paraíba do Meio and Mundaú rivers. The scenario with the 2014 configuration had higher renewal rates and, consequently, lower water ages, indicating that the different inlet configurations significantly interfere with the hydrodynamic circulation and water renewal of the lagoon estuarine complex.

Keywords: SisBaHiA[®]; Coastal lagoons; Residence time; Renewal rate; Water age.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação geomorfológica das lagoas costeiras a) lagoa sufocada b) lagoa restrita e c) lagoa vazada	22
Figura 3.1 - Mapa de localização do CELMM, baseado em dados do IBGE (2019) e imagens do satélite LANDSAT 8 OLI (USGS, 2018) com composição RGB 751	31
Figura 3.2 - Mapa com as bacias hidrográficas do CELMM, baseado nos dados do IBGE (2019), do SEMARH AL (2007) e do SEPLAG AL (2019) ..	33
Figura 3.3 - Normal climatológica de 1994 – 2019 para Maceió/AL, elaborada a partir dos dados mensais do INMET (2020)	35
Figura 3.4 - Uso da terra e cobertura vegetal do CELMM em 2009	37
Figura 3.5 - Alterações morfológicas na embocadura do CELMM a partir de imagens orbitais do satélite Landsat para o período de 1986 até 2017. Datum WGS 1984 Zona UTM 25S	40
Figura 5.1 - Fluxograma metodológico	47
Figura 5.2 - Domínio de modelagem do CELMM, com malha de elementos finitos, localizações dos municípios e dos principais rios contribuintes e detalhes das malhas na região da embocadura nos anos de 2006, 2014 e 2017	50
Figura 5.3 - Batimetria do domínio de modelagem, com as localizações dos rios contribuintes	51
Figura 5.4 - Comportamento da embocadura do CELMM nos anos de 2006, 2014 e 2017	52
Figura 5.5 - Rugosidade de fundo no domínio de modelagem do CELMM e detalhes das embocaduras nos anos de 2006, 2014 e 2017	53
Figura 5.6 - Valores de vazões médias diárias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio entre 1974 e 2018	55
Figura 5.7 - Vazões diárias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio para o ano de 2014, utilizadas na calibração do modelo	56
Figura 5.8 - a) Rosa de distribuição dos ventos médios da estação Maceió A-303 para o período entre 2004 e 2018 b) Rosa dos ventos da estação Maceió A-303 para os meses de janeiro, fevereiro e março	

de 2014	57
Figura 5.9 - a) Direção e intensidade do vento no mês de janeiro, a partir dos dados médios da estação Maceió A-303 b) Direção e intensidade do vento no mês de julho, a partir dos dados médios da estação Maceió A-303	58
Figura 5.10 - Curva de maré utilizada na modelagem e obtida a partir das constantes harmônicas fornecidas pela DHN	60
Figura 5.11 - Distribuição das estações no CELMM	62
Figura 6.1 - Comparação entre os valores de níveis d'água medidos e os simulados pelo SisBaHiA® na estação 1 (Laguna Mundaú)	64
Figura 6.2 - Comparação entre os valores de níveis d'água medidos e os simulados pelo SisBaHiA® na estação 2 (Laguna Manguaba)	65
Figura 6.3 - Correlação entre os dados medidos e simulados pelo SisBaHiA® na estação 1 (Laguna Mundaú)	66
Figura 6.4 - Correlação entre os dados medidos e simulados pelo SisBaHiA® na estação 2 (Laguna Manguaba)	66
Figura 6.5 - Elevação da superfície livre na fronteira aberta durante o período seco com destaque para os períodos de sizígia e quadratura definidos para os cálculos de amplitude de maré, defasagem e volume	67
Figura 6.6 - Elevação da superfície livre na fronteira aberta durante o período chuvoso com destaque para os períodos de sizígia e quadratura definidos para os cálculos de amplitude de maré, defasagem e volume	67
Figura 6.7 - Elipse de maré na estação B, que corresponde à região próxima à embocadura da laguna Mundaú	68
Figura 6.8 - Elipse de maré na estação C, que corresponde à região intermediária no canal da laguna Mundaú	69
Figura 6.9 - Elipse de maré na estação G, que corresponde a região próxima à embocadura da laguna Manguaba	70
Figura 6.10 - Elipse de maré na estação H, que corresponde a região intermediária do canal na laguna Manguaba	70
Figura 6.11 - Elevações da superfície livre das estações de controle B e D,	

representativos da região próxima à embocadura e a porção sul da laguna Mundaú, para os cenários C1, C2 e C3 no período seco (21/01 a 05/02)	71
Figura 6.12 - Elevações da superfície livre das estações de controle G e I, representativos da região próxima à embocadura e a porção sul da laguna Manguaba, para os cenários C1, C2 e C3 no período seco (21/01 a 05/02), com detalhe da estação I	72
Figura 6.13 - Elevações da superfície livre das estações de controle B, D, G e I para os cenários C1, C2 e C3 no período chuvoso (03/07 a 18/07) .	73
Figura 6.14 - Elevações da superfície livre nas estações de controle A a D, inseridas na laguna Mundaú, para dois ciclos de maré de sizígia para o C1	74
Figura 6.15 - Elevações da superfície livre nas estações A, G, H e I, inseridas na laguna Manguaba, para dois ciclos de maré de sizígia para o C1	74
Figura 6.16 - Amplitudes de marés das estações A até I para os períodos seco e chuvoso e ciclos de sizígia e quadratura dos cenários C1, C2 e C3 .	75
Figura 6.17 - Seções transversais S1, S2 e S3 consideradas para os cálculos dos volumes de entrada e saída dos cenários C1, C2 e C3	77
Figura 6.18 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C1	79
Figura 6.19 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C2	80
Figura 6.20 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C3	80
Figura 6.21 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C1 e indicação dos perfis longitudinais	81
Figura 6.22 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C2 e indicação dos perfis longitudinais	82
Figura 6.23 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C3 e indicação dos perfis longitudinais	82
Figura 6.24 - Perfil longitudinal da laguna Mundaú para os cenários C1, C2 e C3 no período seco. Distância do norte da laguna ao sul	83
Figura 6.25 - Perfil longitudinal da laguna Manguaba para os cenários C1, C2 e	

C3 no período seco. Distância do norte da laguna ao sul	84
Figura 6.26 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C1	85
Figura 6.27 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C2	85
Figura 6.28 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C3	86
Figura 6.29 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C1 e indicação dos perfis longitudinais	87
Figura 6.30 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C2 e indicação dos perfis longitudinais	87
Figura 6.31 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C3 e indicação dos perfis longitudinais	88
Figura 6.32 - Perfis longitudinais das lagoas Mundaú e Manguaba para os cenários C1, C2 e C3 no período chuvoso. Distância do norte das lagoas ao sul	89
Figura 6.33 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C1	90
Figura 6.34 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C2	91
Figura 6.35 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C3	91
Figura 6.36 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação nas estações D e E da laguna Mundaú durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3	93
Figura 6.37 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação na estação F na laguna Mundaú e estação I na laguna Manguaba, durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3	94
Figura 6.38 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação nas estações J e K da laguna Manguaba, durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3	95
Figura 6.39 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso	

para o cenário C1	96
Figura 6.40 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C2	97
Figura 6.41 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C3	97
Figura 6.42 - Séries temporais da taxa de renovação da laguna Mundaú (estações D, E e F), para o período chuvoso nos cenários C1, C2 e C3	99
Figura 6.43 - Séries temporais da taxa de renovação da laguna Manguaba (estações I, J e K), para o período chuvoso nos cenários C1, C2 e C3	100
Figura 6.44 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C1	101
Figura 6.45 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C2	102
Figura 6.46 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C3	102
Figura 6.47 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações D, E e F da laguna Mundaú durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3	104
Figura 6.48 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações I, J e K da laguna Manguaba durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3	105
Figura 6.49 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C1	106
Figura 6.50 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C2	107
Figura 6.51 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C3	107
Figura 6.52 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações D, E e F da laguna Mundaú durante o período chuvoso para os cenários C1, C2 e C3	109
Figura 6.53 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas	

	nas estações I, J e K da laguna Manguaba durante o período chuvoso para os cenários C1, C2 e C3	110
Figura A.1 -	Termos da equação e interfaces dissipativas utilizados nas simulações hidrodinâmicas	124
Figura A.2 -	Parâmetros hidrodinâmicos utilizados nas simulações hidrodinâmicas e dados do lançamento de partículas do modelo de transporte lagrangeano no período seco	125
Figura A.3 -	Parâmetros utilizados nas simulações dos tempos de residências do modelo de transporte lagrangeano	126
Figura A.4 -	Parâmetros de dispersão turbulenta utilizados nas simulações das taxas de renovações do modelo de transporte euleriano para o período seco	127
Figura A.5 -	Parâmetros de interface dissipativa utilizados nas simulações das taxas de renovações do modelo de transporte euleriano para o período seco	128
Figura A.6 -	Parâmetros de dispersão turbulenta utilizados nas simulações das taxas de renovações e das idades das águas do modelo de transporte euleriano para o período seco	129
Figura A.7 -	Parâmetros de interface dissipativa utilizados nas simulações das idades das águas do modelo de transporte euleriano para o período seco	130
Figura A.8 -	Parâmetros de dispersão turbulenta e dados das simulações das idades das águas do modelo de transporte euleriano	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição RGB das imagens de satélites utilizadas, com as datas e horários adquiridos.....	40
Tabela 4.1 - Valores sugeridos para os coeficientes de absorção	44
Tabela 5.1 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo	54
Tabela 5.2 - Constantes harmônicas utilizadas e seus respectivos valores de fase, período e amplitude do porto de Maceió	59
Tabela 6.1 - Porcentagens de amortecimento da amplitude máxima de maré para os cenários C1, C2 e C3, nos períodos seco e chuvoso, considerando os ciclos de sizígia e quadratura	76
Tabela 6.2 - Volumes de entrada e saída para as lagoas Mundaú e Manguaba nos cenários C1, C2 e C3, considerando os dois períodos (seco e chuvoso) e os ciclos de sizígia e quadratura	78
Tabela 6.3 - Resumo quantitativo das taxas de renovação e idades das águas para os períodos seco e chuvoso nos cenários C1, C2 e C3	111

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Lagunas costeiras.....	21
2.2. Embocaduras.....	22
2.3. Tempos hidráulicos característicos.....	23
2.4. Estudos anteriores.....	25
2.5. Sistemas de modelagem ambiental.....	28
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
3.1. Localização e descrição da área de estudo.....	31
3.2. Recursos hídricos	32
3.3. Clima.....	34
3.4. Geologia e geomorfologia.....	35
3.5. Uso do solo e problemas ambientais	36
3.6. Alterações morfológicas na embocadura.....	39
4. MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	42
4.1. Modelo hidrodinâmico.....	42
4.2. Modelo de transporte lagrangeano	43
4.3. Modelo de transporte euleriano	44
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
5.1. Malhas e domínios de modelagem	49
5.1.1. Malha de discretização	49
5.1.2. Batimetria	51
5.1.3. Parâmetros de fundo e rugosidade.....	52
5.2. Dados oceanográficos, hidrológicos e meteorológicos.....	54

5.2.1. Vazões dos rios	54
5.2.2. Ventos	56
5.2.3. Marés.....	59
5.3. Condições iniciais e de contorno dos modelos	60
5.4. Cenários de modelagem.....	61
5.5. Estações	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1. Calibração do modelo	64
6.2. Resultados da modelagem hidrodinâmica	66
6.2.1. Velocidades	67
6.2.2. Elevação da superfície livre	71
6.2.3. Balanço dos volumes de entrada e saída	76
6.3. Resultados do modelo de transporte lagrangeano	78
6.3.1. Tempo de residência	79
6.4. Resultados do modelo de transporte euleriano	89
6.4.1. Taxa de renovação	89
6.4.2. Idade da água.....	101
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	112
REFERÊNCIAS.....	115
APÊNDICE A.....	124

1. INTRODUÇÃO

As lagunas costeiras são corpos de água rasos, encontrados em todos os continentes, geralmente orientados de forma paralela à costa, e conectados ao oceano através de uma ou mais embocaduras. Sua formação está associada à elevação do nível do mar durante o Holoceno ou Pleistoceno e à construção de barreiras costeiras através de processos marinhos (KJERFVE, 1994).

Os ambientes lagunares são essenciais para a estabilidade climática local e regional. Possuem uma grande importância econômica, devido ao uso intensivo para a aquicultura, recreação e abastecimento público. Além disso, são considerados ecossistemas com elevada produtividade primária (fitoplâncton e plantas aquáticas), contribuindo para a manutenção das cadeias alimentares aquáticas (ANTHONY et al., 2009; SOUZA; FERNANDES, 2009).

Com a urbanização/industrialização, as lagunas estão constantemente sujeitas à degradação ambiental proveniente de fontes domésticas, agrícolas e industriais, causando déficits de oxigênio dissolvido, aumento da toxicidade, desaparecimento de animais bentônicos, aumento da turbidez, mortalidade de peixes, assoreamento, entre outros problemas (GÖNENÇ; WOLFLIN, 2005; KJERFVE; MAGILL, 1989).

As entradas de nutrientes e sedimentos através das descargas fluviais, por exemplo, aumentam a produtividade primária das lagunas, mas em excesso, podem causar eutrofização. Uma variedade de substâncias prejudiciais, como metais pesados, produtos químicos orgânicos e pesticidas, também são transportados por descargas fluviais, causando poluição das lagunas (KJERFVE; MAGILL, 1989).

A qualidade das águas depende criticamente da circulação da laguna, das trocas de águas com a região costeira adjacente e do tempo de residência (KJERFVE, 1994). Por sua vez, o transporte e as trocas de águas entre a laguna e a região costeira dependem diretamente das configurações das embocaduras (número de entradas, comprimento, largura e profundidade) e dos agentes dinâmicos, tais como vento, maré e vazões fluviais, responsáveis pela geração de correntes (BIRD, 2008; PANDA et al., 2013).

Assim, as embocaduras das lagunas são regiões morfologicamente complexas, onde a sua estabilidade depende de um equilíbrio entre os fluxos de maré e o aporte fluvial, que promovem a abertura/fechamento das embocaduras

(FORTUNATO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2006; SILVA et al., 2020). As configurações morfológicas das embocaduras determinam a capacidade de trocas de águas de uma laguna, onde o tamanho e o maior número de entradas provocam um aumento nas trocas de águas entre a laguna e a região costeira adjacente, melhorando significativamente a qualidade e a renovação de suas águas (PANDA et al., 2013).

Com relação à renovação das águas, os parâmetros idade da água, taxa de renovação e tempo de residência se tornam essenciais para a determinação das trocas de massas de água e para a detecção de áreas propensas ao acúmulo de poluentes, auxiliando assim na gestão e no planejamento costeiros (AGUILERA et al., 2020).

Dentre os sistemas lagunares existentes na costa brasileira, destaca-se neste estudo o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM), localizado no estado de Alagoas, que é um sistema de corpos aquáticos naturais composto por duas lagunas, Mundaú e Manguaba.

As duas lagunas estão conectadas através de canais estreitos, margeados por manguezais, que terminam em uma única entrada oceânica que muda de posição dinamicamente (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993). De acordo com o estudo realizado por Luz et al. (2021b), que evidencia as alterações morfológicas ocorridas na região entre o período de 1986 até 2018 com o auxílio de imagens orbitais, a embocadura do CELMM possui uma alta variabilidade, com uma constante abertura e fechamento de seus canais. Foi verificado que, entre os anos de 2011 e 2014, ocorreu a formação de uma nova entrada oceânica, conectando a laguna Manguaba com a região costeira.

Além de ser o ambiente mais representativo do litoral, o complexo tem um valor socioeconômico significativo para o Estado de Alagoas. As principais atividades econômicas exercidas nas bacias dos rios contribuintes do CELMM e seu entorno são voltadas para o comércio e serviços; indústria de transformação, com destaque para a indústria química e usinas sucroalcooleiras; agricultura, com o predomínio de cana-de-açúcar; e a pecuária bovina, combinada com a presença de diversos matadouros (ANA, 2006).

No interior das lagunas, a pesca artesanal de peixes é uma atividade de grande importância social para a região. Também são destacadas as coletas de crustáceos e moluscos bivalves, como o sururu. Este molusco é encontrado

principalmente na laguna Mundaú e é o principal alimento da população de baixa renda da região (CORREIA; SOVIERZOSKI, 2008; SILVA; SOUSA, 2008; TEIXEIRA; SÁ, 1998).

Durante as últimas décadas, o CELMM foi alvo do aporte fluvial de efluentes orgânicos e inorgânicos da indústria canavieira, ocasionando em problemas de qualidade da água, com a proliferação de microalgas e as consequentes mortandades de peixes, crustáceos e moluscos. Outros impactos incluem a entrada de efluentes domésticos das cidades de Maceió, Pilar e Marechal Deodoro, localizadas na região leste da laguna Mundaú e nas regiões norte e sul da laguna Manguaba, respectivamente (CORREIA; SOVIERZOSKI, 2008; RIBEIRO et al., 2011).

A hidrodinâmica da região do CELMM vem sendo estudada por diversos autores, dentre os quais se destacam os trabalhos de Lima (2017), Souza (2017), Brito Júnior et al. (2018), Sant'Ana (2019) e Cunha et al. (2021). Estes trabalhos fazem uso de diferentes modelos computacionais para estudar a hidrodinâmica e a renovação das águas do CELMM, destacando assim a importância do uso de modelos computacionais como suporte para decisões estratégicas de planejamento urbano e gestão costeira, conforme afirmado em Cunha et al. (2015). O uso de modelos também é indispensável para a otimização de custos de monitoramento e medição, a partir da interpolação e extrapolação dos dados, uma vez que o levantamento de dados ambientais envolve alto custo (ROSMAN, 2020).

Diversos sistemas de modelagem podem ser utilizados em estudos de corpos d'água, como o DELFT 3D (DELTARES, 2020), MIKE (DHI, 2017), MOHID (MOHID, 2020), IPH-ECO (IPH-ECO, 2020) e SisBaHiA[®] (ROSMAN, 2020). A escolha do modelo mais adequado depende da interface do sistema, dos parâmetros de entrada do modelo, do material de suporte, da experiência do modelador, entre outros fatores (ENGEL et al., 2007; MATEUS et al., 2018).

O sistema de modelagem escolhido para este estudo foi o SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), devido à interface de fácil manuseio, à sua larga aplicação em teses e dissertações (Ver seção Pesquisas-Teses, disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>), e à grande variedade de módulos disponíveis.

Como a região da embocadura do CELMM possui uma alta variabilidade, pretende-se analisar o comportamento de diferentes configurações de embocaduras

com relação à circulação hidrodinâmica e a renovação das águas. Espera-se que o maior número de embocaduras cause um efeito sobre as taxas de renovação das lagunas, melhorando os processos de mistura da região do CELMM. Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho é estudar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM) para diferentes configurações de embocaduras, usando o sistema de modelagem SisBaHiA®.

Como objetivos específicos, pretende-se: identificar os padrões típicos de circulação hidrodinâmica do CELMM, para três situações de embocaduras distintas, através da determinação dos campos de velocidades e elevações, considerando sazonalidades; analisar os tempos hidráulicos característicos, a partir dos conceitos de Tempo de Residência, Idade da Água e Taxa de Renovação, com ênfase nas trocas de massas de água; avaliar a influência do vento, maré e aporte fluvial na renovação das águas da área de estudo; avaliar a influência das diferentes embocaduras na circulação hidrodinâmica e renovação das águas; identificar locais mais vulneráveis a estagnação de águas e problemas ambientais.

Esta dissertação está dividida em oito capítulos distintos, sendo este o capítulo introdutório com a definição dos objetivos do estudo e o oitavo relativo às referências. Os demais capítulos são descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os conceitos fundamentais para o estudo, como as definições de laguna costeira, tempo de residência, idade da água e taxa de renovação, além de mostrar alguns sistemas de modelagem ambiental conhecidos. O capítulo 3 contempla a caracterização físico-ambiental da área de estudo, ou seja, a localização, aspectos climáticos e oceanográficos, geologia e geomorfologia do local, recursos hídricos e problemas ambientais do complexo lagunar. O capítulo 4 descreve o SisBaHiA®, com ênfase para os módulos hidrodinâmico, de transporte lagrangeano e de transporte euleriano. O capítulo 5 contém a metodologia do trabalho, com a apresentação dos domínios de modelagem, discretização da malha de elementos finitos, batimetria, parâmetros de fundo, forçantes, cenários de modelagem e condições iniciais e de contorno, necessários para a implementação do modelo. O capítulo 6 traz os resultados obtidos pelos modelos de circulação hidrodinâmica, transporte euleriano do tempo de residência, e transporte lagrangeano, para a idade da água e taxa de

renovação do CELMM e o capítulo 7 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um referencial teórico, abordando conceitos e definições relevantes para o estudo realizado. Discute-se inicialmente o conceito de laguna costeira e os diferentes tipos de lagunas, de acordo com uma classificação geomorfológica. Após isso, o conceito de embocadura é mencionado, assim como os agentes dinâmicos responsáveis pela estabilidade da embocadura. Também são mostrados os conceitos de tempo de residência, taxa de renovação e idade da água e as principais diferenças entre esses tempos hidráulicos característicos. Por último, são mencionados alguns sistemas de modelagem de circulação hidrodinâmica, de transportes euleriano/lagrangeano e de qualidade de água utilizados em simulações de corpos de água.

2.1. Lagunas costeiras

As lagunas costeiras ocupam cerca de 13% das áreas costeiras e representam corpos de água rasos (profundidades entre um e dez metros), encontrados em todos os continentes, geralmente orientados de forma paralela à costa, e conectados ao oceano através de uma ou mais embocaduras. Sua formação está associada à elevação do nível do mar durante o Holoceno ou Pleistoceno e à construção de barreiras costeiras através de processos marinhos (KJERFVE, 1994; MIRANDA et al., 2002).

Esses sistemas possuem uma variedade de formas e tamanhos, relacionados com a configuração da linha de costa e com as barreiras costeiras, e podem ser modificados pela erosão e deposição de sedimentos, principalmente na região da embocadura (BIRD, 2008).

Como são ambientes costeiros rasos, a circulação das lagunas é altamente influenciada pelas condições climáticas, como a precipitação, o vento, o aporte fluvial e a ação das marés. A resposta hidrodinâmica de cada um desses fatores climáticos depende das características do canal de ligação com o oceano, que regula as trocas de águas entre as lagunas e a região costeira adjacente (GARCÍA-OLIVA et al., 2019; KJERFVE e MAGILL, 1989).

Nessa perspectiva, as lagunas costeiras podem ser classificadas de acordo com a sua geomorfologia em três tipos: sufocadas, restritas ou vazadas (Figura 2.1).

As lagunas sufocadas possuem apenas um canal de ligação com o oceano, com uma razão pequena entre a área da seção transversal do canal e a área da laguna. A influência da maré é geralmente contida na entrada do canal de ligação, sendo assim, este canal estreito funciona como um filtro dinâmico, reduzindo a amplitude das marés em até 99%, em comparação com a região costeira adjacente (KJERFVE, 1986; KJERFVE e MAGILL, 1989).

As lagunas restritas apresentam características intermediárias entre as lagunas sufocadas e as vazadas. São conectadas ao oceano por dois ou mais canais de ligação que permanecem abertos em tempo integral. Por último, as lagunas vazadas são caracterizadas por múltiplos canais de ligação com o oceano e possuem uma alta razão entre a área da seção transversal do canal e a área da laguna. São dominadas pela influência marinha e apresentam elevados níveis de salinidade (KJERFVE, 1986).

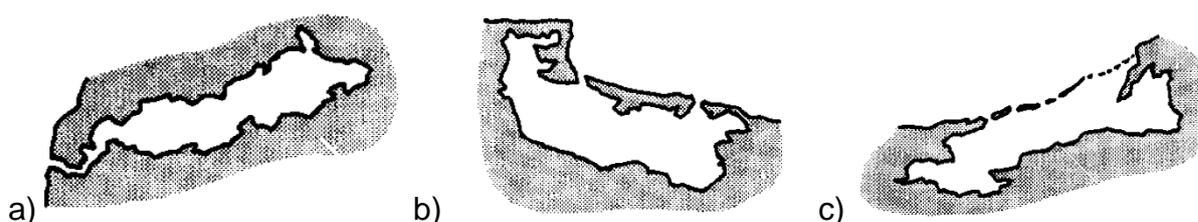


Figura 2.1 - Classificação geomorfológica das lagunas costeiras a) laguna sufocada b) laguna restrita e c) laguna vazada

Fonte: Adaptado de Kjerfve e Magill (1989)

2.2. Embocaduras

As embocaduras são constituídas por canais e bancos de areias que conectam a laguna costeira com o oceano e permitem as trocas de água entre esses dois corpos d'água (SILVA et al., 2020; DAVIDSON-ARNOTT, 2011). Essas embocaduras se formam a partir de cordões litorâneos ou como o resultado de eventos climatológicos extremos, tais como grandes tempestades, que rompem as barreiras costeiras e geram um novo canal de ligação com o oceano (DAVIS JR., 2013).

As intervenções humanas nas embocaduras das lagunas costeiras são frequentes, garantindo a navegação nos canais e evitando problemas de qualidade de água, resultantes da renovação insuficiente das águas. Vários sistemas são mantidos através da dragagem regular das embocaduras, enquanto outros têm

estruturas artificiais que evitam a migração da embocadura ou o seu fechamento (OLIVEIRA et al., 2006).

Uma embocadura é considerada estável quando os fluxos de maré enchente e vazante possuem a capacidade de expelir o excesso de sedimentos depositados em seu leito, mantendo a embocadura desobstruída e com a área da seção transversal variando pouco ao longo dos anos (DEAN e DALRYMPLE, 2004; SILVA e ROSMAN, 2016).

A estabilidade de uma embocadura depende do balanço entre os agentes desestabilizadores, que causam o acúmulo de sedimentos na embocadura, e os agentes estabilizadores, que transportam esses sedimentos para o oceano ou para o interior da laguna, mantendo a embocadura e o canal de ligação desobstruídos. Esse balanço ocorre devido ao transporte litorâneo, ao aporte fluvial, à magnitude das correntes de maré e às características morfológicas do corpo d'água interior (SILVA e ROSMAN, 2016).

2.3. Tempos hidráulicos característicos

As análises dos tempos hidráulicos característicos, como o tempo de residência, idade da água e taxa de renovação, são essenciais para o estudo das trocas de massas de água, para a identificação de áreas propensas à estagnação e para a avaliação do transporte de substâncias dentro dos corpos d'água. Dessa forma, algumas conclusões podem ser realizadas sobre a dispersão de poluentes, o transporte de sedimentos e os processos ecológicos ocorridos dentro de uma laguna usando os tempos hidráulicos característicos (AGUILERA et al., 2020; BRAUNSCHWEIG et al., 2003).

O tempo de residência (TR) representa o parâmetro mais utilizado em estudos de renovação das águas (Abreu et al., 2020; Brito Jr. et al., 2018; Kenov et al., 2012; Rynne et al., 2016; Sun et al., 2014) e pode ser definido como o tempo médio que uma parcela de água permanece em um compartimento até sair deste compartimento (BRYE et al., 2013; ZIMMERMAN, 1988).

Esse parâmetro é usualmente determinado pela razão entre o volume e o fluxo residual de água, esta definição é adequada para corpos de água bem misturados. O modo tradicional de cálculo é amplamente utilizado em projetos de tanques ou reatores para tratamentos de água e de efluentes (ROSMAN, 2020).

Porém, em corpos d'água naturais há uma grande heterogeneidade espacial, o que torna inviável a utilização do conceito tradicional para o cálculo do tempo de residência. Para esses compartimentos heterogêneos e através da modelagem computacional, é possível definir uma função tempo de residência variável no espaço, com diferentes condições hidrológicas e meteorológicas (ROSMAN, 2020). O SisBaHiA[®] calcula o tempo de residência com o modelo de transporte lagrangeano.

Em corpos d'água heterogêneos, a abordagem com o modelo de transporte euleriano torna-se mais adequada, pois permite a análise de parcelas de água em diferentes locais ao longo do tempo (AGUILERA et al., 2020). Nesse sentido, a taxa de renovação e a idade da água permitem estimativas detalhadas em cada região do domínio e podem inferir se localmente os processos cinéticos de eutrofização são relevantes, ou não, para a qualidade das águas no local (ROSMAN, 2020).

A idade da água é tradicionalmente definida como o tempo decorrido desde a entrada de uma parcela de água no domínio (ZIMMERMAN, 1988). Nessa definição, a idade da água pode ser vista como o complemento do tempo de residência, já que a idade da água é o tempo necessário para que a parcela de água saia do domínio de modelagem; e o tempo de residência é o tempo que uma parcela de água permanece no corpo d'água antes de sair do sistema (MONSEN et al., 2002).

É possível calcular o parâmetro idade da água por diferentes metodologias (Brye et al., 2013; Chevalier et al., 2017; Li e Shen, 2014; Viero e Defina, 2016). Rosman (2020) calcula a idade da água como o tempo de decaimento de uma substância passiva e marcadora de idade presente na água, a partir do modelo de transporte euleriano. Essa metodologia é utilizada pelo SisBaHiA[®] e adotada no presente trabalho

A taxa de renovação representa a taxa de troca de água dentro de um volume de controle e informa o percentual de água renovado (DALAZEN, 2017). Os parâmetros idade da água e taxa de renovação são complementares, ou seja, quanto maior é a idade da água, menor será a taxa de renovação. O cálculo desses parâmetros depende do objetivo de estudo definido. Ou seja, para analisar a renovação das águas, deve-se calcular a taxa de renovação da água em diferentes pontos do domínio; e para verificar quanto tempo a água permanece em diferentes setores do domínio de interesse, deve-se computar o parâmetro idade da água (ROSMAN, 2020).

De maneira geral, corpos d'água com maiores taxas de renovação e tempos de residência e idades das águas menores são menos suscetíveis à problemas de qualidade de água, visto que os poluentes saem do sistema rapidamente, reduzindo a probabilidade de os contaminantes permanecerem no sistema e se depositarem nos sedimentos (KENOV et al., 2012).

2.4. Estudos anteriores

Neste item são destacados alguns estudos que abordam a modelagem computacional na região do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba e estudos relacionados com a renovação das águas e com as alterações morfológicas ocorridas em embocaduras de corpos d'água naturais.

Souza (2017) avaliou as modificações na hidrodinâmica e no tempo de residência do CELMM, com o modelo IPH-ECO bidimensional, comparando os levantamentos batimétricos realizados em 1985 e 2012 para o período seco. Os resultados revelaram que, em 27 anos, a laguna Mundaú perdeu 31 cm de profundidade média, com uma taxa de 1,15 cm/ano, e a laguna Manguaba perdeu 43 cm de profundidade, a uma taxa de 1,59 cm/ano. Com relação ao tempo de residência, ocorreu uma melhora do fluxo na margem oeste da laguna Mundaú e uma piora na região central, com tempo de residência maior que o tempo da simulação (27 dias). Na laguna Manguaba, houve uma melhora significativa no fluxo da porção sul, associada à nova abertura do canal que conecta a laguna Manguaba com o oceano.

Lima (2017) calculou o tempo de residência do CELMM com o auxílio do modelo computacional Mike 21. Os resultados mostraram que o CELMM é fortemente influenciado pela descarga fluvial, onde as altas vazões da série histórica de 1978 a 2016 ocasionaram o tempo de residência de 14 dias para a laguna Mundaú e 30 dias para a laguna Manguaba. As áreas próximas às margens, a porção leste da laguna Mundaú e toda a extensão da laguna Manguaba foram identificadas como regiões suscetíveis à problemas de qualidade de água.

Brito Júnior et al. (2018) estudaram diferentes abordagens para os tempos de residência durante o cenário de estiagem da laguna Mundaú. Também foi avaliada a influência da maré e do vento nas trocas de água. Os tempos de residência foram calculados pelo método integrado e através da distribuição espacial. Nesse estudo

foi utilizado o modelo hidrodinâmico IPH-TRIM3DPCLake com o módulo Euleriano-Lagrangeano com esquema de elementos finitos. O tempo de residência estimado pelo método integrado simples foi de 12,6 dias para a maré de quadratura e 5,7 dias para a maré de sizígia. O tempo de residência através da distribuição espacial revelou três zonas específicas: tempos de 6h até 15 dias na porção sul da laguna; valores de 20 a 40 dias nas regiões norte e oeste; e tempos acima de 65 dias (instante final da simulação) nas porções central e leste. O estudo concluiu que os ventos redistribuíram espacialmente as trocas de águas e que as partículas possuíam tempos de residência mais baixos quando liberadas durante as marés vazantes na sizígia.

Cunha et al. (2021) verificaram como as variações do aporte fluvial e do vento influenciam a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas no CELMM, a partir dos modelos hidrodinâmico e de transporte lagrangeano do SisBaHiA[®]. Foram realizadas duas simulações da circulação hidrodinâmica: a primeira com valores médios de vazão e de vento e a segunda com dados de vazão e de vento observados em 2014. Os resultados hidrodinâmicos de amplitude máxima de maré indicaram poucas diferenças entre as duas simulações no interior das lagunas. O tempo de residência também foi calculado para as duas simulações, com o período de 365 dias. Nas lagunas, foi possível definir três compartimentos distintos: a porção norte, com tempos de residência entre 60 e 365 dias; uma região intermediária, com valores entre 20 e 60 dias; e a região sul, próxima à embocadura, com tempos de residência inferiores a 20 dias. Os tempos de residência eram semelhantes para os dois períodos, com valores ligeiramente superiores na segunda simulação, na região próxima à foz dos rios.

Sant'Ana (2019) calculou o tempo de residência e o escoamento residual para o CELMM a partir dos modelos de circulação hidrodinâmica e de transporte lagrangeano do SisBaHiA[®], considerando os períodos seco e chuvoso. Verificou-se que as velocidades residuais são extremamente baixas nas lagunas Mundaú e Manguaba, tanto na sizígia como na quadratura. Percebeu-se também a formação de regiões de recirculação (vórtices) na região leste da laguna Mundaú e ao norte da laguna Manguaba, coerentes com os resultados encontrados para o tempo de residência, onde as regiões de recirculação tinham os maiores tempos de residência.

Dias et al. (2009) estudaram o impacto da realocação da embocadura de Ancão na circulação hidrodinâmica e no tempo de residência da laguna Ria Formosa, utilizando os modelos hidrodinâmico e de transporte lagrangeano ELCIRC e VELA. A realocação da embocadura causou um aumento na magnitude das correntes de maré, nas velocidades residuais e no prisma de maré, indicando uma melhor estabilidade na embocadura de Ancão. A simulação do tempo de residência indicou uma melhora na renovação das águas na porção oeste da laguna, diminuindo a sua vulnerabilidade à poluição.

Gava (2008) verificou os efeitos na dinâmica do sistema lagunar de Araruama, localizada no Rio de Janeiro, por meio da abertura de um novo canal na porção oeste da laguna. Para a verificação desses efeitos, foi realizada uma comparação entre a situação atual, com apenas um canal de ligação, e a situação projetada, com a adição do novo canal de ligação no extremo oeste da laguna. O modelo computacional SisBaHiA[®] foi utilizado para a simulação da circulação hidrodinâmica, das trocas de massas de água com o modelo de transporte lagrangeano e da diluição das águas com o modelo de transporte euleriano. Os resultados indicaram que a abertura do novo canal na porção oeste da laguna causou uma melhoria nas trocas de massas de água e na diluição das águas, principalmente na região oeste da laguna Araruama.

Oliveira et al. (2006) investigaram o efeito das mudanças morfológicas na circulação hidrodinâmica e na renovação das águas da laguna Óbidos, localizada na região oeste de Portugal. Para isso, foram realizadas simulações hidrodinâmicas e do tempo de residência para três configurações batimétricas distintas: a primeira, representativa da situação anterior realizada no ano de 2000, a segunda em 2001, após a dragagem do canal de ligação, e a terceira configuração realizada em 2002, com a migração da embocadura para uma posição mais central. Os resultados mostram que o prisma de maré aumentou de maneira significativa nas situações decorrentes da dragagem e da migração da embocadura. Com relação ao tempo de residência, verificou-se que a dragagem dos canais e o reposicionamento da embocadura para uma posição central melhoraram a renovação das águas da laguna.

Panda et al. (2013) analisaram as mudanças geomorfológicas ocorridas na laguna Chilika, localizada na costa leste da Índia, com base no histórico da embocadura, na análise de satélites e na modelagem computacional. O modelo

MIKE 21 foi utilizado para simular a circulação hidrodinâmica e a distribuição de salinidade na laguna para dois cenários distintos: um considerando o domínio com apenas uma embocadura, e o segundo, com duas embocaduras. O estudo concluiu que o número de embocaduras determina a quantidade de água trocada com o oceano, o transporte de sedimentos em suspensão e a distribuição de salinidade.

2.5. Sistemas de modelagem ambiental

Os modelos computacionais são ferramentas integradoras e fornecem uma visão dinâmica dos fenômenos em sistemas ambientais complexos como rios, lagos e reservatórios, estuários, baías e zona costeira. Podem ser usados para a previsão do escoamento ou movimento das águas, da qualidade das águas ou do transporte de grandezas escalares (ROSMAN, 2020).

Modelos também podem ser mecanismos úteis na gestão de recursos hídricos, uma vez que podem ajudar a fazer previsões e alcançar sínteses significativas sobre os vários mecanismos e processos envolvidos nos corpos de água. No contexto do gerenciamento ambiental, os modelos podem auxiliar, por exemplo, na elaboração de planos de ações e medidas necessárias para obter ou manter o bom estado químico e ecológico em corpos de água; na definição de limites críticos para a concentração de nutrientes; na análise dos impactos antrópicos em corpos de água e na sugestão de áreas ideais para o monitoramento ambiental (SALORANTA, 2003).

Diversos sistemas computacionais podem ser utilizados em estudos de corpos de água e a escolha do modelo mais adequado para o objetivo da pesquisa depende de uma série de fatores, como a interface gráfica do sistema, os custos envolvidos (aquisição do modelo, aquisição de dados e requisitos dos equipamentos), os parâmetros de entrada do modelo, os requisitos de calibração, o suporte técnico, o material de suporte para o usuário, as aplicações anteriores do modelo e aceitação na comunidade científica (número de publicações), a experiência do modelador, entre outros (ENGEL et al., 2007; MATEUS et al., 2018). A seguir são descritos, sucintamente, os sistemas Delft3D, IPH-ECO, MIKE, MOHID e SisBaHiA®.

O instituto de pesquisa holandês Deltares desenvolveu o modelo computacional Delft3D, totalmente integrado para uma abordagem 3D e capaz de

simular a hidrodinâmica, morfologia, ondas, transporte de sedimentos e qualidade da água de ambientes costeiros, fluviais e estuarinos. Os módulos de fluxo (FLOW), morfologia (MOR) e onda (WAVE) estão disponíveis em código aberto desde janeiro de 2011. As condições hidrodinâmicas (velocidades, elevações, densidade, salinidade, viscosidade vertical e difusividade vertical) calculadas no módulo de fluxo são usadas como parâmetros de entrada dos outros módulos do Delft3D. O Delft3D-FLOW resolve as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível e a discretização é baseada em diferenças finitas (DELTARES, 2020).

O IPH-ECO é um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água tridimensional para ecossistemas aquáticos, desenvolvido no Centro de Tecnologia (CTEC/UFAL) e no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). O sistema possui dois módulos: hidrodinâmico detalhado, descrevendo os fluxos quantitativos e nível de água; e o módulo de qualidade de água, que trata dos mecanismos de transporte de nutrientes e todas as interações de organismos aquáticos da cadeia alimentar. As equações diferenciais são resolvidas a partir do método semi-implícito de diferenças finitas em malha estruturada ou não estruturada (IPH-ECO, 2020).

Os modelos MIKE foram desenvolvidos pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute Water & Environment*) para diversas aplicações, como os oceanos, áreas costeiras, rios e reservatórios, águas subterrâneas, sistemas de distribuição de água, entre outras. Os produtos mais utilizados para os ambientes costeiros são MIKE 21 para modelagens em duas dimensões, e MIKE 3 para modelagens em três dimensões. Os sistemas utilizam malhas não estruturadas no plano horizontal, que fornecem uma flexibilidade na representação de geometrias complexas e permitem representações suaves nas fronteiras. A discretização espacial das equações governantes é realizada através do método de volumes finitos (DHI, 2017).

MOHID é um sistema de modelagem de água 3D, desenvolvido pelo MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) do Instituto Superior Técnico (IST), que pertence à Universidade de Lisboa, em Portugal. O sistema permite uma modelagem integrada, tanto de processos (físicos e biogeoquímicos), como de diferentes escalas e sistemas (estuários e bacias hidrográficas). A discretização espacial é feita pelo método de volumes finitos e a utilização conjunta dos módulos (MOHID Water, MOHID Land e MOHID Soil) permite o estudo do ciclo de água de uma forma integrada. O programa MOHID Water

proporciona a simulação da circulação hidrodinâmica, qualidade de água e transporte de sedimentos de corpos de águas superficiais (MOHID, 2020).

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA[®]) é um sistema de modelos computacionais registrado pela fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). A versão atual do SisBaHiA[®] contém os seguintes modelos computacionais: modelo hidrodinâmico; modelo de qualidade de água e eutrofização; modelo de transporte de sedimentos coesivos e não-coesivos e evolução morfológica do fundo; modelo de transporte euleriano; modelo de transporte lagrangeano; modelo de campo próximo para emissários e fontes pontuais; modelo de geração de ondas; modelo de propagação de ondas e módulo de análise e previsão de marés. O SisBaHiA[®] permite simulações em duas e três dimensões e a discretização espacial e temporal é realizada a partir de elementos finitos e diferenças finitas, respectivamente (ROSMAN, 2020).

O SisBaHiA[®] foi escolhido devido à interface de fácil manuseio e à grande variedade de módulos disponíveis, além de ser um sistema brasileiro gratuito. O SisBaHiA[®] tem sido utilizado em diversos estudos, projetos e pesquisas acadêmicas e científicas, com comprovada eficiência, podendo-se destacar os trabalhos de Abreu et al. (2020), Pereira et al. (2015), Rollnic e Medeiros (2013), Roversi et al. (2016a) e Roversi et al. (2016b), entre outros. Maiores informações podem ser obtidas em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/> na seção Pesquisas-Teses.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente capítulo contém a caracterização da área de estudo, isto é, a localização, recursos hídricos, clima, geomorfologia e uso do solo. Também apresenta um histórico das alterações morfológicas ocorridas na embocadura.

3.1. Localização e descrição da área de estudo

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM) está situado entre as latitudes 9°35' e 9°45' Sul e entre as longitudes 35°44' e 35°58' Oeste, no litoral do Estado de Alagoas, compreendendo os seguintes municípios: Santa Luzia do Norte, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Pilar e Maceió (Figura 3.1). É composto pelas lagunas Mundaú e Manguaba, conectadas por canais revestidos por manguezais, que terminam em uma única entrada oceânica que muda de posição dinamicamente (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

A região é caracterizada como estuarino-lagunar, pois constitui uma estrutura geológica com três subsistemas: o subsistema flúvio-lagunar e suas interações rio-laguna; a laguna central; e o subsistema de canais e suas interações estuário-mar (ANA, 2006).

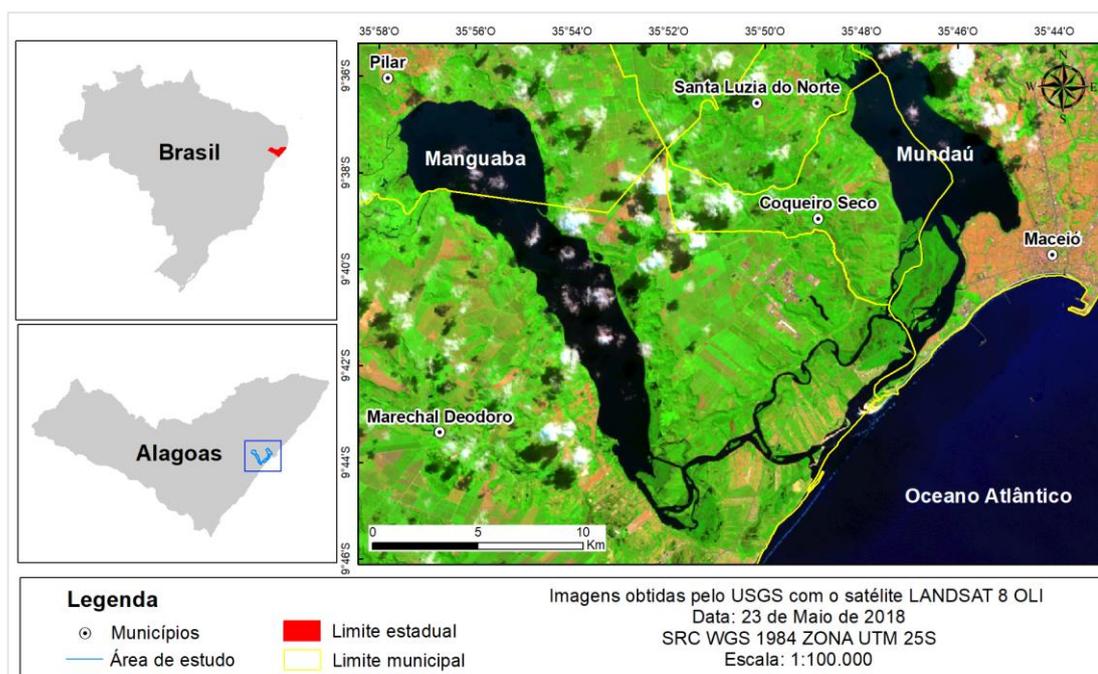


Figura 3.1 - Mapa de localização do CELMM, baseado em dados do IBGE (2019) e imagens do satélite LANDSAT 8 OLI (USGS, 2018) com composição RGB 751
 Fonte: Adaptado de Cunha et al. (2021)

3.2. Recursos hídricos

A laguna Mundaú possui uma área de 27 km², com profundidade média de 1,7 metros, e sua principal fonte fluvial é o rio Mundaú, com extensão de 141 km e descarga média anual de 33,5 m³/s (ANA, 2006; COSTA et al., 2010; FRAGOSO JR. et al., 2010). Já a laguna Manguaba tem cerca de 42 km², profundidade média de 2,1 metros e os seus principais contribuintes são os rios Paraíba do Meio (172 km) e Sumaúma, com descargas médias anuais de 17,6 e 5 m³/s, respectivamente (COSTA et al., 2010; SANTOS JR., 2016).

As lagunas foram formadas a partir do barramento da foz dos rios Mundaú e Paraíba do Meio, por deposição dos sedimentos marinhos e afogamento de seus leitos. As bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio abrangem uma área de drenagem de 4.156 km² e 3.158 km², respectivamente, e têm suas nascentes no Estado de Pernambuco e porção média e baixa no Estado de Alagoas, onde deságuam nas lagunas Mundaú e Manguaba. Além disso, percorrem um total de 50 municípios, sendo 30 na bacia hidrográfica do rio Mundaú e 20 municípios na bacia de Paraíba do Meio (OLIVEIRA et al., 2014; SOUZA et al., 2004). Na Figura 3.2, podem ser visualizadas as bacias hidrográficas da região, bem como os principais rios contribuintes.

As marés da região se enquadram no regime de micro a mesomaré semidiurna (ARAÚJO et al., 2006). No interior das lagunas, a influência das marés é bastante reduzida, indicando que o sistema de canais funciona de forma eficiente na atenuação da amplitude das marés. O amortecimento chega a 88% na laguna Mundaú e 98% na laguna Manguaba, em comparação com a amplitude do porto de Maceió (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

O CELMM também pode ser classificado como um sistema lagunar do tipo sufocado, apresentando características como trocas restritas das suas águas e longos tempos de residências (KJERFVE, 1986; OLIVEIRA; KJERFVE, 1993).

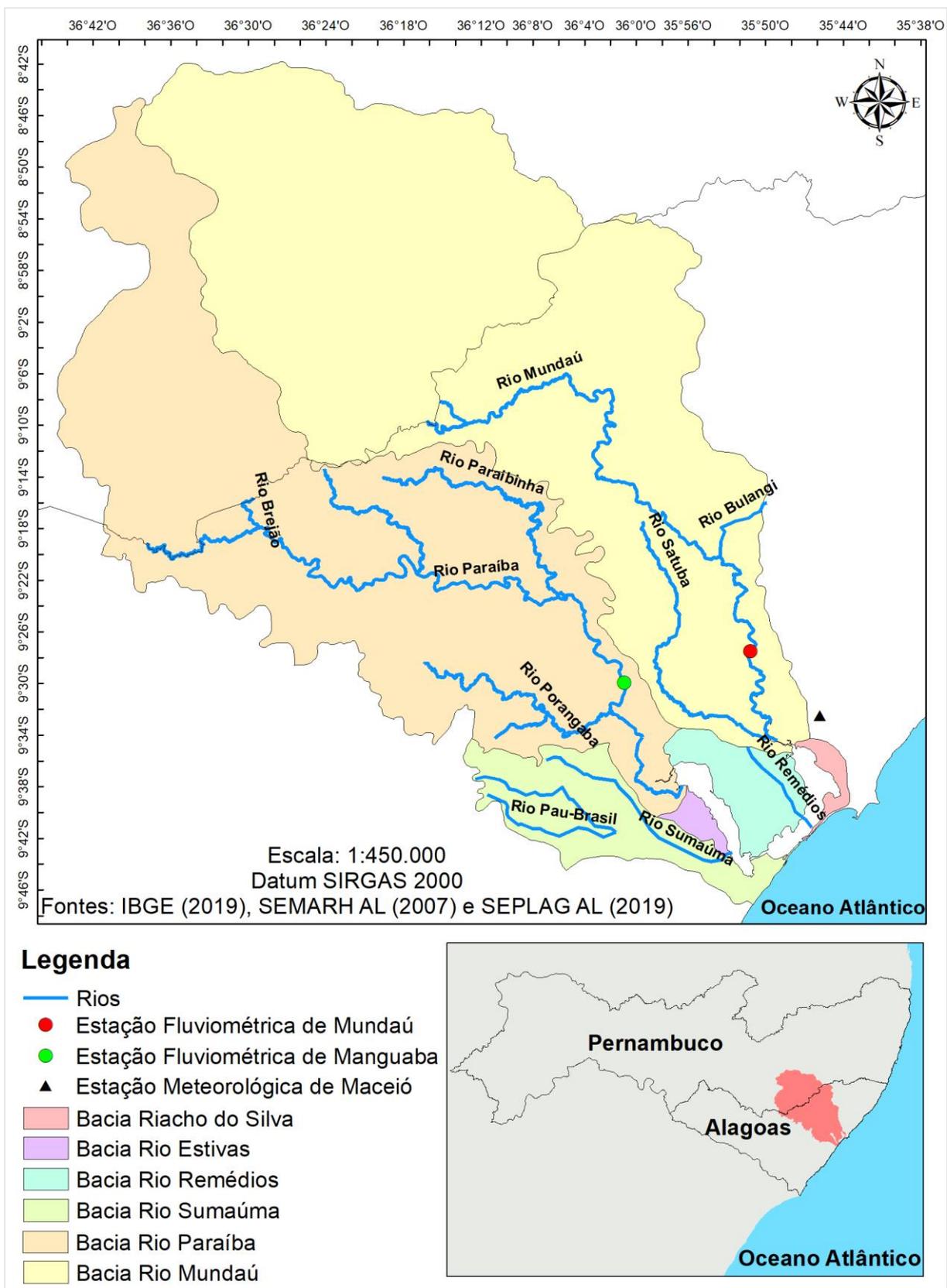


Figura 3.2 - Mapa com as bacias hidrográficas do CELMM, baseado nos dados do IBGE (2019), do SEMARH AL (2007) e do SEPLAG AL (2019)

3.3. Clima

A região tem como principais características climáticas as irregularidades da precipitação e a pouca variação sazonal da radiação solar e da temperatura do ar. Com relação à precipitação, os mecanismos dinâmicos que produzem as chuvas podem ser classificados em mecanismos de grande, meso e de micro escalas. A maior parte da precipitação observada em Alagoas está relacionada com as configurações da circulação atmosférica e oceânica em grande escala, dentre os quais destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Sistemas Frontais (SF). As perturbações ondulatórias dos ventos Alísios, complexos convectivos e brisas marinha e terrestre fazem parte da mesoescala e as circulações orográficas e pequenas células convectivas estão na microescala (BARROS et al., 2012; MOLION; BERNARDO, 2002).

Além disso, a região também está submetida à influência de sistemas meteorológicos, que organizam a convecção em escala sinótica, tais como os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), que provocam a precipitação durante os meses de setembro a abril (BARROS et al, 2012). Germano (2016) constatou que os casos de VCAN estudados entre os anos de 2011 a 2015 foram responsáveis por 60% de todos os eventos de precipitação extrema ocorridos em Maceió.

A partir da normal climatológica de Maceió (Figura 3.3), verifica-se que o regime de precipitação anual pode ser dividido em duas estações, uma estação seca entre setembro e março, e uma estação chuvosa de abril até agosto, concentrando 70% da precipitação total anual. A precipitação média anual fica em torno de 1800 mm, com a evaporação média anual de 1070 mm e temperatura média do ar variando entre 24 até 26,5 °C. A normal climatológica foi elaborada a partir dos dados do INMET (2020), para a estação meteorológica de Maceió. A localização dessa estação pode ser visualizada na Figura 3.2.

No sistema de classificação de Köppen, os tipos climáticos são simbolizados por dois ou três caracteres, onde o primeiro indica a zona climática e é definido pela temperatura e pela precipitação, o segundo considera a distribuição das chuvas e o terceiro representa a variação de temperatura. Segundo essa classificação, o estado de Alagoas é dividido em cinco tipos climáticos. Na zona leste, onde está inserido o CELMM, é observado o clima As (clima tropical com verão seco) (ALVARES et al., 2013).

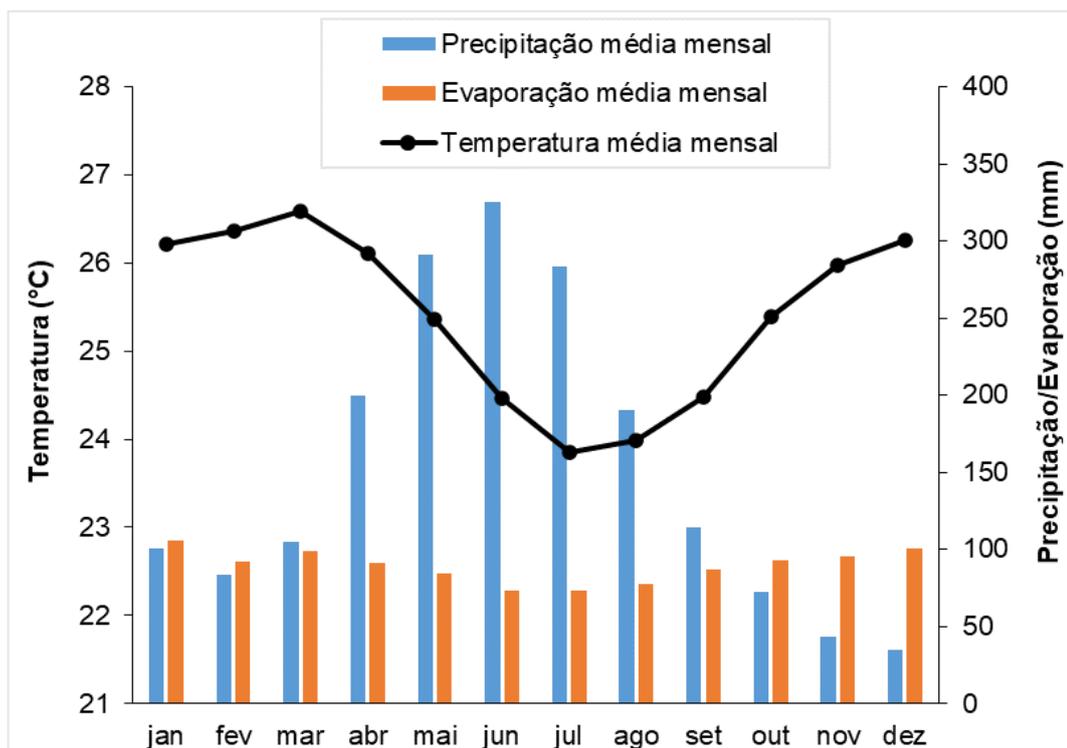


Figura 3.3 - Normal climatológica de 1994 – 2019 para Maceió/AL, elaborada a partir dos dados mensais do INMET (2020)

Com relação aos ventos, os valores médios diários entre 2003 e 2019 mostram que, no período seco, o vento é de leste (41% do tempo) com uma velocidade média de 2,85 m/s e máxima de 5,68 m/s. Na estação chuvosa, o vento sopra com maior frequência na direção sudeste, 21% do tempo, com velocidade média de 2,25 m/s e máxima de 4,63 m/s (CUNHA et al., 2021).

3.4. Geologia e geomorfologia

A região de interesse está inserida nos Depósitos Quaternários, Grupo Barreiras e Bacia de Sergipe-Alagoas. O Grupo Barreiras tem idade terció-quaternária, se distribui nos topos dos tabuleiros ao longo de todo o litoral. Os depósitos quaternários são caracterizados pela ocorrência de depósitos aluvionares recentes, depósitos de pântanos e manguezais, depósitos litorâneos, dunas fixas e móveis e depósitos flúvio-lagunares (VILLANUEVA, 2016).

No que se refere aos domínios geomorfológicos, o CELMM está localizado nos Tabuleiros Costeiros e Planície Costeira de Alagoas. As planícies costeiras são formadas pelas praias arenosas, terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos e

os recifes de arenito de praia. Neste domínio, predominam solos com reduzida fertilidade e capacidade de retenção de umidade (FERREIRA et al, 2016).

Já os Tabuleiros Costeiros representam formas de relevo tabulares desenvolvidos em rochas sedimentares de idade Terciária do Grupo Barreiras, em geral, dissecadas por uma rede de canais com baixa a alta densidade de drenagem. Nas lagunas há o predomínio dos tabuleiros conservados, que se caracterizam por vastos topos planos e com formação de solos espessos e bem drenados, com baixa suscetibilidade à erosão. Estes solos são propícios para a expansão da monocultura canvieira, que prevalece neste domínio (FERREIRA et al, 2016).

O estudo sedimentológico realizado por Ribeiro et al (2011), apontou um predomínio de silte e argila por quase todo o corpo lagunar. Os sedimentos das lagunas são enriquecidos em matéria orgânica, ao contrário dos canais, que apresentam sedimentos arenosos e empobrecidos em matéria orgânica. As principais fontes de sedimentos finos (silte e argila) do CELMM correspondem aos rios Mundaú e Paraíba do Meio; e a região costeira contribui para o transporte de areia e cascalho (LIMA, 2017).

3.5. Uso do solo e problemas ambientais

Os impactos ambientais nos leitos e margens das lagunas estão diretamente relacionados às tipologias de uso e ocupação do solo no seu entorno (ANDRADE et al. 2016). Guimarães Júnior et al. (2017) mapearam o uso da terra e cobertura vegetal no CELMM a partir das imagens do satélite SPOT (Figura 3.4) e identificaram a predominância das categorias antrópicas, com 56,87%, sobre as categorias naturais, com 43,13%.

Nos ambientes naturais estão incluídos a rede de drenagem e praias. Considerando somente a cobertura vegetal, as categorias naturais somam apenas 26,15% do CELMM, com o domínio das florestas ombrófilas, formações pioneiras flúvio-marinhas (mangues) e formações flúvio-lacustres (várzeas) (GUIMARÃES JR. et al., 2017).

Com relação aos ambientes antrópicos, verifica-se que a margem leste da laguna Mundaú é ocupada pela área urbana da cidade de Maceió (932.748 habitantes), e a margem oeste é dominada por plantações de coco-da-baía, possuindo duas áreas urbanas, uma na cidade de Santa Luzia do Norte (6.891

habitantes) e outra em Coqueiro Seco (5.526 habitantes). Além disso, a cultura da cana-de-açúcar abrange a região dos tabuleiros costeiros nas margens norte e oeste da laguna Mundaú. Na laguna Manguaba, tanto a margem leste como a oeste são dominadas pela cana-de-açúcar e pelas plantações de coco-da-baía. As áreas urbanas de Pilar (33.305 habitantes) e Marechal Deodoro (45.977 habitantes) estão localizadas nas regiões norte e sul da laguna, respectivamente (ANDRADE et al., 2016; IBGE, 2010; LINS et al., 2018).

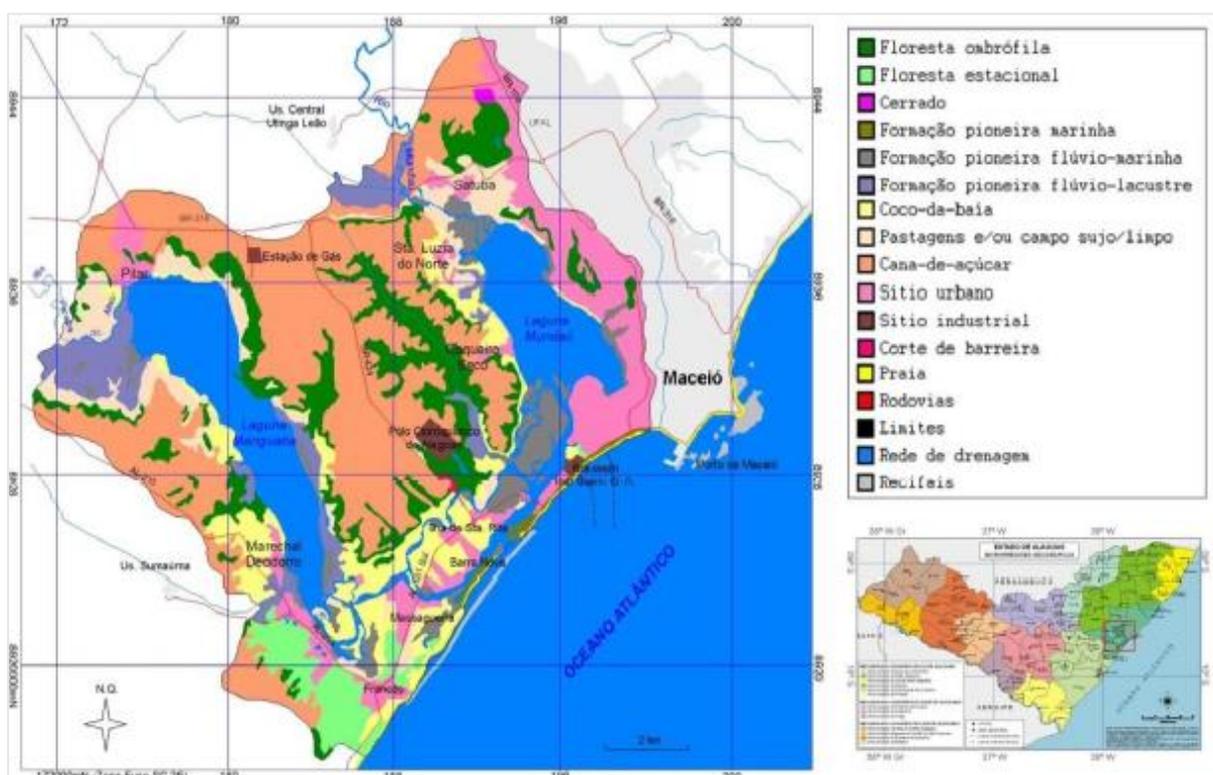


Figura 3.4 - Uso da terra e cobertura vegetal do CELMM em 2009

Fonte: Guimarães Júnior et al. (2017)

Entre os impactos do uso da terra, destacam-se a cana-de-açúcar, os sítios urbanos e os sítios industriais (Pólo Cloroquímico de Alagoas, BRASKEM e Unidade de Processamento de Gás Natural de Alagoas) (GUIMARÃES JR. et al., 2017). Cotovicz Júnior et al. (2012) apontaram os despejos de efluentes, tanto das indústrias da cana-de-açúcar ao longo dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, como dos esgotos domésticos não tratados, provenientes das cidades localizadas ao longo das bacias de drenagem de ambas as lagoas, como as maiores fontes de poluição do CELMM.

ANA (2006) identificou as seguintes causas para o acelerado processo de degradação ambiental do CELMM e das bacias contribuintes: lançamentos de efluentes domésticos e industriais não tratados; exploração indiscriminada dos recursos hídricos; práticas agrícolas inadequadas; disposição inadequada dos resíduos sólidos; desmatamento e urbanização não consolidada; práticas inadequadas de pesca; aterros e ocupação em áreas de risco; práticas ambientais degradantes; e implementação ineficaz dos projetos e desperdício de recursos públicos.

Como consequência desses impactos antrópicos, vários problemas ambientais foram identificados. Dentre os problemas constatados, tem-se: redução da produção de pescado, com o desaparecimento de algumas espécies de peixes; assoreamento da embocadura das lagunas, alterando a circulação do complexo; processos de eutrofização das lagunas devido ao carreamento de grandes quantidades de nutrientes; contaminação por coliformes e organismos patogênicos; e contaminação por diversos resíduos químicos (fertilizantes, metais pesados, pesticidas e material orgânico da lavagem da cana-de-açúcar) (ANDRADE et al., 2016; SILVA; SOUSA, 2008; SOUZA et al., 2004).

Alguns trabalhos desenvolvidos evidenciam a degradação ambiental do complexo. O diagnóstico do estudo de Cotovicz Júnior et al (2012), por exemplo, revelou uma eutrofização moderada (estado mesotrófico) na laguna Mundaú e alta (estado eutrófico) na laguna Manguaba, através da aplicação de dois modelos de estado trófico: ASSETS e TRIX.

Melo-Magalhães et al (2009) realizaram coletas de material fitoplanctônico em ambas as lagunas e encontraram que a maioria das espécies eram provenientes dos rios (51%), em seguida estavam as espécies de origem marinha (47%) e, por último, 2% das espécies eram de origem estuarina. No geral, as lagunas apresentaram a predominância das espécies diatomáceas nas regiões com altos níveis de salinidade, e espécies cianofíceas nas áreas com baixa salinidade. Esses grupos de microalgas detectados foram responsáveis por florações de algas nos períodos seco (setembro e novembro de 2002) e chuvoso (maio e julho de 2002), provocando um desequilíbrio ecológico na região.

Lima (2012) quantificou e avaliou a composição mineral e parâmetros físico-químicos das amostras de água e dos moluscos (sururu, maçunim e taioba) na laguna Mundaú, comparando com os valores máximos permitidos por algumas

resoluções, como a resolução CONAMA 357 para águas salobras, o Decreto nº 55.871 da ANVISA e o Regulamento CE nº 1881/2006. Os resultados mostraram altas concentrações de elementos nocivos à saúde e ao meio ambiente. Nas amostras de água foram encontradas concentrações de fósforo, nitrato, alumínio e chumbo acima dos limites permitidos. Já as amostras de moluscos indicaram concentrações elevadas de arsênio, cobre, chumbo, cálcio e níquel.

3.6. Alterações morfológicas na embocadura

No complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba, Luz et al (2021b) estudaram as alterações morfológicas ocorridas na embocadura, a partir de técnicas de geoprocessamento, para quantificar as taxas de erosão e deposição da região. Foram utilizadas imagens de satélites adquiridas entre 1986 e 2018 e os resultados mostraram uma alta variabilidade na região em torno da embocadura do CELMM, com predomínio da deposição de sedimentos e com a dinâmica migratória ocorrendo no sentido sudoeste-nordeste.

A Figura 3.5 evidencia as alterações morfológicas ocorridas na embocadura do CELMM no período de 1986 até 2017, com a constante abertura e fechamento de seus canais. Os critérios para a seleção das imagens foram a cobertura de nuvens e a disponibilidade das imagens no órgão *United States Geological Survey* (USGS, 2018). Com isso, foram selecionadas 8 cenas entre o período mencionado. As imagens possuem resolução espacial de 30 m, obtidas na órbita/ponto 214/67. As bandas espectrais foram combinadas em sistemas de cores RGB e as composições utilizadas estão presentes na Tabela 3.1.

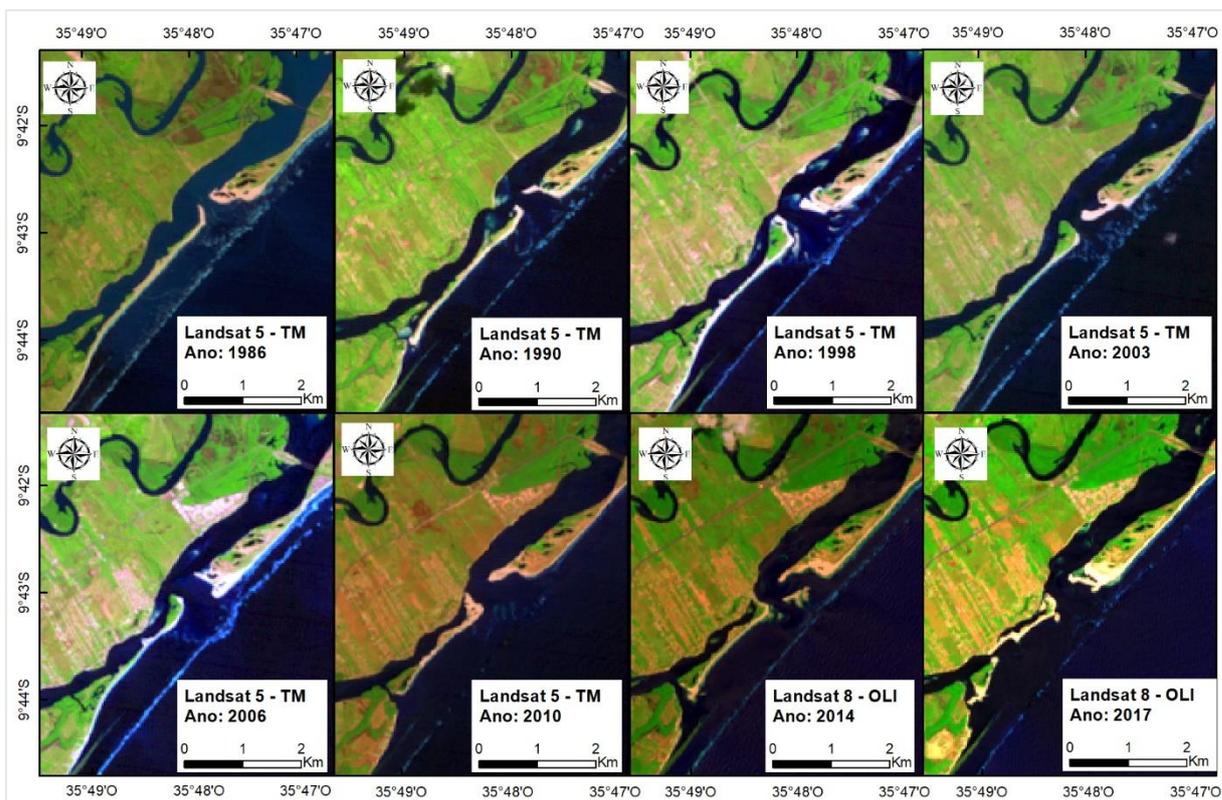


Figura 3.5 - Alterações morfológicas na embocadura do CELMM a partir de imagens orbitais do satélite Landsat para o período de 1986 até 2017. Datum WGS 1984 Zona UTM 25S
Fonte: Adaptado de Luz et al (2021b); USGS (2018)

Tabela 3.1 - Composição RGB das imagens de satélites utilizadas, com as datas e horários adquiridos

Satélite	Sensor	Data da imagem	Horário (Brasília)	RGB
Landsat 5	TM	16/06/1986	08:53	543
Landsat 5	TM	11/06/1990	08:50	543
Landsat 5	TM	21/09/1998	09:08	543
Landsat 5	TM	03/09/2003	09:07	543
Landsat 5	TM	26/08/2006	09:23	543
Landsat 5	TM	11/12/2010	09:19	542
Landsat 8	OLI	06/12/2014	09:30	751
Landsat 8	OLI	14/12/2017	09:30	751

Fonte: Adaptado de Luz et al (2021b)

De acordo com Oliveira e Kjerfve (1993), a embocadura fechou completamente nos anos de 1910, 1930 e 1939. Lima (1998, apud NUNES et al, 2020, p.4) menciona que o responsável por esses eventos foi o transporte eólico de grandes campos de dunas à nordeste da embocadura. No entanto, essas dunas foram reduzidas significativamente, e os eventos de fechamento não foram mais observados (NUNES et al., 2020).

Em 1986, o CELMM possuía uma saída para o mar. Entre o período de 1986 até 1990, houve erosão na porção sudoeste da embocadura, dando origem à abertura de um canal de acesso à laguna Manguaba. As cheias ocorridas nas bacias dos rios Paraíba do Meio e Mundaú em maio de 1988 e julho de 1989 podem ter ocasionado essa nova abertura no sistema (FRAGOSO JR. et al., 2010).

Entre 1990 e 1998, ocorreu uma deposição de sedimentos na mesma região (sudoeste da embocadura), com o consequente fechamento do canal de ligação da laguna Manguaba com o oceano. Novamente entre 2006 e 2010, verificou-se uma acentuada erosão na região sudoeste, com a abertura do canal que conecta a laguna Manguaba com o oceano, e uma deposição de sedimentos na porção nordeste, no canal de acesso à laguna Mundaú. A possível explicação para essa casualidade foi o evento de cheia nas bacias dos rios contribuintes da região, em junho de 2010 (OLIVEIRA et al., 2014).

Esse novo canal que liga a laguna Manguaba ao oceano não foi fechado nos anos seguintes. Segundo Larsson e Nilsson (2014), para diminuir os efeitos de enchentes na região, um canal de ligação foi construído entre a laguna Manguaba e o mar no ano de 2011. Entre 2010 e 2014, observou-se a deposição de sedimentos na região do canal de ligação da laguna Mundaú, com a formação de uma ilha-barreira nessa porção. Entre os anos de 2014 e 2017, verificou-se uma erosão intensa no canal de acesso à laguna Manguaba, com a formação de uma ilha-barreira na região da embocadura, devido às descargas extremas dos rios afluentes às lagunas, durante a estação chuvosa de 2017 (NUNES et al., 2020).

As imagens também mostram os recifes de arenitos paralelos à costa (região de quebra das ondas na Figura 3.5). Os recifes estão localizados a uma distância de aproximadamente 300 m da costa do CELMM e constituem barreiras naturais que reduzem a energia das ondas que chegam ao complexo (NUNES et al., 2020).

4. MODELAGEM COMPUTACIONAL¹

Neste capítulo são apresentadas as descrições dos modelos de circulação hidrodinâmica, de transporte lagrangeano e de transporte euleriano do SisBaHiA®, utilizados na pesquisa.

4.1. Modelo hidrodinâmico

O SisBaHiA® possui modelos que adotam o sistema FIST (*filtered in space and time*), que representa um método de modelagem da turbulência baseado em técnicas de filtragem. Deste modo, a modelagem da turbulência segue procedimentos semelhantes às empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (*LES – Large Eddy Simulation*). O FIST resolve as equações completas de Navier-Stokes, considerando a aproximação de pressão hidrostática.

O modelo hidrodinâmico FIST3D utiliza uma técnica numérica em dois módulos, calculando os valores da elevação da superfície livre através de um modelo bidimensional integrado na vertical (2DH) e o campo das velocidades. Dependendo dos dados de entrada, o campo de velocidades pode ser computado de forma tridimensional (3D) ou bidimensional (2DH).

A integração na direção vertical no modelo 2DH sugere que o modelo deve ser aplicado em corpos de água que possuem dimensões horizontais predominantes sobre a dimensão vertical, com a coluna de água razoavelmente homogênea e estratificação vertical pouco relevante.

O CELMM é um sistema de águas rasas (profundidades médias de 1,7 e 2,1 metros), com pouca estratificação vertical, aporte fluvial reduzido e com escalas horizontais de ordens de grandezas maiores que as escalas verticais (SANT'ANA, 2019), sendo possível o emprego do modelo bidimensional adotado para este trabalho. Para cada intervalo de tempo, o módulo 2DH determina as componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , U e V , respectivamente, e as elevações da superfície livre.

O sistema de discretização espacial é otimizado para corpos de águas naturais e pode ser feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos ou

¹ Texto adaptado de Rosman (2020).

elementos triangulares quadráticos. O modelo também utiliza diferenças finitas na discretização temporal.

Para a circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contornos para o campo de velocidades e para a elevação da superfície livre. A imposição da elevação da superfície livre é geralmente prescrita ao longo dos contornos abertos, que representam os limites do domínio, como por exemplo, a entrada de uma baía ou estuário, e não um contorno físico. A imposição de fluxos ou velocidades é usualmente associada a contornos terrestres, que são as margens e seções de rios ou canais que estão incluídos no domínio de modelagem.

4.2. Modelo de transporte lagrangeano

O modelo de transporte lagrangeano é usado para a simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas selecionadas de escoamentos 3D ou 2DH. Este tipo de modelo é ideal para simular o transporte de substâncias que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna de água. Dessa forma, o modelo consegue simular o transporte de manchas ou plumas contaminantes de pequena escala.

As fontes contaminantes são representadas por um número de partículas dispostas na região fonte aleatoriamente, em intervalos de tempos regulares. Essas partículas são advectadas pelas correntes computadas através do modelo hidrodinâmico e, após a determinação da nova posição de cada partícula lançada, um desvio aleatório, causado pelos movimentos difusivos, pode ser incluído.

Para a utilização do modelo, devem ser admitidas duas condições de contorno. A primeira, em relação aos contornos abertos, estabelece que quando uma partícula atravessa um segmento de contorno, ela sai do domínio de modelagem e é perdida. A segunda ocorre ao longo de contornos terrestres e duas situações podem ser consideradas: a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem sofrer alteração em sua massa (coeficiente de absorção zero) ou a partícula retorna ao meio, mas tem uma fração de sua massa absorvida. A fração absorvida é dada pelo coeficiente de absorção, com valores entre zero e um. O valor de coeficiente de absorção zero ao longo das fronteiras de terra indica a reflexão total ou absorção nula. Em contrapartida, o coeficiente de absorção um indica a absorção total da partícula no trecho de fronteira atingido.

O coeficiente de absorção depende da feição costeira local encontrada ao longo da fronteira terrestre, ou seja, é função dos tipos de margens, variando entre costões rochosos, praias, áreas vegetadas e manguezais, entre outros tipos. A Tabela 4.1 mostra alguns exemplos de valores de coeficientes determinados empiricamente e relacionados com os tipos de contornos.

Tabela 4.1 - Valores sugeridos para os coeficientes de absorção

Tipos de contornos	Coefficientes de absorção
Costões rochosos	0,05
Praias de areias finas	0,20
Praias de areia médias	0,30
Praias de areias grossas	0,40
Áreas vegetadas	0,50
Manguezais	0,60

Fonte: Adaptada de Rosman (2020)

As simulações de transporte lagrangeano foram realizadas para o cálculo do tempo de residência das águas na região estudada. Para calcular a distribuição espacial do tempo de residência, o modelo de transporte lagrangeano adota a seguinte metodologia: inicialmente, os compartimentos são preenchidos com milhares de partículas neutras, com as posições iniciais e os instantes de lançamentos contabilizados. Após esse lançamento, a trajetória de cada partícula é acompanhada ao longo do tempo. Quando uma partícula sai do compartimento delimitado, o seu tempo de vida ao sair será o tempo de residência. No final da simulação, o valor da função tempo de residência das partículas que não saíram do sistema corresponde ao tempo final de simulação.

4.3. Modelo de transporte euleriano

O modelo de transporte euleriano é utilizado na simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas de escalares dissolvidos ou partículas em suspensão na massa de água e pode ser aplicado para escoamentos 2DH ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Esse módulo permite a análise de praticamente qualquer tipo de reação cinética de decaimento ou produção de contaminantes e faz parte do sistema FIST.

Os parâmetros idade da água e taxa de renovação, utilizados neste estudo, são calculados através do modelo de transporte euleriano e representam opções mais adequadas que a função tempo de residência nas análises de corpos de água muito heterogêneos.

A concepção do modelo de taxa de renovação é a seguinte: no instante inicial, a água de todo o domínio de interesse possui um índice de renovação zero. Esse índice é obtido pela concentração de uma substância de referência neutra ou conservativa, isto é, que não possui reações cinéticas de produção ou consumo, nem velocidades de sedimentação e ressuspensão significativas.

As águas que entram no domínio de modelagem pelos afluentes principais devem ter concentração igual a 100, equivalente a um índice de renovação 100%. Na medida em que as águas iniciais com índice de renovação 0 se misturam com as águas novas com índice 100 e a mistura sai do domínio, ocorre a renovação. Por exemplo, se em um determinado ponto e instante, houver uma taxa de renovação de 80%, significa que 80% das águas neste local e momento são águas novas que entraram no domínio de modelagem após o início da simulação, enquanto 20% já estavam no domínio no instante inicial. A taxa de renovação é diferente em cada ponto, pois depende dos transportes advectivos e difusivos.

A idade da água calcula o tempo de decaimento de uma substância passiva, marcadora de idade, presente na água. Para estimar o tempo de decaimento, a substância marcadora de idade deve ter reação cinética de decaimento de primeira ordem, sem efeitos adicionais de perdas ou ganhos de massa, tais como sedimentação e ressuspensão.

O modelo de idade da água adota a seguinte metodologia: admite-se que no instante inicial, a concentração é igual a 1 em todo o domínio, resultando em idade da água zero. As novas águas que entram no domínio de modelagem pelos principais afluentes também têm idade zero, e assim devem ter concentração da substância marcadora de idade igual a 1.

Na medida em que as águas iniciais e as águas novas vão se misturando e sendo transportadas, o valor de concentração da substância vai diminuindo em cada local em função do processo de decaimento. Para interpretar os resultados, considere que se em um dado instante e um determinado ponto, o valor da idade da água for de 5 dias, significa que as águas neste local e momento teriam tempo de

permanência médio no corpo de água de 5 dias. O valor da idade da água torna-se diferente em cada ponto devido à magnitude das correntes e da turbulência local.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta o domínio de modelagem, a malha de elementos finitos, os cenários desenvolvidos, as estações de análise e os parâmetros de entrada necessários para a implementação dos modelos hidrodinâmicos e dos modelos de transportes euleriano e lagrangeano. O fluxograma metodológico deste estudo é resumido na Figura 5.1.

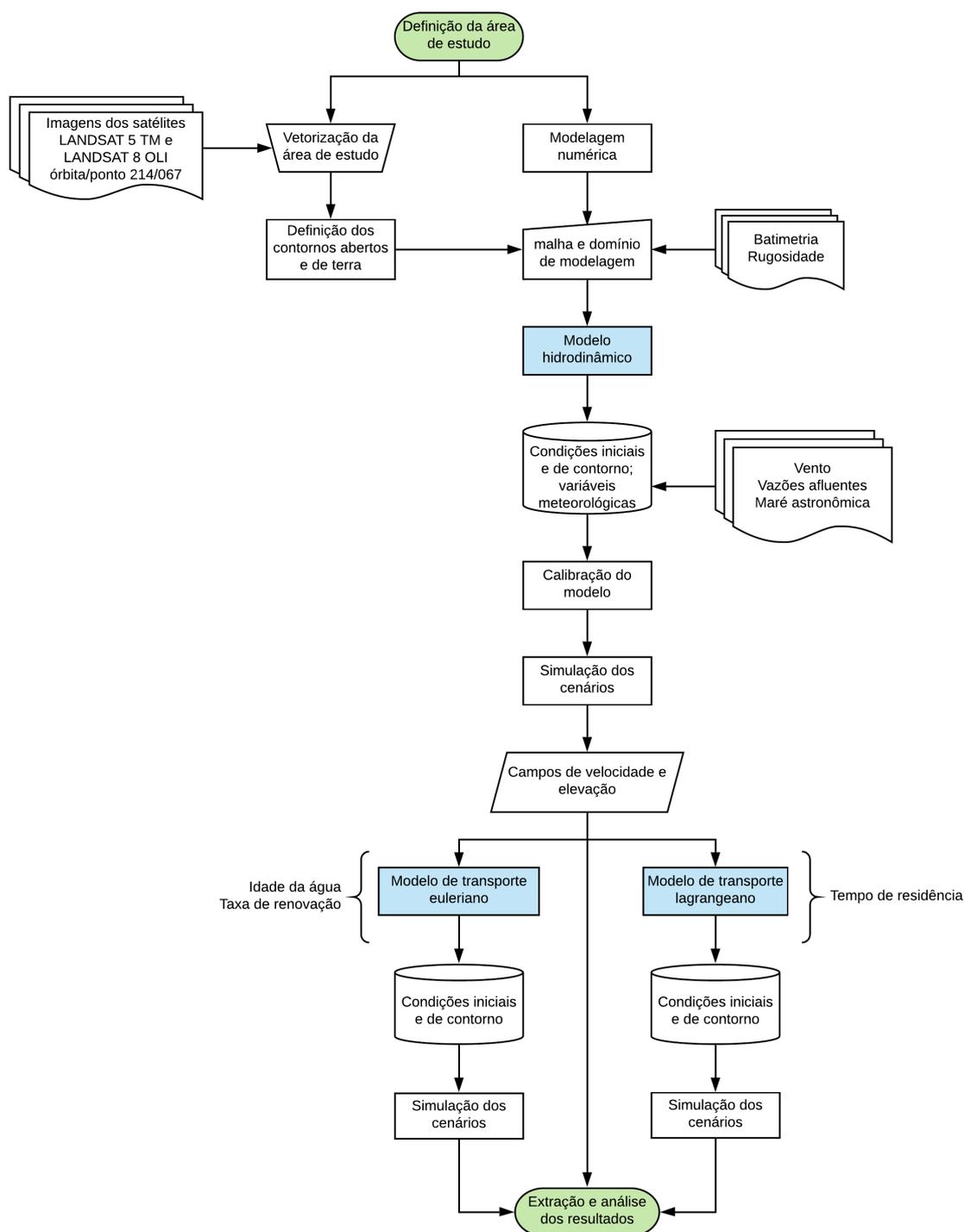


Figura 5.1 - Fluxograma metodológico

Como apresentado no fluxograma, a definição do domínio de modelagem compreende a etapa inicial de construção do modelo. A definição dos contornos abertos e terrestres é realizada a partir da vetorização de imagens de satélites.

A partir das imagens orbitais selecionadas entre os períodos de 1986 a 2017, baseadas no trabalho de Luz et al. (2021b) (Figura 3.5), foi possível verificar a formação de uma nova entrada oceânica a partir do ano de 2010. Já que o enfoque do trabalho é verificar os efeitos que as diferentes configurações de embocaduras provocam na circulação hidrodinâmica e na renovação das águas, três configurações de embocaduras foram analisadas no trabalho.

Para a primeira configuração, a imagem referente ao ano de 2006 foi utilizada, pela maior disponibilidade de dados e por representar a situação anterior à abertura do novo canal de ligação entre a laguna Manguaba e o oceano. Na segunda configuração, o ano de 2017 foi escolhido por retratar a configuração mais próxima a atual, com duas saídas para o mar. Por fim, o ano de 2014 foi retratado, tanto para realizar a calibração do modelo hidrodinâmico, a partir dos dados de elevação do nível d'água medidos por Brito Júnior et al. (2018), como para avaliar a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas, uma vez que a erosão intensa na região tornou as configurações de embocaduras de 2014 e 2017 bem distintas (Figura 3.5).

Para a vetorização da área de estudo, essas três configurações foram obtidas através da coleta de cenas dos satélites Landsat 5 TM (09:23h de 26/08/2006, durante a maré vazante de sizígia), e Landsat 8 OLI (09:30h de 06/12/2014, na baixa-mar de sizígia e às 09:30h de 14/12/2017, durante a maré enchente de sizígia), órbita/ponto 214/067, adquiridas no *United States Geological Survey* (USGS, 2018). As imagens possuem resolução espacial de 30 m e são georreferenciadas com nível de correção geométrica L1T (*Level 1 Terrain*). Para destacar os contornos dos corpos de água, foi utilizada a composição no sistema de cores Red-Green-Blue (RGB) 543 para o satélite Landsat 5 TM e RGB 751 para o satélite Landsat 8 OLI.

Na implementação do modelo, os dados oceanográficos, hidrológicos e meteorológicos também são necessários. As séries temporais de direção e velocidade do vento, por exemplo, podem ser obtidas a partir de dados horários de estações meteorológicas. As vazões fluviais podem ser extraídas nas estações fluviométricas ou podem ser estimadas a partir de informações sobre a bacia

hidrográfica e a precipitação. As marés astronômicas podem ser geradas através da definição das constantes harmônicas.

Com o intuito de analisar somente a influência das embocaduras nos resultados, os dados de batimetria, rugosidade, maré, vazão e vento inseridos nos modelos foram os mesmos para todas as simulações. Assim, foram realizadas três simulações da circulação hidrodinâmica no CELMM, para as configurações da embocadura de 2006, 2014 e 2017, com valores médios de vazão e de vento. A calibração do modelo de circulação hidrodinâmica foi realizada comparando os dados de níveis d'água medidos por Brito Júnior et al. (2018) em dois pontos do CELMM, entre 15/02/2014 e 24/02/2014. Sendo assim, nesta simulação foram utilizados os valores de vazão, vento e maré do ano de 2014.

Cunha et al. (2021) realizaram uma comparação entre os resultados encontrados para os valores médios de vazão e de vento com os valores observados em 2014, não encontrando diferenças significativas entre as simulações. Logo, a utilização dos valores médios neste trabalho, sem a influência de eventos extremos, não causa uma variação significativa nos resultados.

5.1. Malhas e domínios de modelagem

Esta seção inclui a malha de discretização utilizada na modelagem hidrodinâmica, assim como a batimetria e a rugosidade equivalente de fundo, descritos a seguir.

5.1.1. Malha de discretização

A malha de elementos finitos (Figura 5.2) usada na discretização, elaborada por Sant'Ana (2019), vem sendo continuamente desenvolvida nos trabalhos de Luz et al. (2021a) e Cunha et al. (2021). A malha foi construída para abranger as três configurações analisadas, com alterações apenas nas fronteiras de terra, ou seja, alguns podem ser considerados de terra ou não, dependendo da configuração de embocadura adotada.

Assim, a malha possui 1.488 elementos totais e 6.914 nós totais, sendo 35 de contorno aberto e 2 de contorno terra/aberto em todas as situações.

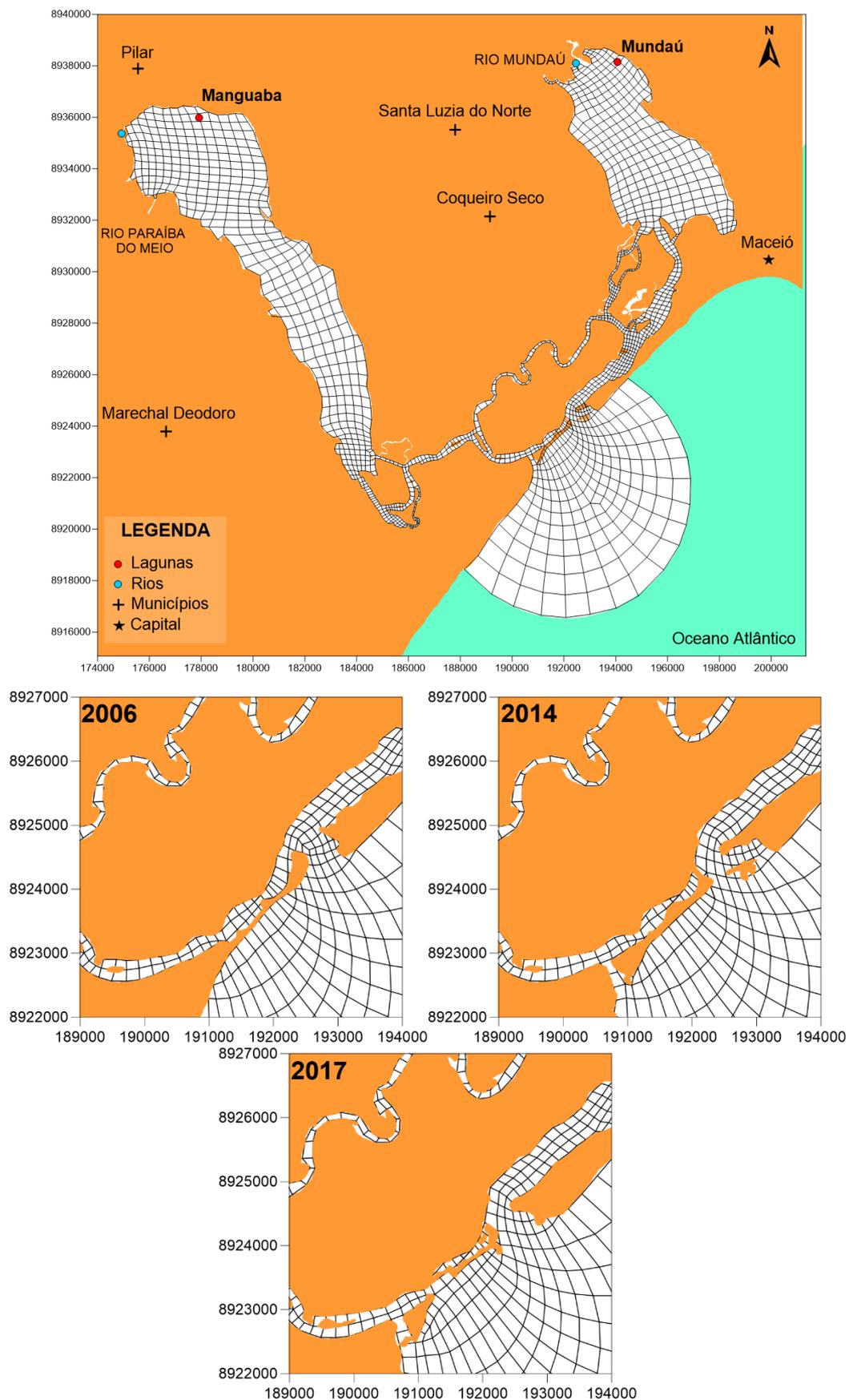


Figura 5.2 - Domínio de modelagem do CELMM, com malha de elementos finitos, localizações dos municípios e dos principais rios contribuintes e detalhes das malhas na região da embocadura nos anos de 2006, 2014 e 2017

5.1.2. Batimetria

A batimetria utilizada (Figura 5.3), confeccionada por Sant'Ana (2019), foi extraída da carta náutica do porto de Maceió número 901, realizada em 1977 pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, da campanha de medição da ANA em 2014 para o interior da laguna Mundaú e dos levantamentos topohidrográficos realizados pela PORTOBRÁS em 1984 na laguna Manguaba.

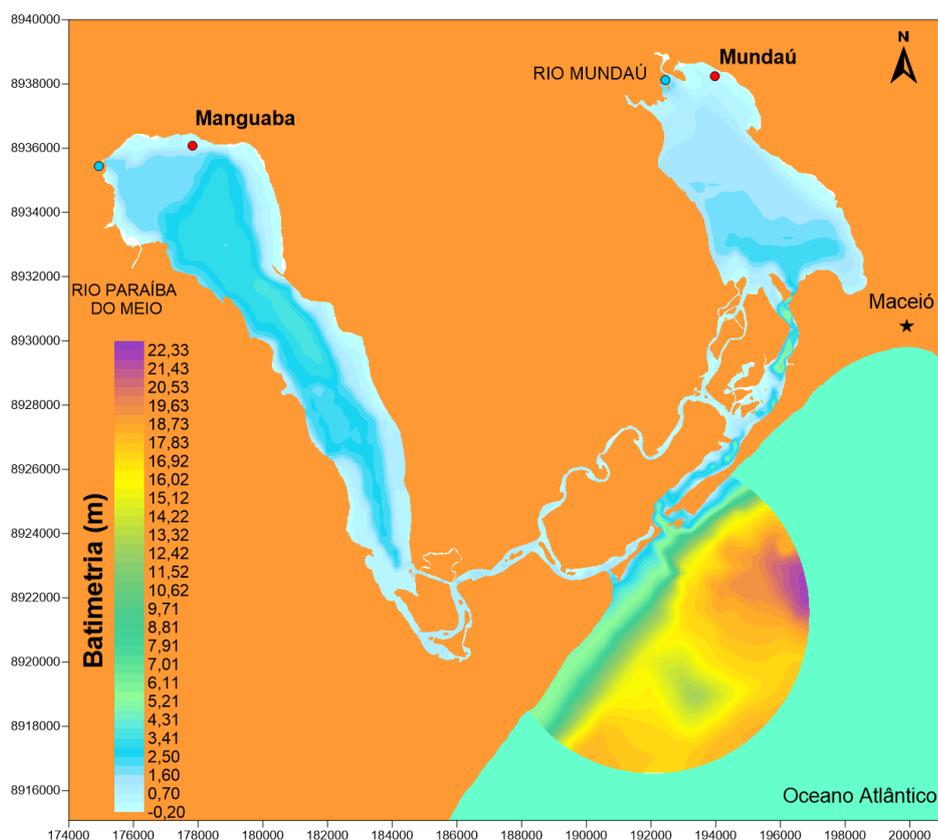


Figura 5.3 - Batimetria do domínio de modelagem, com as localizações dos rios contribuintes

A batimetria do domínio é apresentada na Figura 5.3, onde observa-se que as lagoas são rasas, com até quatro metros de profundidade, e que os canais possuem profundidades de até sete metros.

Para a modelagem, foram dispostos os mesmos dados batimétricos para os canais e lagoas em todas as configurações analisadas (2006, 2014 e 2017), com alguns ajustes nas embocaduras para contemplar a formação dos canais. Na Figura 5.4, é possível verificar as mudanças ocorridas na embocadura do CELMM nos anos de 2006, 2014 e 2017, assim como os ajustes feitos na batimetria.

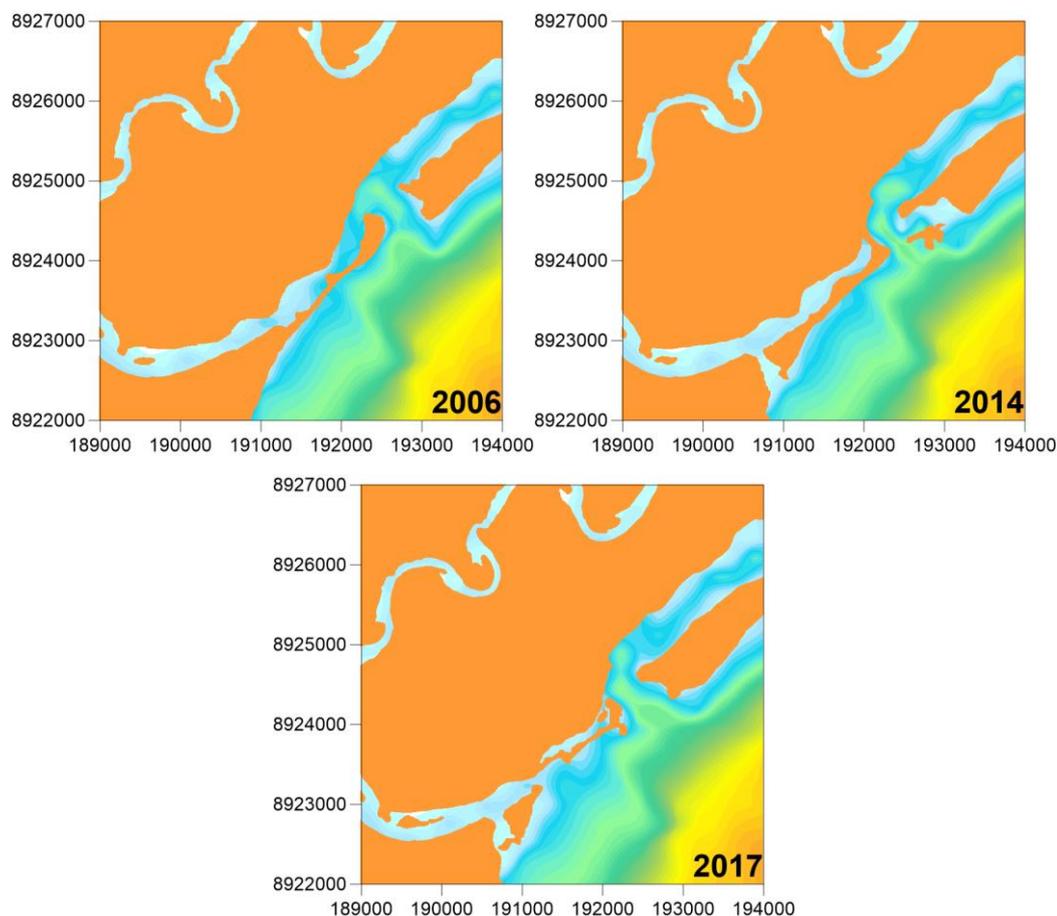


Figura 5.4 - Comportamento da embocadura do CELMM nos anos de 2006, 2014 e 2017

5.1.3. Parâmetros de fundo e rugosidade

As tensões de atrito de fundo utilizadas no modelo hidrodinâmico são calculadas a partir do coeficiente de Chézy, que é definido a partir da amplitude da rugosidade equivalente de fundo e, por sua vez, é determinada em função do tipo de sedimento de fundo (ROSMAN, 2020). A rugosidade equivalente do domínio (Figura 5.5) foi obtida a partir da correlação dos dados de levantamento de Alves (2010) com os valores de rugosidade sugeridos na Tabela 5.1, baseados em Abbot e Basco (1989).

Na Figura 5.5, percebe-se a predominância de silte ($\epsilon = 0,008$ m) no interior das lagoas Mundaú e Manguaba; nos canais há o predomínio de areia média ($\epsilon = 0,023$ m). Ao longo da costa ocorre o predomínio de areia grossa ($\epsilon = 0,040$ m).

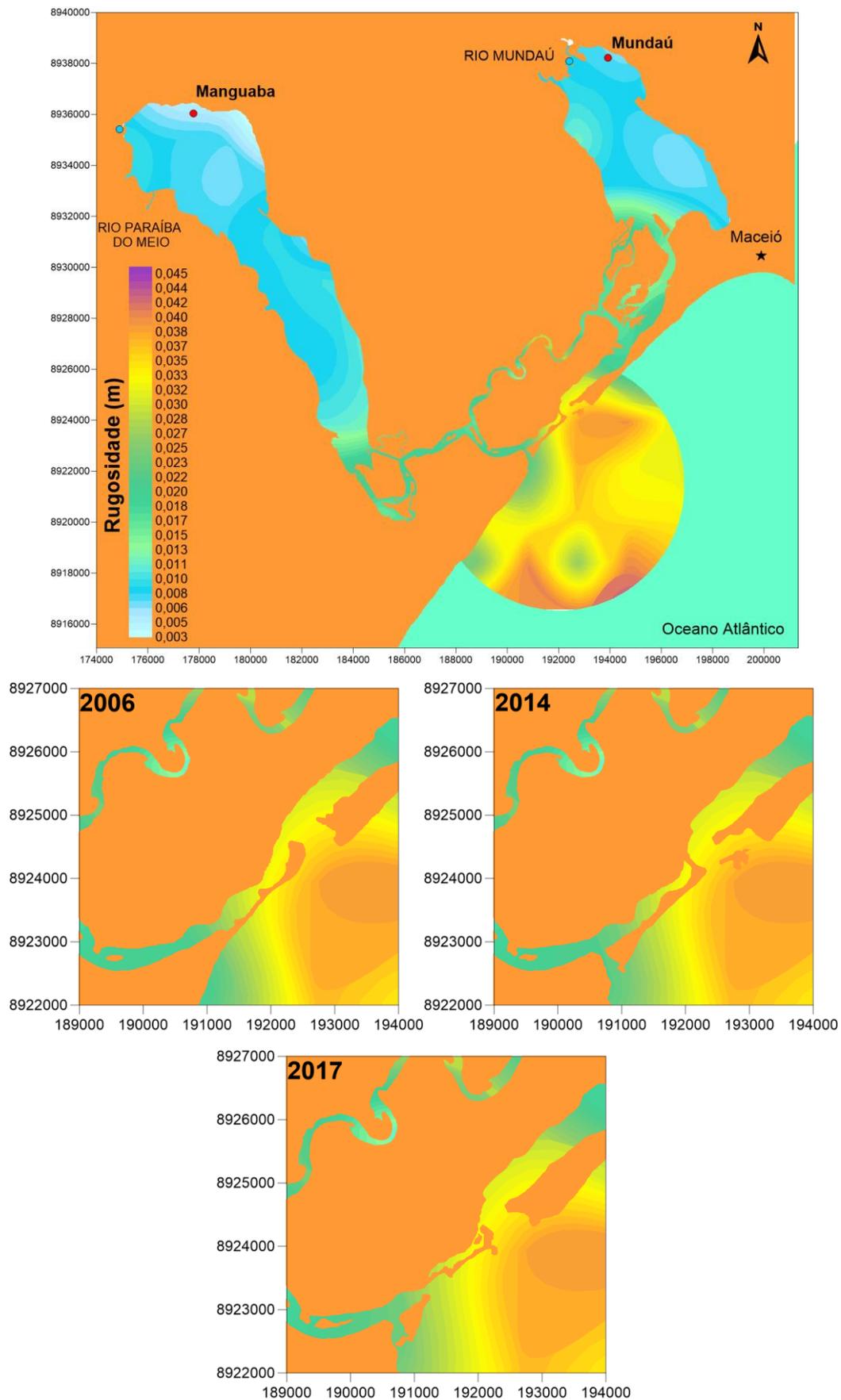


Figura 5.5 - Rugosidade de fundo no domínio de modelagem do CELMM e detalhes das embocaduras nos anos de 2006, 2014 e 2017

Tabela 5.1 - Valores sugeridos para a amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo
Leito de sedimentos com rugas e similares

Predominância de siltes e finos	0,0001 m < ϵ < 0,0100 m
Predominância de areias finas	0,0070 m < ϵ < 0,0150 m
Predominância de areias médias	0,0100 m < ϵ < 0,0300 m
Predominância de areias grossas	0,0250 m < ϵ < 0,0500 m
Predominância de areias muito grossas	0,0400 m < ϵ < 0,0800 m
Predominância de areias com cascalho	0,0500 m < ϵ < 0,1200 m
Sedimentos com vegetação	0,0500 m < ϵ < 0,1500 m
Sedimentos com obstáculos (e.g. pedras, troncos)	0,1500 m < ϵ < 0,4000 m

Fonte: Parte da tabela extraída de Rosman (2020), adaptada de Abbot e Basco (1989)

5.2. Dados oceanográficos, hidrológicos e meteorológicos

A seguir são apresentadas as forçantes hidrodinâmicas utilizadas na calibração de 2014 e nas modelagens para os anos de 2006, 2014 e 2017. Para a calibração dos dados, foi feita uma simulação entre 01/01/2014 a 31/03/2014 com dados de vazão, vento e maré observados neste período de 2014. As outras simulações foram desenvolvidas para períodos de um ano, com valores médios de vazões e ventos, e com a maré do ano de 2014.

5.2.1. Vazões dos rios

Os dados de vazões foram obtidos do portal HydroWeb (ANA, 2019), fornecido pela Agência Nacional de Águas (ANA), das estações automáticas mais próximas dos exutórios dos rios contribuintes. Para a laguna Manguaba, a estação fluviométrica está no município de Atalaia, sob o código 39870000 (09°30'24,0"S e 36°01'22,0"W) no rio Paraíba do Meio. Já na laguna Mundaú, a estação mais próxima encontra-se no município Rio Largo, código 39770000 (09°28'02,0"S e 35°51'35,0"W) no Rio Mundaú. A Figura 3.2 mostra a localização das estações fluviométricas para as lagunas Mundaú e Manguaba.

Os valores médios diários da série histórica foram atribuídos no período de 1974 a 2018 para o rio Mundaú e entre 1978 e 2018 para o rio Paraíba do Meio. A Figura 5.6 mostra os valores de vazões médias diárias dos rios Mundaú e Paraíba

do Meio e indicam os meses de outubro a março como a estação seca, e abril a setembro como a estação chuvosa.

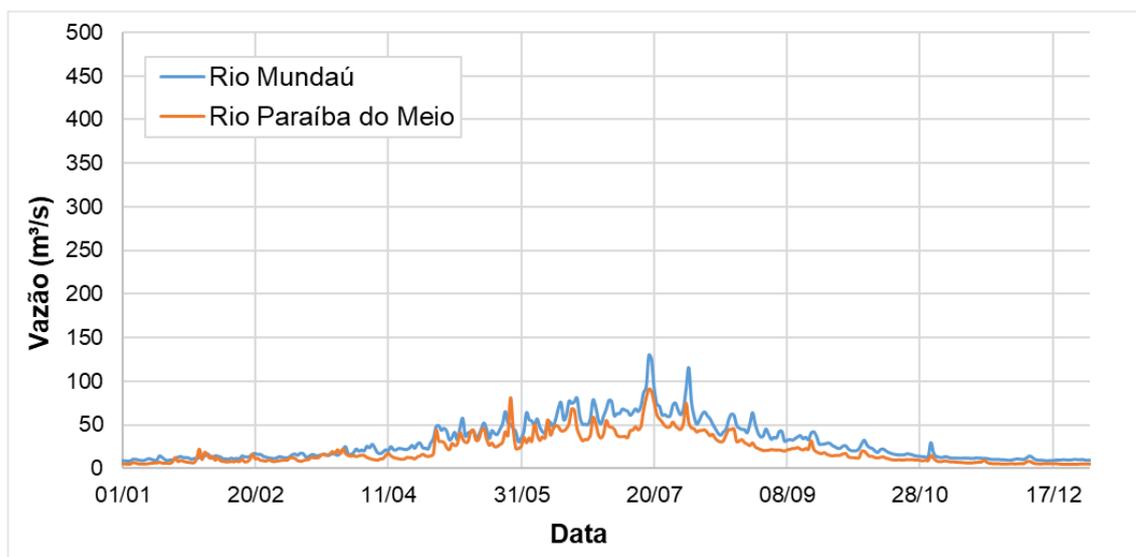


Figura 5.6 - Valores de vazões médias diárias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio entre 1974 e 2018

O mês com menores valores de vazões é janeiro, para o rio Mundaú, e dezembro, no rio Paraíba do Meio; já o mês de julho representa o pico das vazões para os dois rios. Percebe-se também que o rio Mundaú possui vazões mais elevadas que o rio Paraíba do Meio.

Para a calibração, foram considerados os valores de vazões diários correspondentes ao ano de 2014. A Figura 5.7 apresenta os valores de vazões para os rios Mundaú e Paraíba do Meio ao longo do ano de 2014. Nota-se um comportamento semelhante em relação aos valores das médias diárias (Figura 5.6) nos primeiros meses do ano, que são utilizados na calibração; e valores muito elevados em outubro, considerado um mês de estiagem.

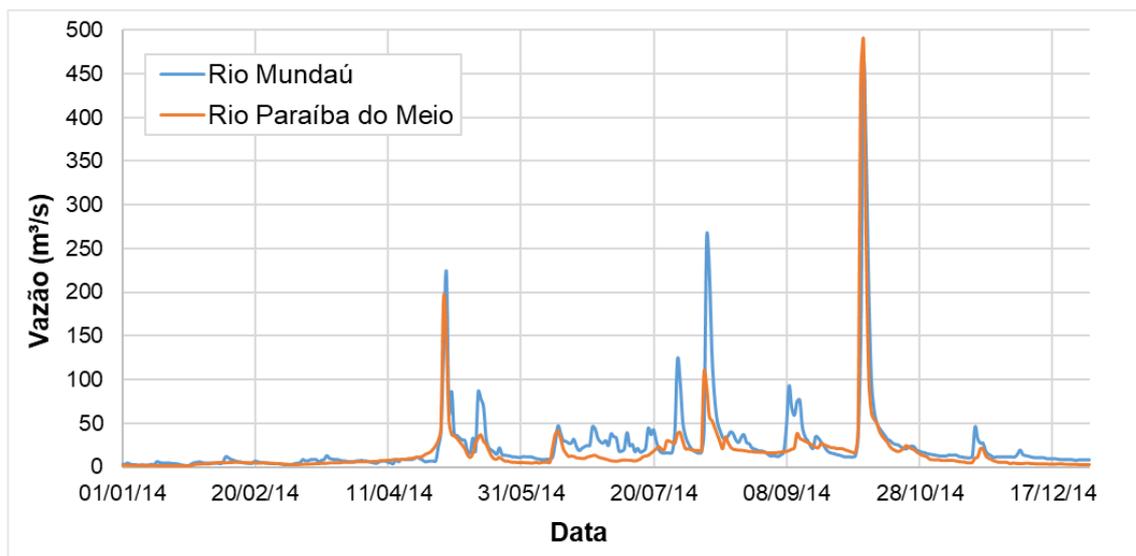


Figura 5.7 - Vazões diárias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio para o ano de 2014, utilizadas na calibração do modelo

5.2.2. Ventos

Os dados de direção e intensidade usados foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) a partir da estação Maceió-A303, Código OMM 81998 (9°33'04,2"S; 35°46'12,7"W). A Figura 3.2 indica a localização da estação meteorológica. Foi considerado que o vento atuante no domínio de modelagem é variável no tempo e uniforme no espaço.

Nas simulações hidrodinâmicas, os dados médios horários de intensidade e de direção dos ventos, correspondentes à série histórica de 2004 a 2018 foram usados. Nessa série histórica, os valores nos anos de 2007 e 2008 foram desconsiderados devido à ocorrência de falhas na estação. A Figura 5.8a mostra a rosa de distribuição dos ventos desse período, onde verifica-se a predominância de ventos do quadrante leste e intensidades entre 0,5 e 8 m/s, com velocidade média de 2,68 m/s.

Na calibração foram fornecidos ao modelo hidrodinâmico dados horários de intensidade e direção dos ventos para os meses de janeiro, fevereiro e março do ano de 2014. A Figura 5.8b apresenta a rosa dos ventos para o período, sendo possível observar um padrão de distribuição de intensidades entre 0,5 até 8 m/s e velocidade média de 2,60 m/s.

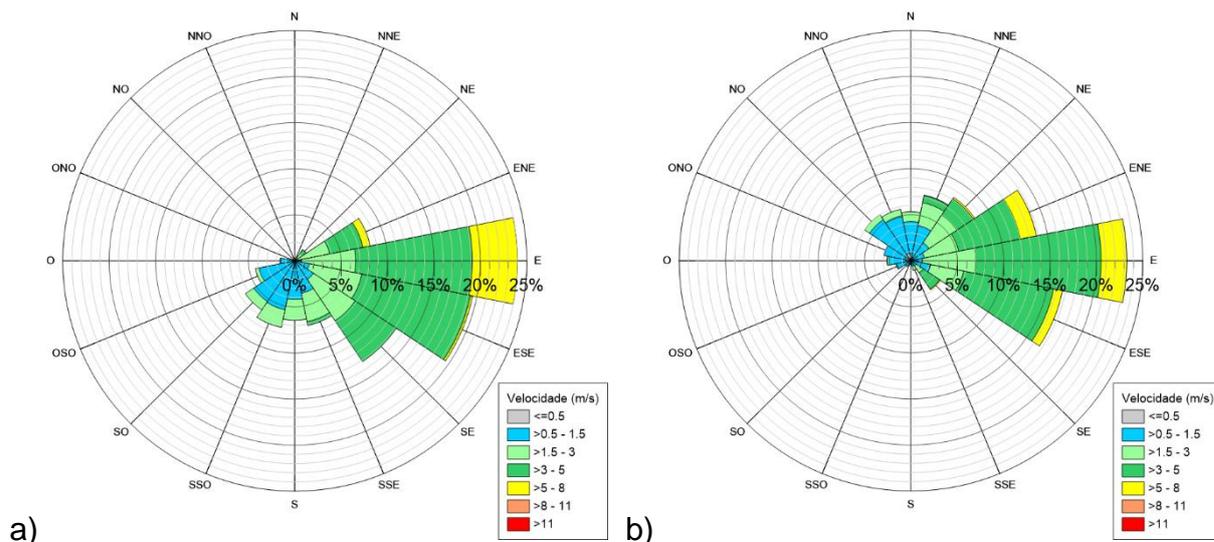


Figura 5.8 - a) Rosa de distribuição dos ventos médios da estação Maceió A-303 para o período entre 2004 e 2018 b) Rosa dos ventos da estação Maceió A-303 para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2014

As Figura 5.9a e Figura 5.9b expõem os padrões de ventos nos meses de janeiro (representativo do período de estiagem) e de julho (representativo do período chuvoso), obtidos a partir dos dados médios horários da série histórica de 2004 a 2018. Em janeiro, é possível notar a influência de brisas marítimas de quadrante leste durante o dia e a ocorrência de brisas terrestres de baixa intensidade no período noturno nas direções sudeste e sul. Já no mês de julho, observa-se a predominância de brisas marítimas vindas do sudeste durante o dia, e brisas terrestres nas direções sul e sudoeste nas horas restantes.

Percebe-se que as brisas marítimas são mais intensas que as brisas terrestres e, em relação às diferenças entre os meses de janeiro e julho, verifica-se que os ventos apresentam valores de intensidades semelhantes durante os períodos seco e chuvoso, com velocidades variando entre 0,5 e 6 m/s em janeiro e, no mês de julho, velocidades entre 0,5 e 5 m/s.

Em referência ao alinhamento das lagunas, é possível constatar que os ventos de sudeste influenciam mais a circulação hidrodinâmica do que os ventos de leste, predominantes no período seco.

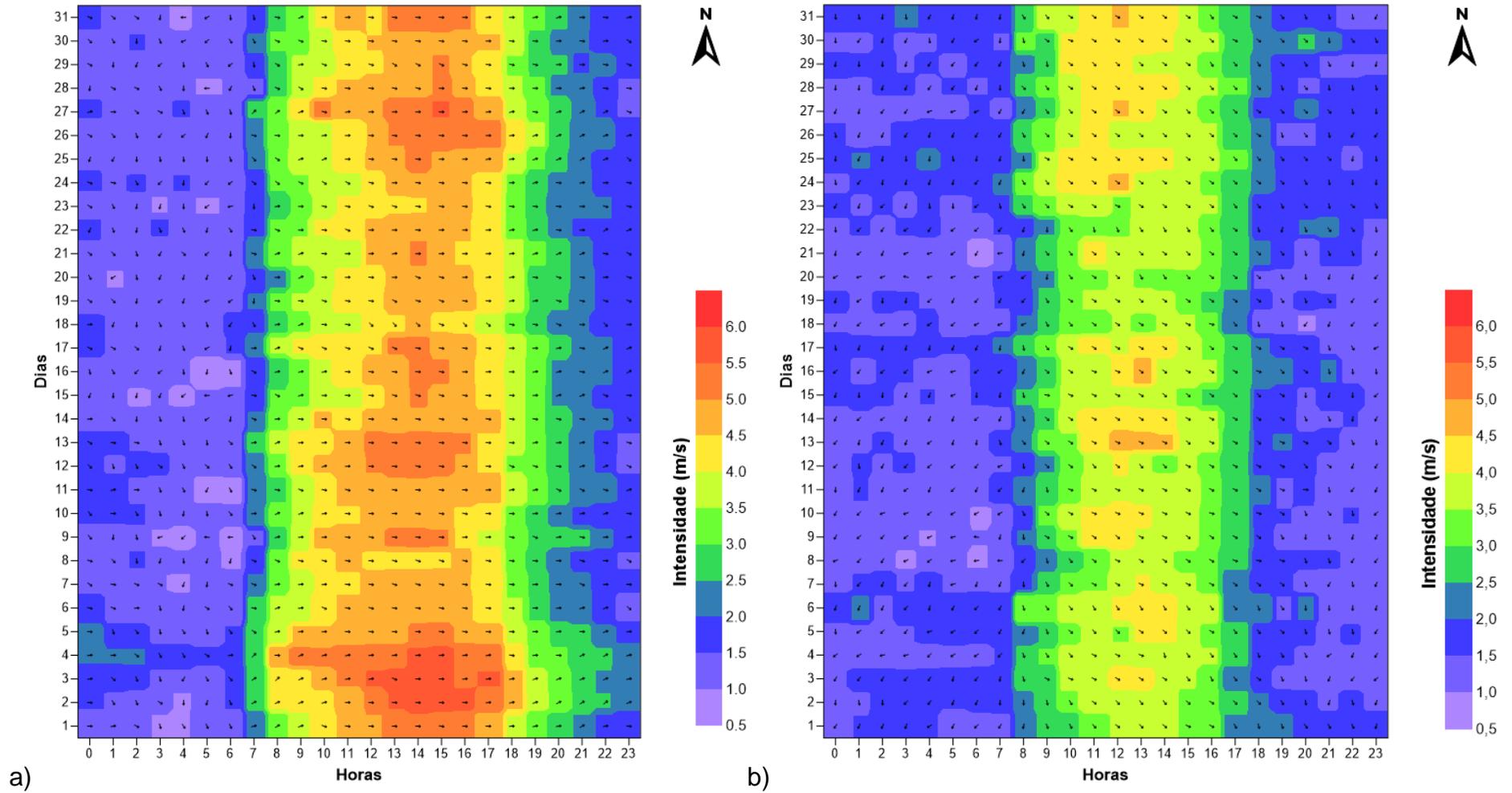


Figura 5.9 - a) Direção e intensidade do vento no mês de janeiro, a partir dos dados médios da estação Maceió A-303 b) Direção e intensidade do vento no mês de julho, a partir dos dados médios da estação Maceió A-303

5.2.3. Marés

A determinação da maré astronômica foi realizada a partir da inserção de constantes harmônicas que foram adquiridas pelo catálogo de estações maregráficas brasileiras, através da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2000) para o Porto de Maceió (9° 40,9' S; 35° 43,5' W). Os registros compreendem 21 componentes harmônicas, que estão apresentadas na Tabela 5.2

Tabela 5.2 - Constantes harmônicas utilizadas e seus respectivos valores de fase, período e amplitude do porto de Maceió

Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)
Mf	1180292,288	0,021	20
K1	86164,091	0,031	30
M1	89399,694	0,001	34
2N2	46459,348	0,031	70
mu2	46338,327	0,024	76
MS4	21972,021	0,018	76
N2	45570,054	0,137	97
M2	44714,164	0,716	107
L2	43889,833	0,018	111
K2	43082,045	0,074	115
S2	43200,000	0,267	119
Ssa	15778458,751	0,024	131
nu2	45453,616	0,028	140
M4	22357,082	0,009	174
Sa	31556955,923	0,035	192
MSf	1275721,388	0,036	211
Mm	2380713,137	0,007	231
Q1	96726,084	0,017	280
M3	29809,443	0,008	280
O1	92949,630	0,057	306
T2	43259,217	0,013	330

Fonte: Catálogo de estações maregráficas brasileiras da FEMAR (2000)

Com as constantes harmônicas, o modelo computa a maré sintética a partir da equação 4.1.

$$\zeta(\phi, \lambda, t) = \zeta_0 + \sum_{j=1}^m A_j(\phi, \lambda) \cos\left(\frac{2\pi}{T_j} t - g_j(\phi, \lambda)\right) \quad (4.1)$$

Em que ζ é o nível de água no tempo t ; ζ_0 representa o nível médio do mar; e A_j , T_j e g_j são a amplitude, o período e a fase do j -ésimo constituinte, respectivamente.

A defasagem da maré também foi considerada para todos os nós da malha pertencentes à fronteira aberta. A defasagem da propagação da maré ao longo do domínio foi calculada por Sant'Ana (2019), a partir das estações maregráficas do Porto de Maceió e do terminal marítimo Inácio Barbosa, em Sergipe.

Ao observar as curvas de marés dos anos de 2006, 2014 e 2017, notou-se que as marés eram similares em relação à amplitude, e com pequenas diferenças de fases. Para auxiliar na análise dos resultados, optou-se por utilizar a curva de maré correspondente ao ano de 2014 em todas as simulações.

A Figura 5.10 mostra a curva de maré para o ano de 2014. É possível verificar um comportamento semelhante ao longo do ano, com os ciclos de sizígia e quadratura, com uma elevação máxima de 1,39 m e amplitude máxima de maré de 2,61 m.

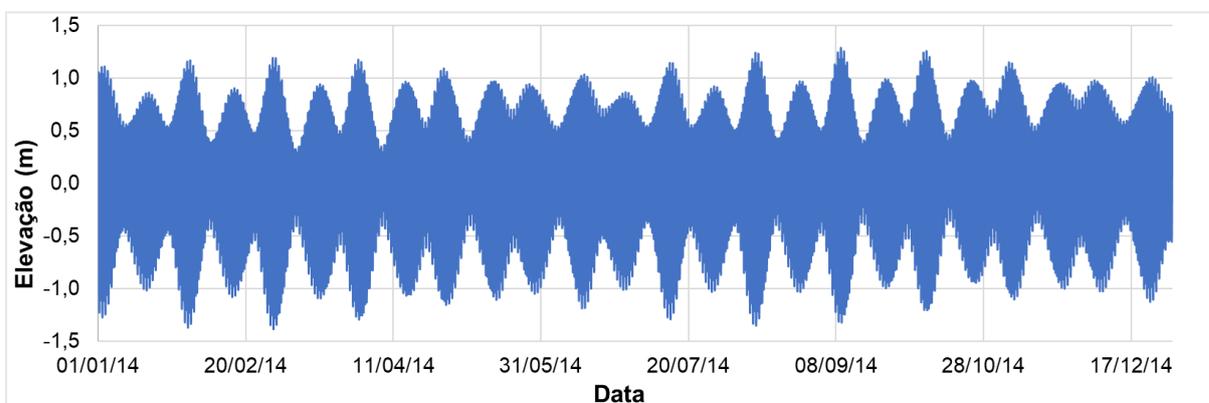


Figura 5.10 - Curva de maré utilizada na modelagem e obtida a partir das constantes harmônicas fornecidas pela DHN

5.3. Condições iniciais e de contorno dos modelos

A existência de uma solução única para as equações que formam os modelos depende de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno. Para o modelo hidrodinâmico, como condição inicial, deve-se fornecer os valores da elevação da superfície livre e as componentes das velocidades U e V , para todos os nós do domínio. Quando não há nenhum resultado prévio adequado para ser utilizado como condição inicial, pode-se realizar uma simulação considerando o nível

horizontal e velocidades nulas, uma condição chamada “partida a frio” (ROSMAN, 2020). Assim, foram realizadas simulações no período de dezembro, para as três configurações de embocaduras, com os valores de elevação e velocidades nulos. Os resultados dessas simulações geraram as condições iniciais para uma “partida a quente”.

Como condição de contorno do modelo hidrodinâmico, foi estabelecido que a velocidade normal é nula nos nós ao longo da margem do complexo. Já nos nós que possuem vazões provenientes dos rios, foi fornecido a vazão normal e a componente tangencial considerada nula.

Como discutido na seção 4.2, para a utilização do modelo de tempo de residência, deve-se admitir que no contorno aberto, quando uma partícula sai do domínio, ela é perdida. Nos contornos terrestres, verifica-se que o coeficiente de absorção está diretamente relacionado com a feição costeira encontrada no corpo d’água. O CELMM encontra-se margeado por manguezais e áreas vegetadas (Ver Figura 3.4). Por essa razão, foi considerado que, quando a partícula atinge a fronteira terrestre, é absorvida (coeficiente de absorção igual a um).

Para o modelo de transporte euleriano, utilizado para o cálculo da taxa de renovação, definiu-se o valor de concentração igual a zero, equivalente a um índice de renovação de 0%, para todo o domínio de modelagem e a concentração igual a 100 nos contornos com vazões fluviais e no contorno aberto. No cálculo da idade da água, para estimar o tempo de decaimento, definiu-se a concentração igual a um, tanto no domínio de modelagem, como nos contornos abertos e com vazões fluviais, resultando em idade da água zero.

5.4. Cenários de modelagem

Com o objetivo de caracterizar as diferenças na circulação e nos processos de mistura ocorridos nas lagoas a partir das diferentes configurações de embocaduras do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba, três cenários foram definidos. Os resultados para cada cenário são apresentados para os períodos seco e chuvoso, abordando os ciclos de sizígia e quadratura.

- Cenário 1: Considera valores médios de vazão e vento, com o domínio de modelagem correspondente à embocadura de 2006.

- Cenário 2: Considera valores médios de vazão e vento, com o domínio de modelagem correspondente à embocadura de 2014.
- Cenário 3: Considera valores médios de vazão e vento, com o domínio de modelagem correspondente à embocadura de 2017.

5.5. Estações

As análises dos resultados foram feitas em estações localizadas nos canais e nas lagunas do CELMM (Figura 5.11). As 13 estações posicionadas representam diferentes regiões do domínio modelado.

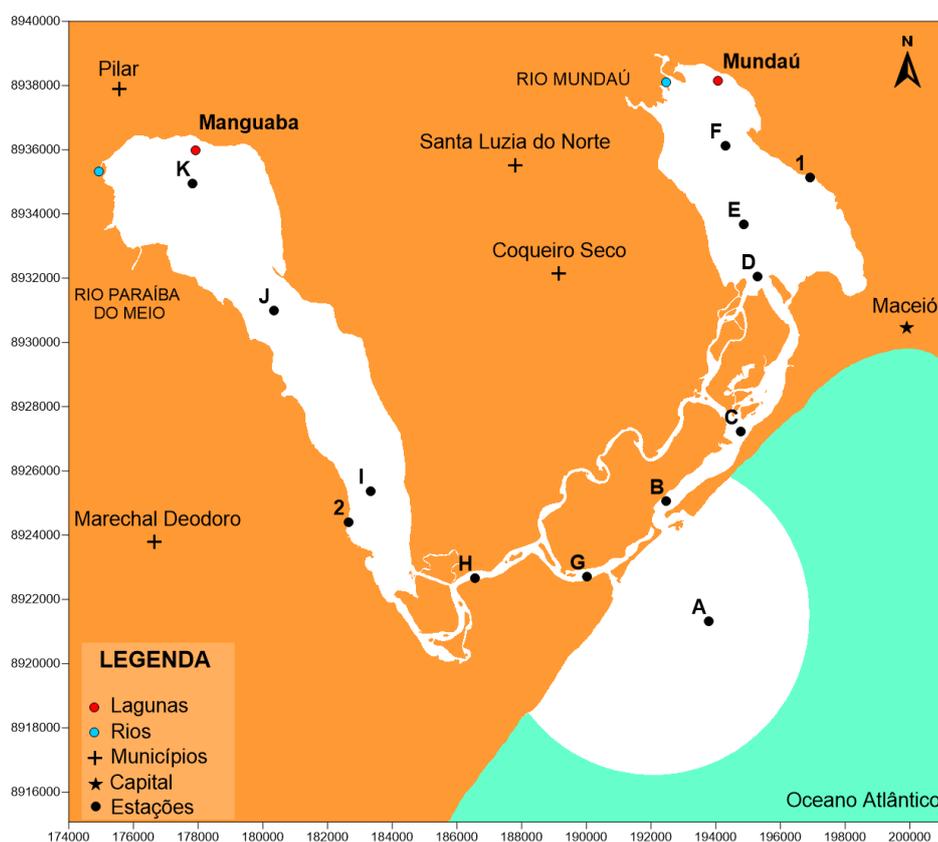


Figura 5.11 - Distribuição das estações no CELMM

As estações 1 e 2 indicam os locais das medições de níveis d'água realizadas por Brito Júnior et al. (2018). A estação A representa a região costeira adjacente.

As estações B e G correspondem às regiões mais próximas das embocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente. Possuem velocidades mais elevadas e maior influência da maré.

As estações C e H representam as regiões intermediárias dos canais de acesso às lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente.

As estações D, E e F estão localizadas na laguna Mundaú e caracterizam os três compartimentos: o fundo da laguna, com influência maior do rio Mundaú, a região central da laguna e a região próxima ao canal de acesso, que apresenta maior influência da maré.

De forma análoga, as estações I, J e K, localizadas na laguna Manguaba, também descrevem os três compartimentos: o fundo da laguna, com influência maior do rio Paraíba do Meio, a região central da laguna e a região próxima ao canal de acesso, com maior influência da maré.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos pelo SisBaHiA[®] para a circulação hidrodinâmica, idade da água, taxa de renovação e tempo de residência são discutidos nesta seção. Primeiramente é mostrada a comparação entre os dados obtidos na simulação para o ano de 2014 e os dados de nível medidos entre 15/02/2014 e 24/02/2014, usados na calibração do modelo. Em seguida são apresentados os resultados para as velocidades, elevações e o balanço dos volumes de entrada e saída do CELMM. Após isso, são discutidos os resultados do modelo lagrangeano para o tempo de residência e, por fim, os resultados do modelo euleriano para a taxa de renovação e idade da água.

6.1. Calibração do modelo

A calibração do modelo de circulação hidrodinâmica foi realizada comparando os dados de níveis d'água medidos por Brito Júnior et al. (2018) em dois pontos do CELMM, estação 1 na laguna Mundaú e estação 2 na laguna Manguaba, entre 15/02/2014 e 24/02/2014 com os dados computados pelo SisBaHiA[®]. Os resultados obtidos nessa simulação são mostrados nas Figura 6.1 e Figura 6.2.

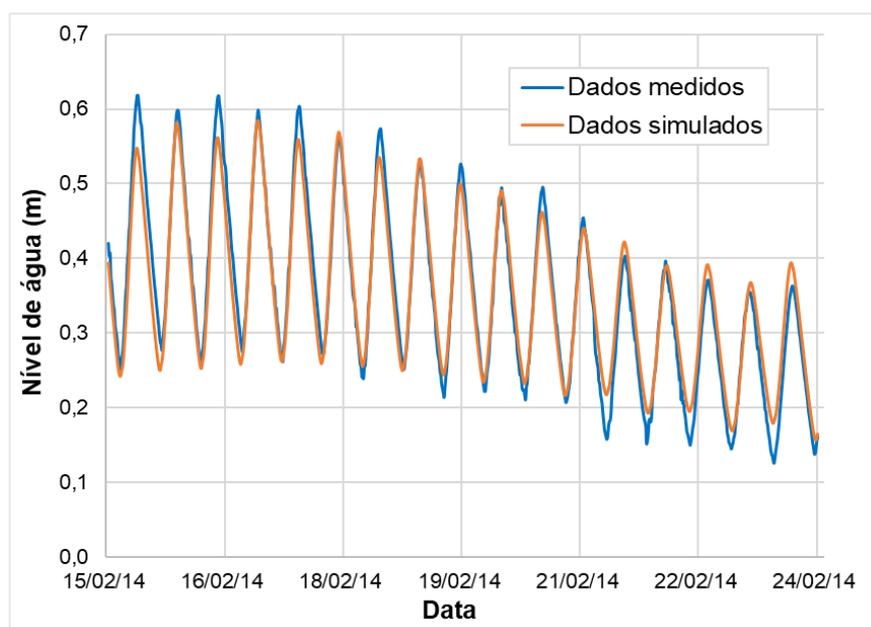


Figura 6.1 - Comparação entre os valores de níveis d'água medidos e os simulados pelo SisBaHiA[®] na estação 1 (Laguna Mundaú)

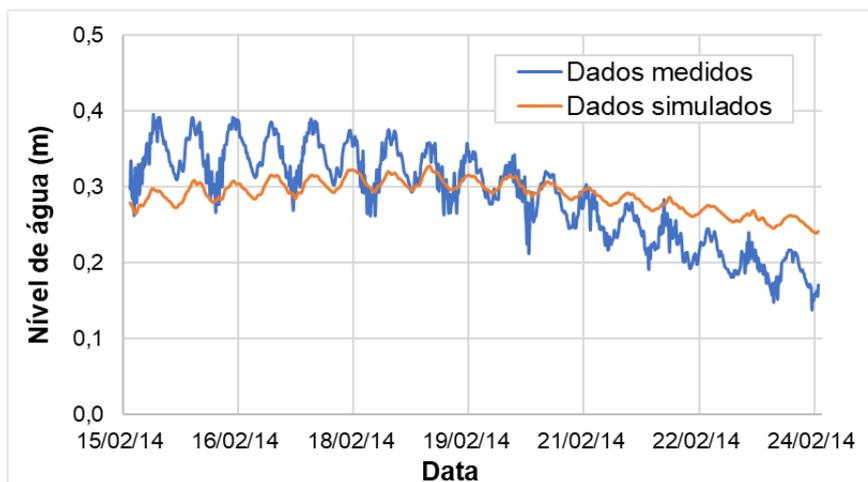


Figura 6.2 - Comparação entre os valores de níveis d'água medidos e os simulados pelo SisBaHiA® na estação 2 (Laguna Manguaba)

Nota-se uma boa concordância em relação à fase nas duas lagunas e, no que se refere à amplitude, um amortecimento nos valores computados em relação aos medidos, principalmente na laguna Manguaba. Um dos possíveis fatores para essa diferença pode estar relacionado à utilização de dados batimétricos desatualizados; os dados usados são de um levantamento realizado pelo PORTOBRÁS em 1984. Os valores de amplitude da rugosidade equivalente do fundo adotada para os canais e as lagunas também podem ter influenciado nessa atenuação. Na laguna Mundaú, o amortecimento é menor, o que também pode estar relacionado a problemas na definição da rugosidade de fundo no canal de ligação, considerando que a batimetria do canal é mais recente do que os canais que ligam a região costeira adjacente e a laguna Manguaba.

A coerência entre os valores medidos e computados pode ser estimada utilizando o método de correlação linear. De acordo com Rosman (2020), após a calibração do modelo, espera-se que a coerência entre os valores de níveis d'água medidos e computados seja superior a 95%. Assim, as Figura 6.3 e Figura 6.4 apresentam os coeficientes de correlação (R^2) para as lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente.

Para a laguna Mundaú, o valor de correlação obtido foi de 0,96, representando um bom desempenho do modelo. Em Manguaba, o valor do coeficiente de correlação foi de 0,73, denotando uma discordância entre os dados medidos e os simulados. Mesmo com o valor insatisfatório no coeficiente de correlação na laguna Manguaba, a calibração dos níveis d'água indicou uma boa

representatividade do modelo, sendo capaz de apresentar valores adequados das variações de níveis de água e trocas de volumes no CELMM. O modelo também é apropriado para o estudo comparativo entre os cenários.

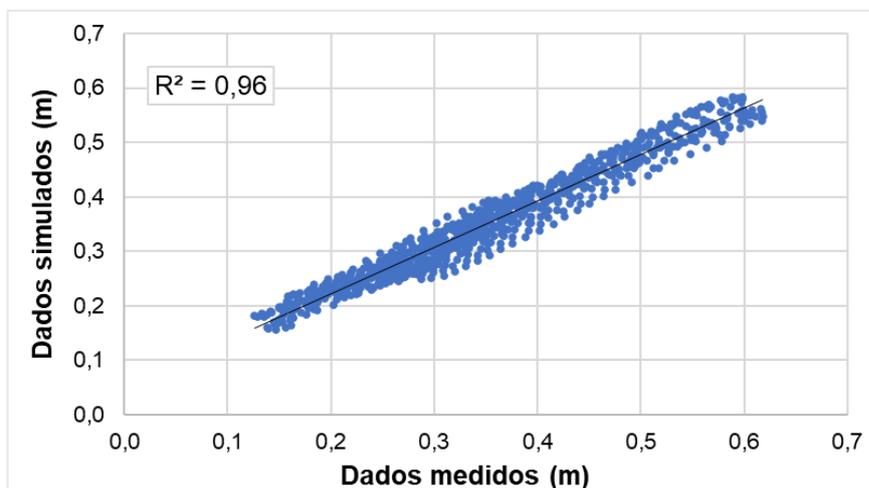


Figura 6.3 - Correlação entre os dados medidos e simulados pelo SisBaHiA® na estação 1 (Laguna Mundaú)

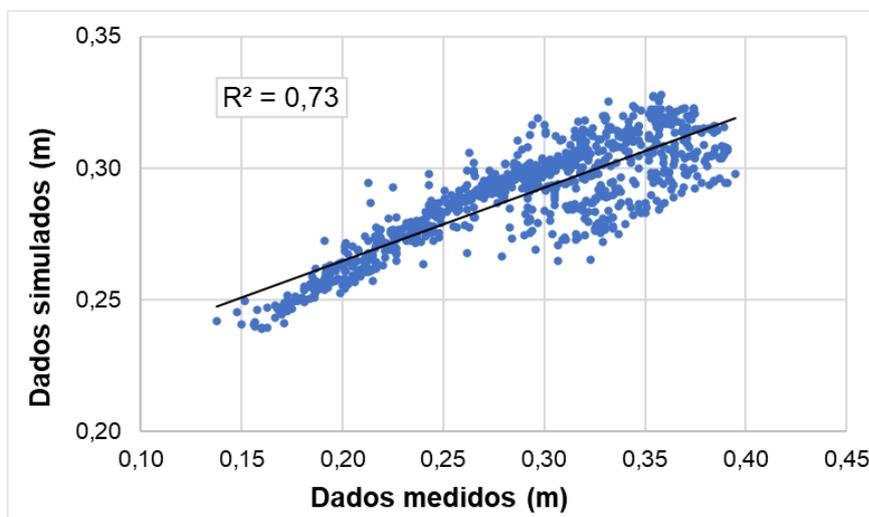


Figura 6.4 - Correlação entre os dados medidos e simulados pelo SisBaHiA® na estação 2 (Laguna Manguaba)

6.2. Resultados da modelagem hidrodinâmica

As simulações hidrodinâmicas foram realizadas para o período de um ano, com número de Courant médio igual a 0,7 e máximo igual a 2,7. Todos os parâmetros utilizados estão nas Figura A.1 e Figura A.2. Na análise dos dados hidrodinâmicos, foram considerados dois períodos de 60 dias para verificar os

efeitos das descargas fluviais na região. O período de estiagem foi definido para o intervalo de 01/01 até 01/03; e o período chuvoso ficou no intervalo de 01/06 até 30/07. As Figura 6.5 e Figura 6.6 mostram a posição da superfície livre obtida pelo SisBaHiA® na fronteira aberta durante este período. É possível observar períodos de sizígia e quadratura, definidos para os cálculos de amplitude de maré, defasagem e volume.

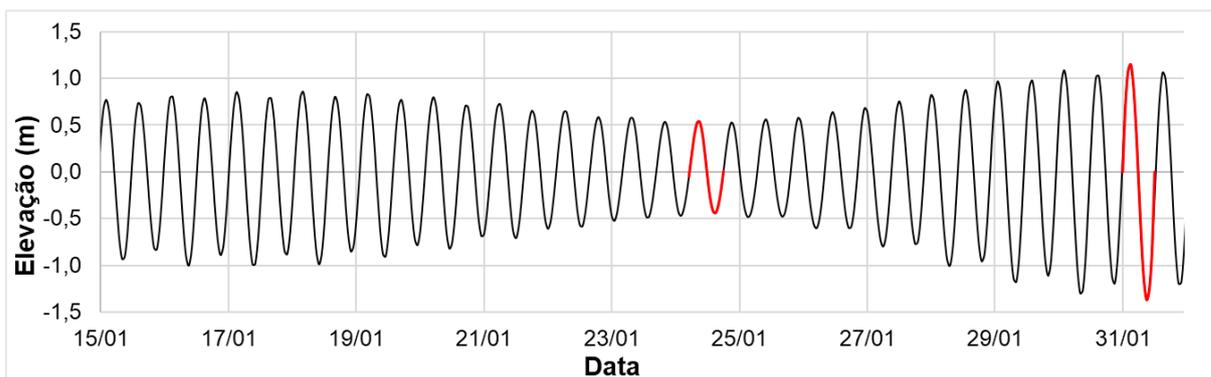


Figura 6.5 - Elevação da superfície livre na fronteira aberta durante o período seco com destaque para os períodos de sizígia e quadratura definidos para os cálculos de amplitude de maré, defasagem e volume

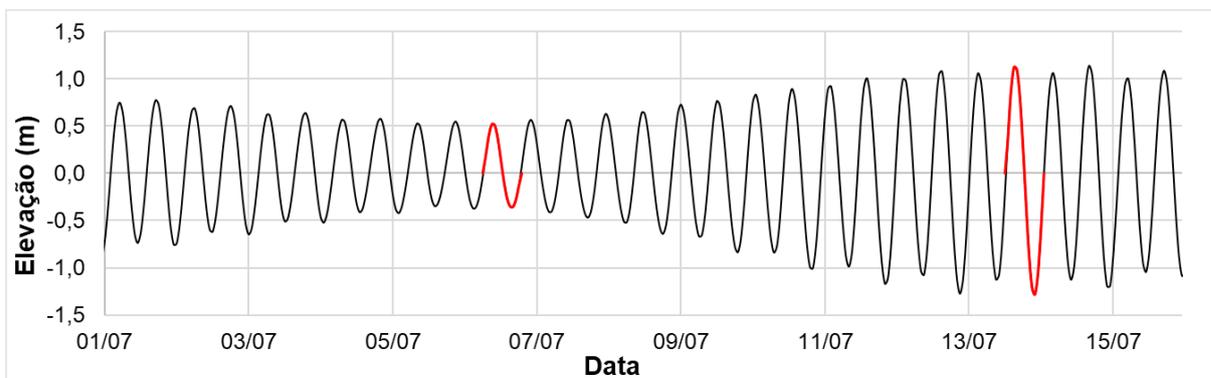


Figura 6.6 - Elevação da superfície livre na fronteira aberta durante o período chuvoso com destaque para os períodos de sizígia e quadratura definidos para os cálculos de amplitude de maré, defasagem e volume

6.2.1. Velocidades

Com o objetivo de verificar as diferenças nas componentes de velocidades nos cenários C1, C2 e C3, foram construídas elipses de marés para as estações das lagunas Mundaú e Manguaba.

Primeiramente, as elipses foram elaboradas considerando os períodos seco e chuvoso; porém não foram observadas diferenças significativas nas intensidades e

direções das componentes de velocidades entre os três cenários. Então, foram elaboradas as elipses de marés para as estações nos canais das lagunas Mundaú (estações B e C) e Manguaba (estações G e H), comparando os cenários C1, C2 e C3 para o período de um ano. Essas estações possuem velocidades mais elevadas e uma influência predominante da maré. As outras estações do CELMM possuíam velocidades muito baixas e não apresentaram diferenças significativas entre os cenários, por isso não foram apresentadas neste trabalho.

A região próxima à embocadura da laguna Mundaú (Figura 6.7), estação B, exibe um comportamento semelhante nos cenários C2 e C3, tanto na intensidade como na direção nordeste-sudoeste das componentes de velocidades, com intensidades relativamente maiores na componente leste-oeste do cenário C3. A velocidade na componente leste-oeste diminui consideravelmente no cenário C1, devido à localização da embocadura. No cenário C1 (Ver Figura 3.5, ano 2006), esta área encontra-se erodida e a estação está bem próxima à foz, o que alterou a direção e a intensidade das correntes nessa região. Nos cenários C2 e C3, nota-se uma deposição de sedimentos, com a diminuição da área da seção transversal e o aumento da velocidade. Verifica-se que as velocidades são mais elevadas durante o período de vazante, quando as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste estão negativas.

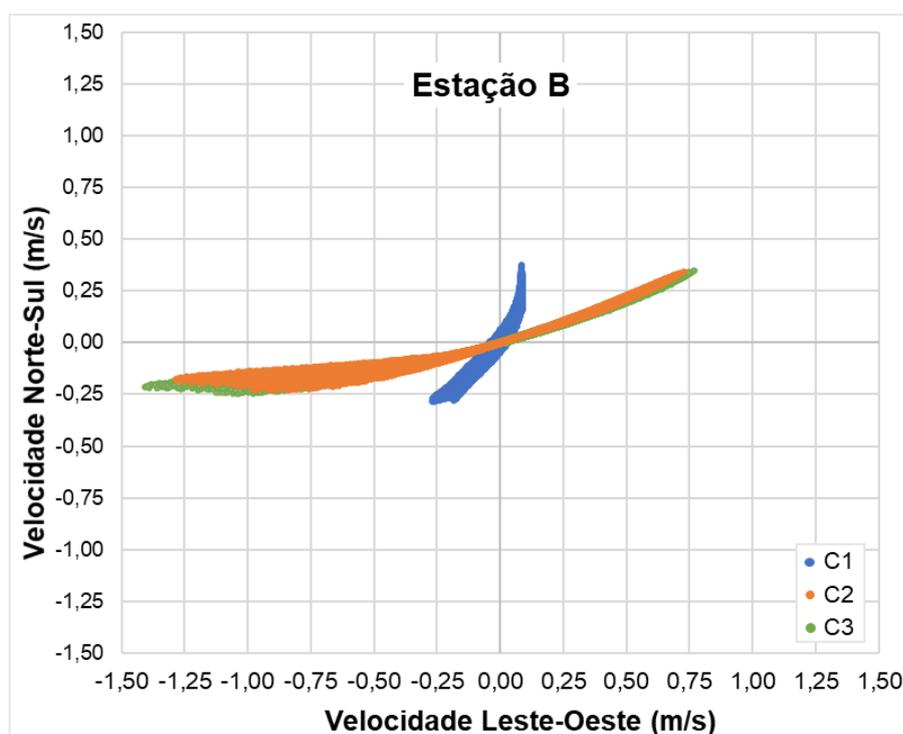


Figura 6.7 - Elipse de maré na estação B, que corresponde à região próxima à embocadura da laguna Mundaú

Na região intermediária no canal da laguna Mundaú (Figura 6.8), Estação C, os efeitos das diferentes configurações de embocaduras na direção e no módulo das velocidades são menores, com um aumento na intensidade das correntes no cenário C1 na componente leste-oeste, devido à maior entrada de águas, gerando um aumento das velocidades.

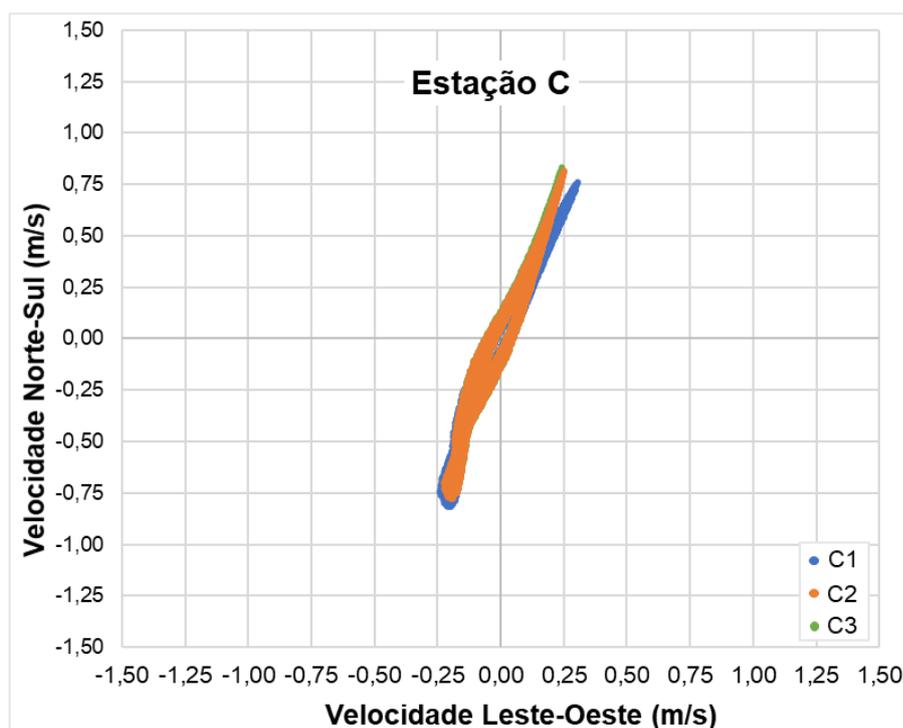


Figura 6.8 - Elipse de maré na estação C, que corresponde à região intermediária no canal da laguna Mundaú

Na região próxima à embocadura da laguna Manguaba (Figura 6.9), estação G, as velocidades do cenário C2 são superiores aos outros cenários e as diferenças são mais perceptíveis nos eixos positivos das velocidades. No cenário C2, há uma maior entrada de águas devido à abertura da embocadura da laguna Manguaba, com o consequente aumento das velocidades no local. No C3, essa abertura também está presente, porém a formação da ilha-barreira nessa região dificulta a entrada da água. Já no cenário C1, as águas entram somente pela embocadura da laguna Mundaú, reduzindo as velocidades. As direções das componentes continuam na octante nordeste-sudoeste para todos os cenários apresentados.

A Figura 6.10, que corresponde à região intermediária do canal da laguna Manguaba (estação H), mostra que as velocidades são muito baixas nesta região do canal, com valores significativos apenas na componente leste-oeste da velocidade.

Em relação às diferenças entre os cenários, o comportamento é semelhante ao encontrado na estação G, mas em menor escala.

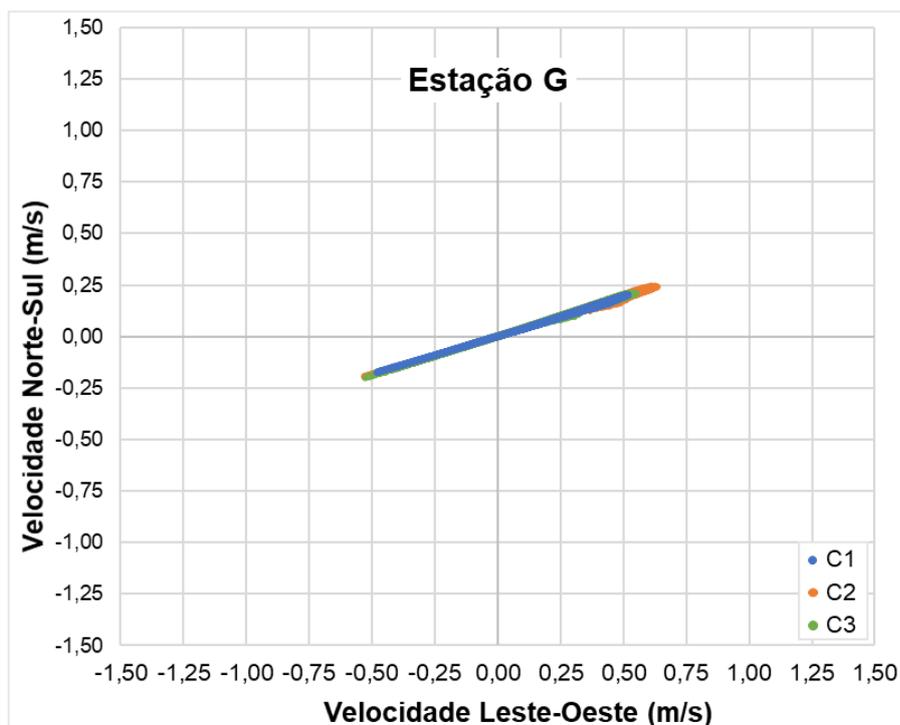


Figura 6.9 - Elipse de maré na estação G, que corresponde a região próxima à embocadura da laguna Manguaba

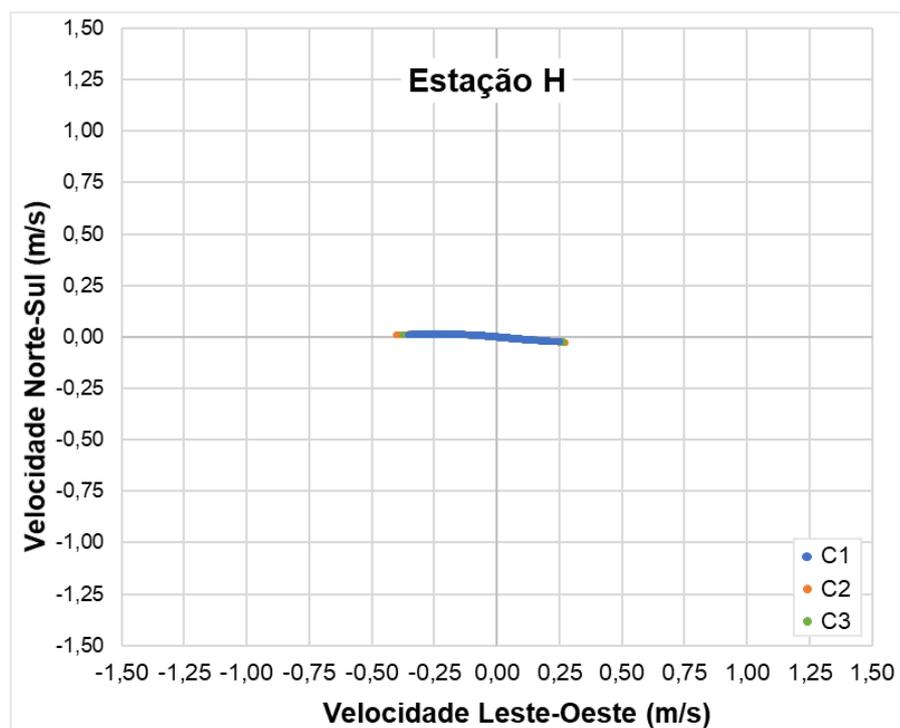


Figura 6.10 - Elipse de maré na estação H, que corresponde a região intermediária do canal na laguna Manguaba

6.2.2. Elevação da superfície livre

As Figura 6.11 e Figura 6.12 mostram os resultados obtidos pelo SisBaHiA® das elevações da superfície livre para quatro estações de controle (B, D, G e I) no período seco. Nota-se que a laguna Mundaú (B e D) não apresentou diferenças nas elevações para as diferentes configurações de embocaduras, contando com níveis máximos de 1,32 m na sizígia e 0,53 m na quadratura na região próxima à embocadura da laguna Mundaú (estação B). Na porção sul da laguna Mundaú (estação D), percebe-se uma atenuação da amplitude, com máximas de 0,50 m na sizígia e 0,23 m na quadratura.

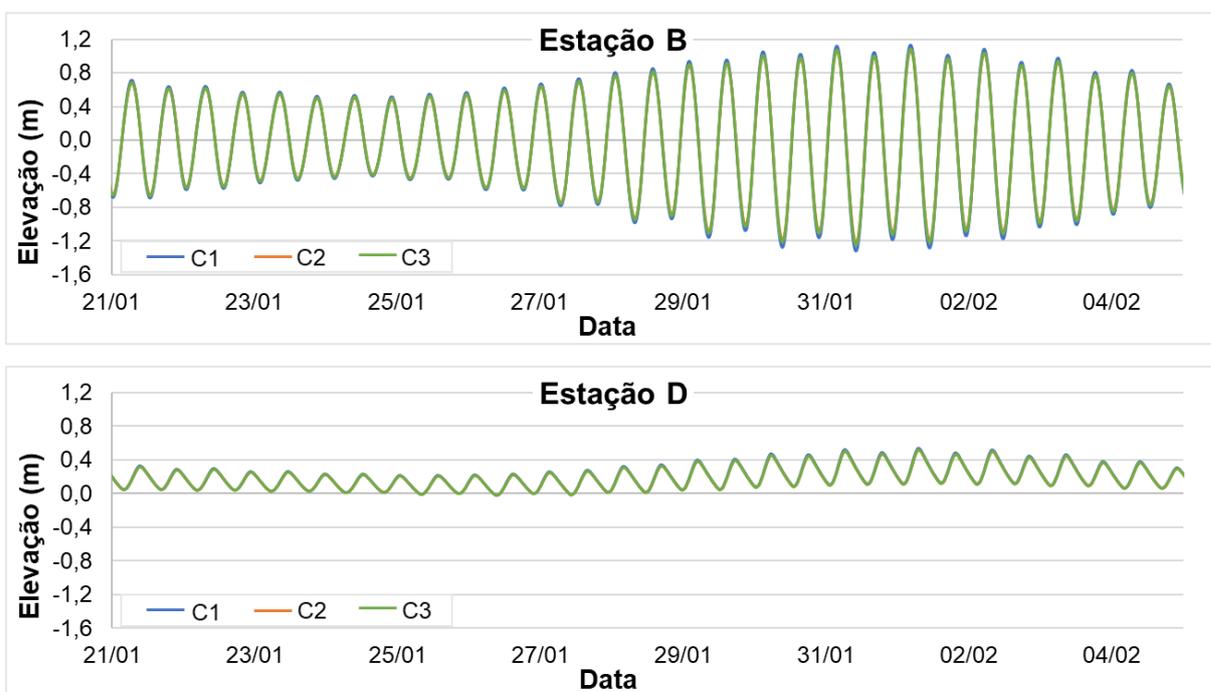


Figura 6.11 - Elevações da superfície livre das estações de controle B e D, representativas da região próxima à embocadura e a porção sul da laguna Mundaú, para os cenários C1, C2 e C3 no período seco (21/01 a 05/02)

Quando a embocadura da laguna Manguaba encontra-se fechada, no cenário C1, as trocas de águas ocorrem apenas através da embocadura próxima à laguna Mundaú. Nos C2 e C3, as embocaduras estão ramificadas, favorecendo as trocas de águas e, como consequência, ocorre um aumento da amplitude da maré quando comparados ao C1, nas estações G e I, na laguna Manguaba (Figura 6.12). A porção sul da laguna Manguaba, estação I, possui os menores valores de elevações da superfície livre e poucas diferenças entre os cenários.

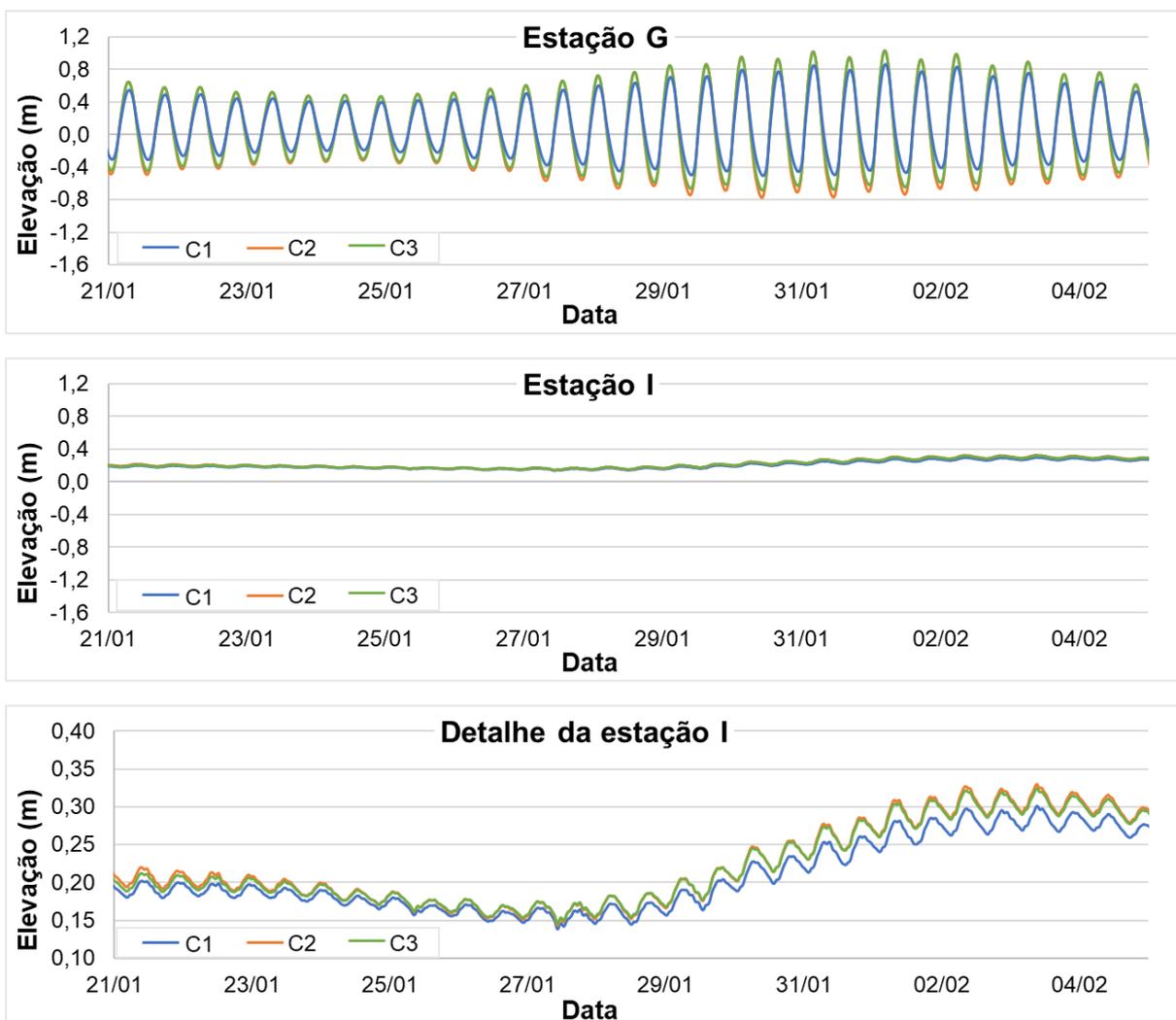


Figura 6.12 - Elevações da superfície livre das estações de controle G e I, representativas da região próxima à embocadura e a porção sul da laguna Manguaba, para os cenários C1, C2 e C3 no período seco (21/01 a 05/02), com detalhe da estação I

No período chuvoso (Figura 6.13), o comportamento é semelhante ao período seco, com poucas diferenças entre os cenários, exceto na região do canal de ligação da laguna Manguaba, na estação G, que continua apresentando maiores elevações no cenário C2, seguido pelos cenários C3 e C1.

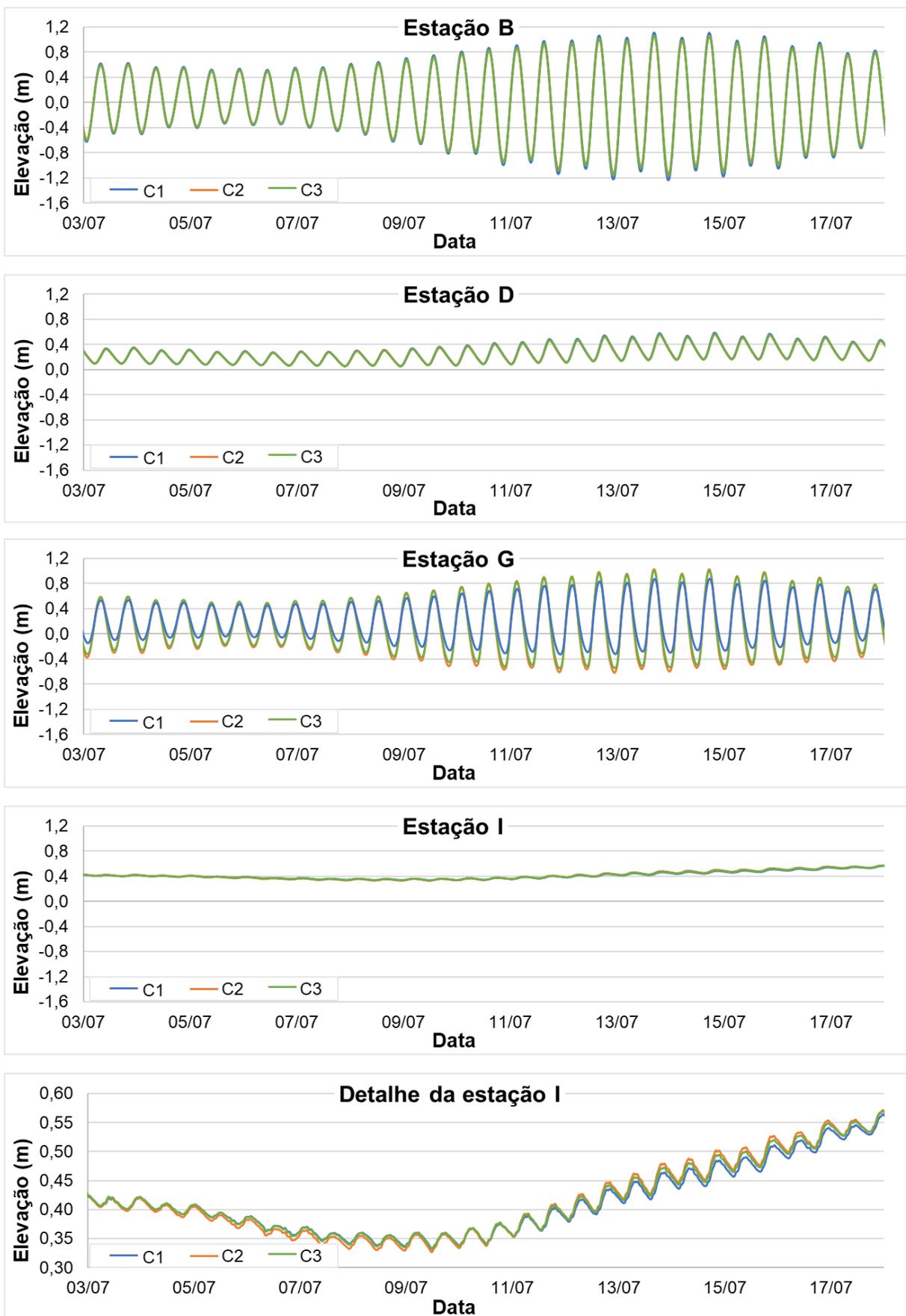


Figura 6.13 - Elevações da superfície livre das estações de controle B, D, G e I para os cenários C1, C2 e C3 no período chuvoso (03/07 a 18/07)

As Figura 6.14 e Figura 6.15 apresentam os resultados de elevações para dois ciclos de marés no período de sizígia, para o C1, evidenciando o amortecimento e a defasagem da onda de maré à medida que se propaga para o interior das duas lagunas. A distorção da maré ocorre, segundo Nicolite et al (2009), devido ao atrito com o fundo, à compressão das margens dos canais, à configuração da costa e à baixa profundidade do canal. Como a amplitude da onda de maré diminui ao longo do complexo, pode-se dizer que o CELMM é um sistema hiposíncrono (NICHOLS; BIGGS, 1985). O mesmo comportamento é observado nos outros cenários.

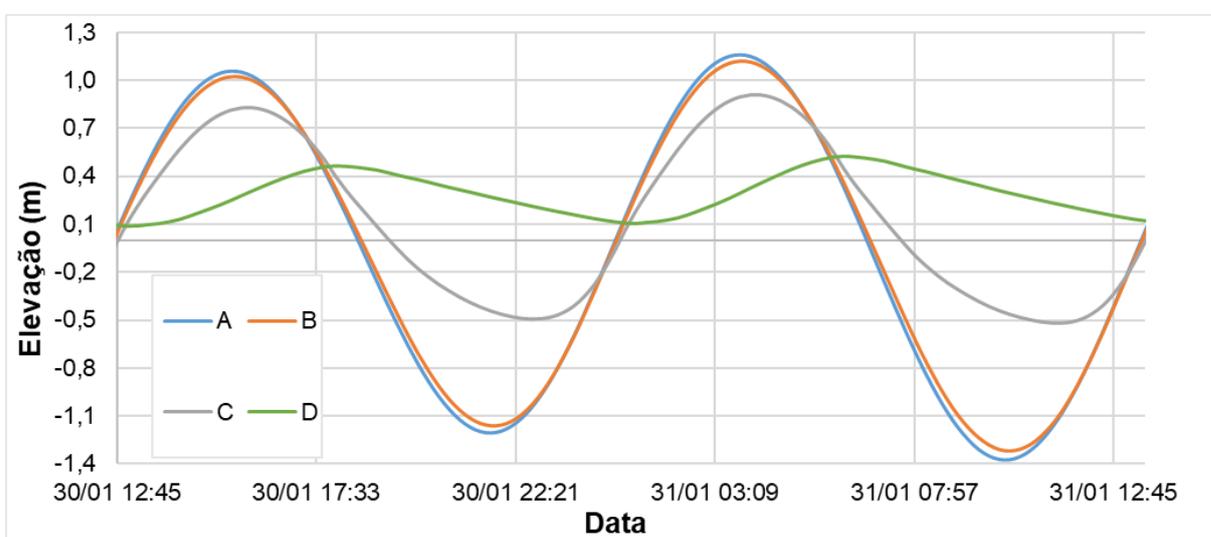


Figura 6.14 - Elevações da superfície livre nas estações de controle A a D, inseridas na laguna Mundaú, para dois ciclos de maré de sizígia para o C1

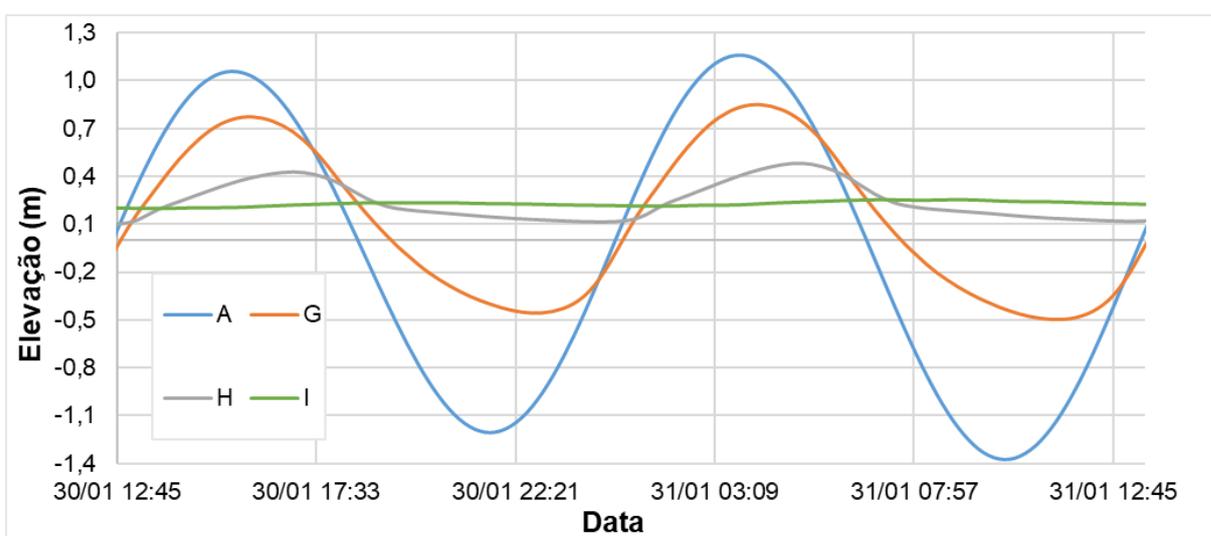


Figura 6.15 - Elevações da superfície livre nas estações A, G, H e I, inseridas na laguna Manguaba, para dois ciclos de maré de sizígia para o C1

Os valores das amplitudes máximas da maré para os três cenários podem ser vistos na Figura 6.16, para os períodos seco e chuvoso, nos períodos de marés de sizígia e quadratura. É possível observar também o efeito do amortecimento da onda de maré; na região próxima à embocadura da laguna Mundaú (estação B), a amplitude máxima da maré é 2,44 m, durante o período seco de sizígia para o cenário C1, diminuindo para 0,41 m na porção sul da laguna Mundaú (estação D). Já na laguna Manguaba, a amplitude máxima da maré é de 1,79 m na região próxima à embocadura (estação G), durante o período seco para o cenário C2, chegando a 0,03 m ao sul da laguna Manguaba (estação I).

Nota-se que o cenário que apresenta as maiores amplitudes máximas da maré em Mundaú é o C1, principalmente na região dos canais, devido à configuração de embocadura da região que favorece a entrada de águas no cenário C1. Na laguna Manguaba é o C2, corroborando com os resultados encontrados nas séries temporais de elevações da superfície livre, indicando que a ramificação das embocaduras favorece as trocas de águas na região da laguna Manguaba. As diferenças entre os cenários C2 e C3 podem ser explicadas devido à presença de um esporão arenoso na embocadura de 2017 (Figura 3.5), prejudicando a entrada das águas nessa região.

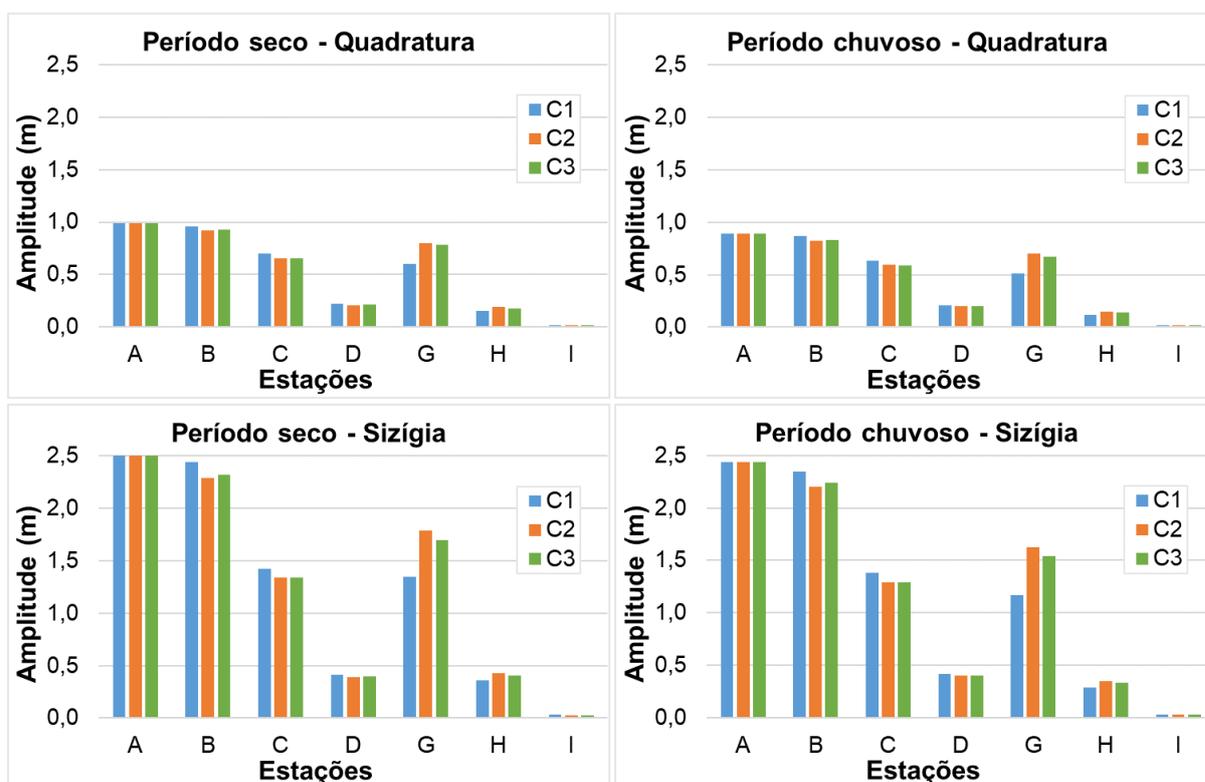


Figura 6.16 - Amplitudes de marés das estações A até I para os períodos seco e chuvoso e ciclos de sizígia e quadratura dos cenários C1, C2 e C3

A Tabela 6.1 mostra a porcentagem de amortecimento da amplitude máxima da maré, tendo como referência a região costeira adjacente (estação A), para as três diferentes embocaduras. A porcentagem de amortecimento chega a 84,5% na laguna Mundaú (estação D) no cenário C2 e a 98,9 % na laguna Manguaba (estação I) no cenário C1. Oliveira e Kjerfve (1993) encontraram porcentagens próximas, com amortecimentos de 88% para a laguna Mundaú e 98% para a laguna Manguaba, em relação à amplitude do porto de Maceió, indicando que o sistema de canais é um filtro eficiente na redução da amplitude dentro das lagoas e que a maré entra com mais facilidade na laguna Mundaú em comparação com a laguna Manguaba. Nas embocaduras das lagoas, percebe-se que na laguna Mundaú (estação B) as porcentagens encontradas na sizígia variam de 3,7% até 9,7% e na laguna Manguaba (estação G), as porcentagens estão na faixa entre 21,1% até 52,0%, indicando uma severa perda de carga no local, devido à menor profundidade do canal de ligação da laguna Manguaba.

Comparando os cenários, é constatado que no C1 ocorre uma diminuição do amortecimento da amplitude nas estações da laguna Mundaú, portanto, a onda de maré entra no complexo mais facilmente na laguna Mundaú no ano de 2006. Nas estações da laguna Manguaba, verifica-se que o C2 tem menores amortecimentos, seguido pelo C3, e por último, pelo C1.

Tabela 6.1 - Porcentagens de amortecimento da amplitude máxima de maré para os cenários C1, C2 e C3, nos períodos seco e chuvoso, considerando os ciclos de sizígia e quadratura

Local	Período Seco						Período Chuvoso					
	Quadratura			Sizígia			Quadratura			Sizígia		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
A	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B	2,8	7,3	6,4	3,7	9,7	8,2	2,9	7,4	6,4	3,9	9,7	8,2
C	29,6	33,6	33,9	43,7	47,2	47,2	29,3	33,5	33,7	43,5	47,1	47,0
D	77,9	78,8	78,4	83,8	84,5	84,2	76,2	77,3	77,1	82,8	83,6	83,3
G	39,0	18,9	20,8	46,9	29,3	33,1	43,0	21,1	24,3	52,0	33,3	36,9
H	84,2	80,6	81,9	85,6	83,0	84,0	86,7	83,6	84,4	88,1	85,6	86,4
I	98,2	97,9	98,1	98,8	98,6	98,8	98,2	97,8	98,0	98,9	98,7	98,8

6.2.3. Balanço dos volumes de entrada e saída

Para estabelecer a importância relativa entre os forçantes maré e descarga fluvial do sistema, foram calculados os volumes de entrada, definidos como o

volume de água do mar que entra no complexo lagunar durante a maré enchente e os volumes de saída, que correspondem ao volume de água que sai das lagoas durante a maré vazante, relacionados diretamente às descargas fluviais. Assim, é possível descrever a capacidade de renovação da massa d'água do sistema, indicando as trocas de água entre o sistema estuarino e a região costeira adjacente.

Para o cálculo dos volumes de entrada e saída do CELMM, as seções transversais S1, S2 e S3, localizadas nas entradas das lagoas, foram definidas (Figura 6.17).

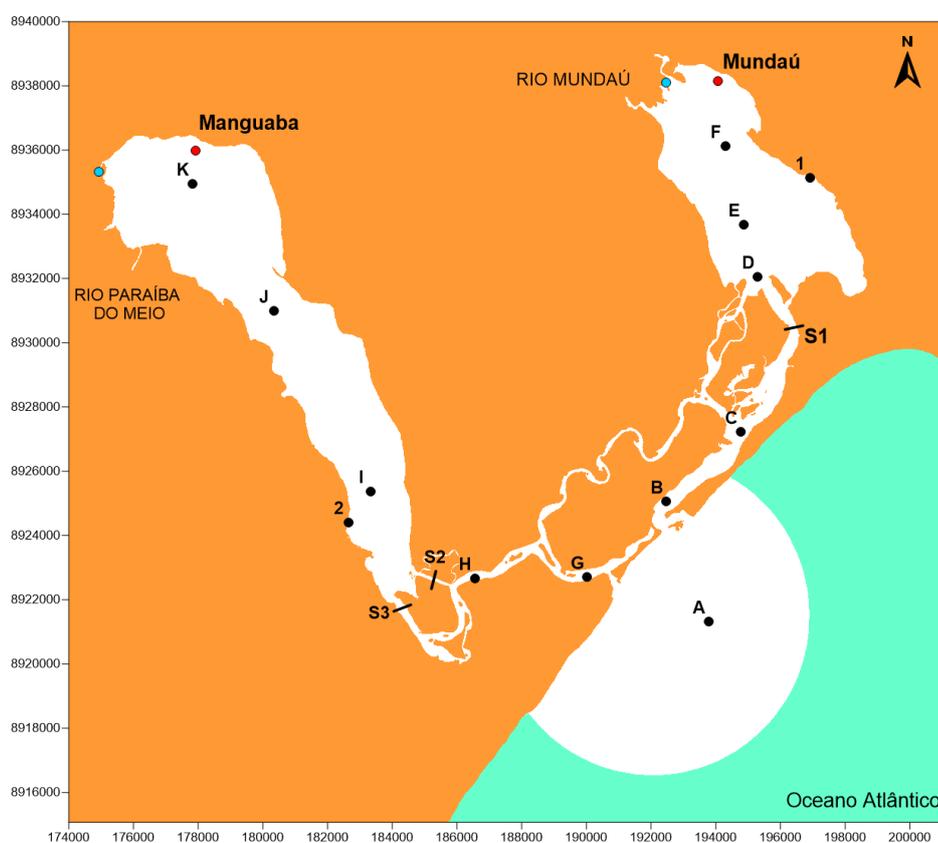


Figura 6.17 - Seções transversais S1, S2 e S3 consideradas para os cálculos dos volumes de entrada e saída dos cenários C1, C2 e C3

Os volumes calculados estão dispostos na Tabela 6.2. De maneira geral, os volumes de saída são maiores que os de entrada, ou seja, há uma tendência de vazante nas lagoas Mundaú e Manguaba, com exceção do período seco de sizígia na laguna Manguaba, que possui uma tendência de enchente devido à baixa descarga fluvial do rio Paraíba do Meio.

Tabela 6.2 - Volumes de entrada e saída para as lagoas Mundaú e Manguaba nos cenários C1, C2 e C3, considerando os dois períodos (seco e chuvoso) e os ciclos de sizígia e quadratura

Volumes de entrada (10 ⁶ m ³)							
Período	Maré	Manguaba			Mundaú		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
Seco	Quadratura	0,53	0,61	0,54	4,69	4,43	4,47
	Sizígia	1,18	1,51	1,38	8,64	8,20	8,25
Chuvoso	Quadratura	0,22	0,35	0,28	4,11	3,84	3,88
	Sizígia	1,04	1,39	1,24	8,68	8,22	8,30

Volumes de saída (10 ⁶ m ³)							
Período	Maré	Manguaba			Mundaú		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
Seco	Quadratura	0,64	0,77	0,71	4,85	4,66	4,69
	Sizígia	1,11	1,31	1,23	9,17	8,83	8,90
Chuvoso	Quadratura	1,32	1,46	1,42	5,13	4,89	4,91
	Sizígia	1,84	2,10	2,00	9,94	9,41	9,48

Nota-se que as maiores diferenças entre os cenários ocorrem nos volumes de entrada; na laguna Manguaba, o cenário C2 possui volumes mais elevados, seguido pelo cenário C3 e pelo cenário C1. Esse mesmo comportamento é observado nas elipses de marés e nas amplitudes, em que o cenário C2 tem uma configuração de embocadura que melhora as trocas de águas na laguna Manguaba. Na laguna Mundaú ocorre o inverso, ou seja, o C1 apresenta volumes mais elevados, seguido pelo C3 e, por último, o cenário C2. Ou seja, a configuração de embocadura de 2006, com uma entrada, aumenta as trocas de águas nessa região. Os menores volumes do cenário C2 na laguna Mundaú podem ser explicados devido à presença de um esporão arenoso no local, que pode ter dificultado à entrada das águas.

Observa-se também que as trocas de volumes da laguna Manguaba são inferiores aos da laguna Mundaú. Como as trocas de águas são menores, a vazão fluvial é pequena e o amortecimento da maré é maior na laguna Manguaba, esta laguna apresenta tempos de residências mais elevados, com áreas propensas ao acúmulo de poluentes.

6.3. Resultados do modelo de transporte lagrangeano

Nesta seção são apresentados os resultados para o cálculo do tempo de residência do modelo lagrangeano. A metodologia e as condições de contorno do modelo estão dispostas nas seções 4.2 e 5.3.

6.3.1. Tempo de residência

Para o cálculo do tempo de residência, duas simulações foram realizadas para cada cenário, representando os períodos chuvoso e de estiagem. Os parâmetros utilizados estão dispostos nas Figura A.2 e Figura A.3. Para o período seco, foram definidos os meses de janeiro, fevereiro e março (01/01 até 31/03). Já para o período chuvoso, os meses de junho, julho e agosto (01/06 até 29/08) foram utilizados. As partículas foram dispostas com espaçamento 100 x 100 metros e distribuídas nas lagunas e nos canais de ligação.

As Figura 6.18, Figura 6.19 e Figura 6.20 representam as posições das partículas nos instantes finais de simulações do período seco para os três cenários. As partículas com tons de azul mostram as regiões em que as partículas foram absorvidas e os tons de preto exibem as partículas presentes na água no final dos 90 dias de simulação.

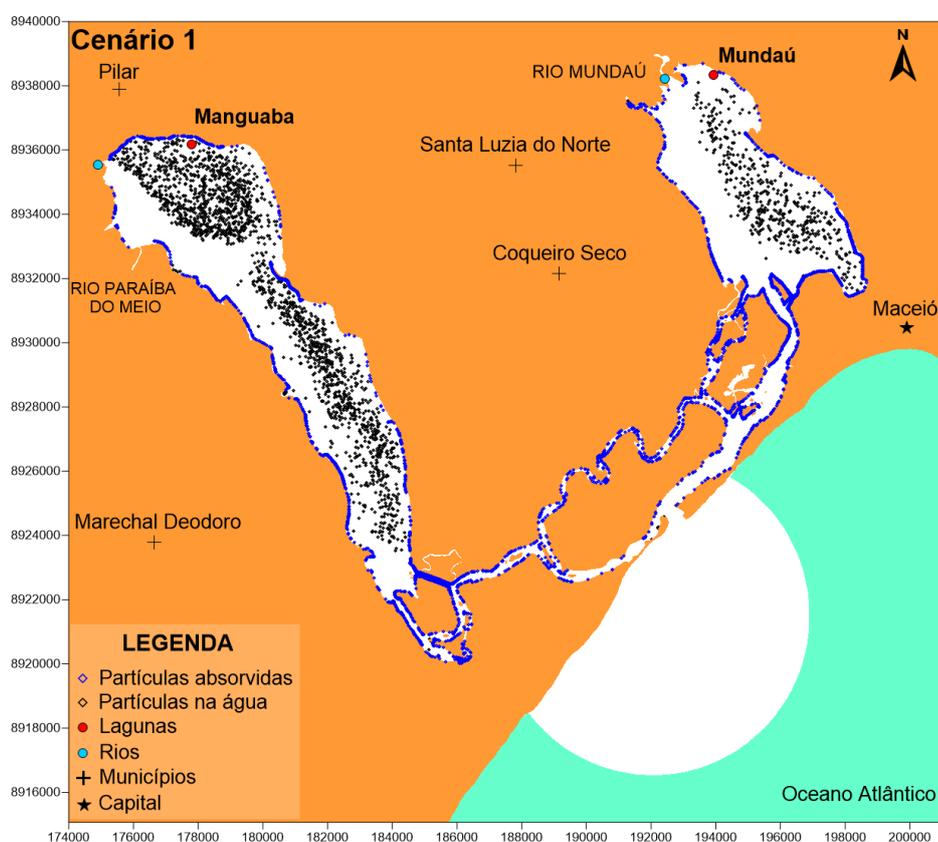


Figura 6.18 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C1

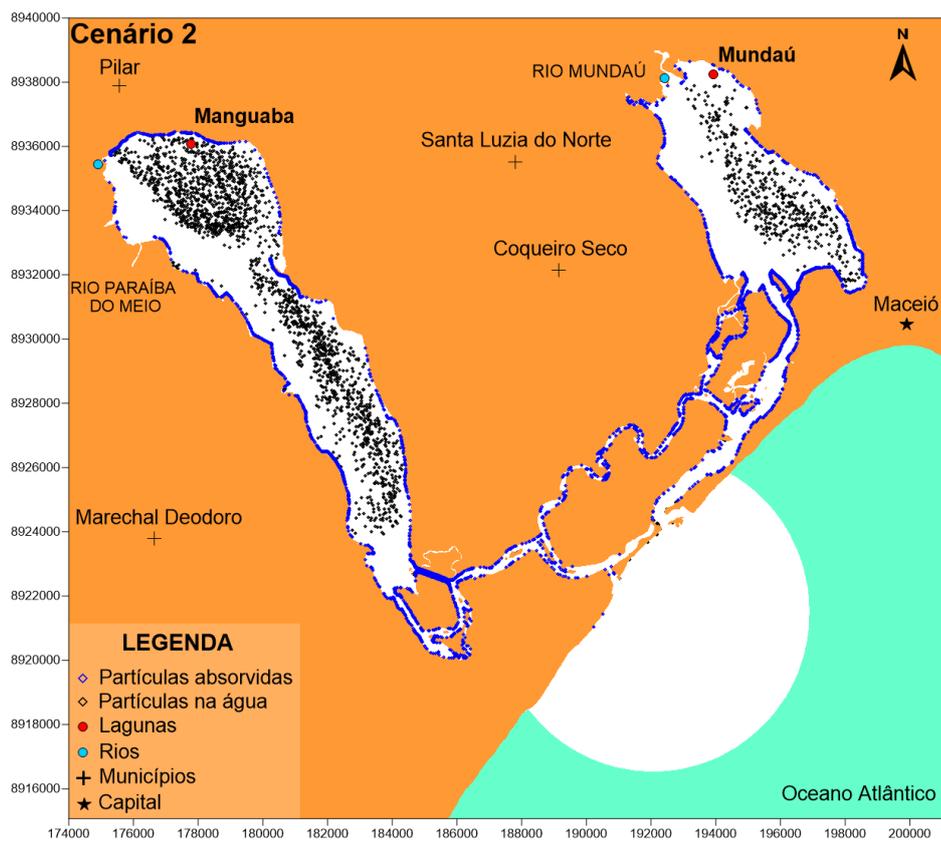


Figura 6.19 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C2

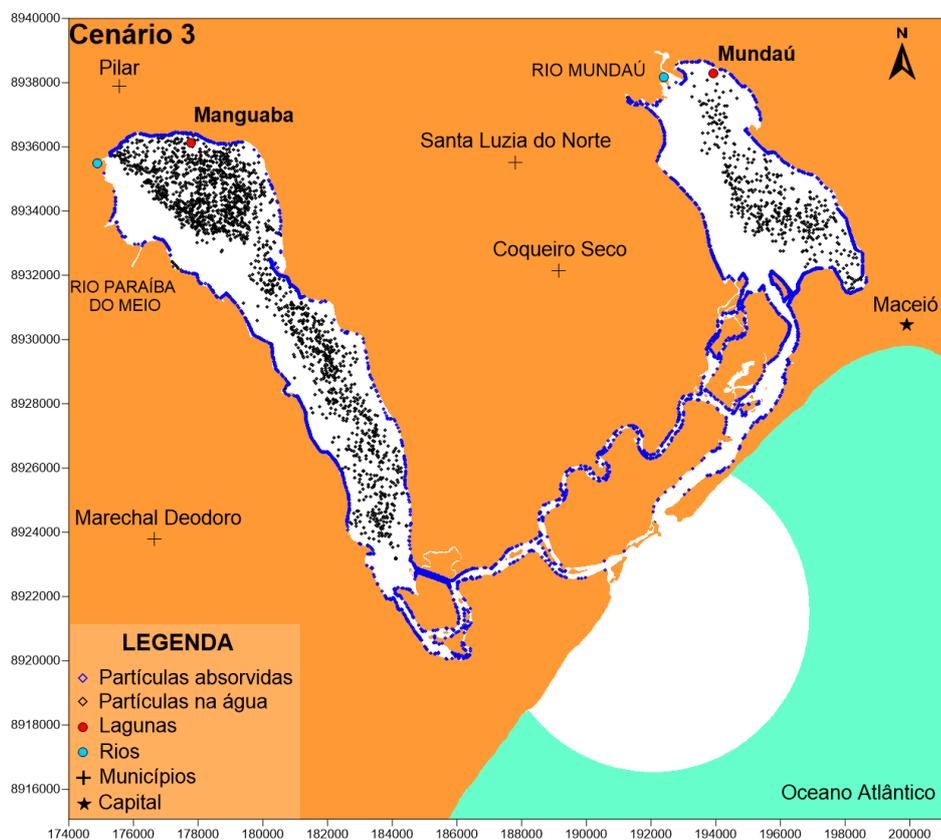


Figura 6.20 - Posição das partículas no instante final da simulação para o período seco no cenário C3

Os resultados das posições das partículas, quando analisados conjuntamente com as isolinhas do tempo de residência, indicam áreas de estagnação, propensas ao acúmulo de substâncias dissolvidas na água. Para todos os cenários, verifica-se que as partículas se concentram no interior das lagoas, principalmente na laguna Manguaba. Na laguna Manguaba, as partículas estão concentradas em toda a extensão da laguna. Na laguna Mundaú, há uma presença significativa de partículas nas porções leste e sul. Nota-se também a existência de partículas absorvidas ao longo das margens das lagoas e nos canais de ligação. Esses resultados estão coerentes com os encontrados por Lima (2017), que identificou as regiões ao leste da laguna Mundaú e em toda a extensão de Manguaba como suscetíveis a problemas de qualidade de água. Neste estudo foi considerado a absorção total das partículas nas margens das lagoas e dos canais, o que pode explicar TR menores nestas regiões.

As Figura 6.21, Figura 6.22 e Figura 6.23 mostram os tempos de residência dos cenários C1, C2 e C3 para o período seco, pelo método de interpolação vizinho mais próximo. As partículas que não saíram do sistema no final da simulação ficam com o tempo de residência correspondente a 90 dias.

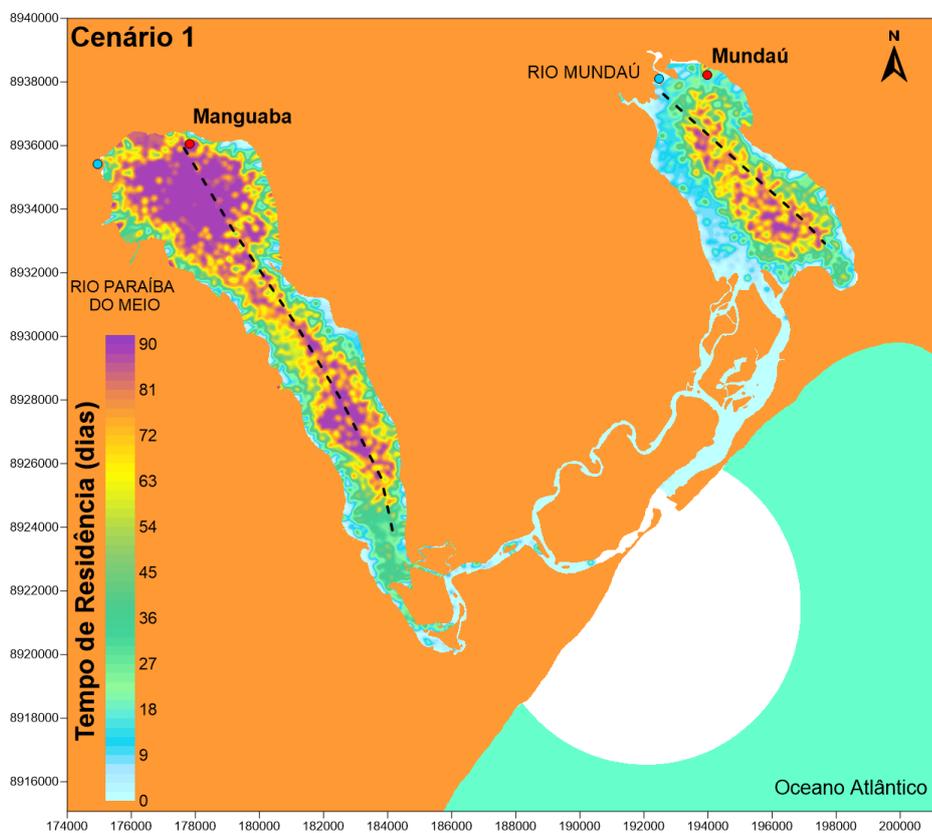


Figura 6.21 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C1 e indicação dos perfis longitudinais

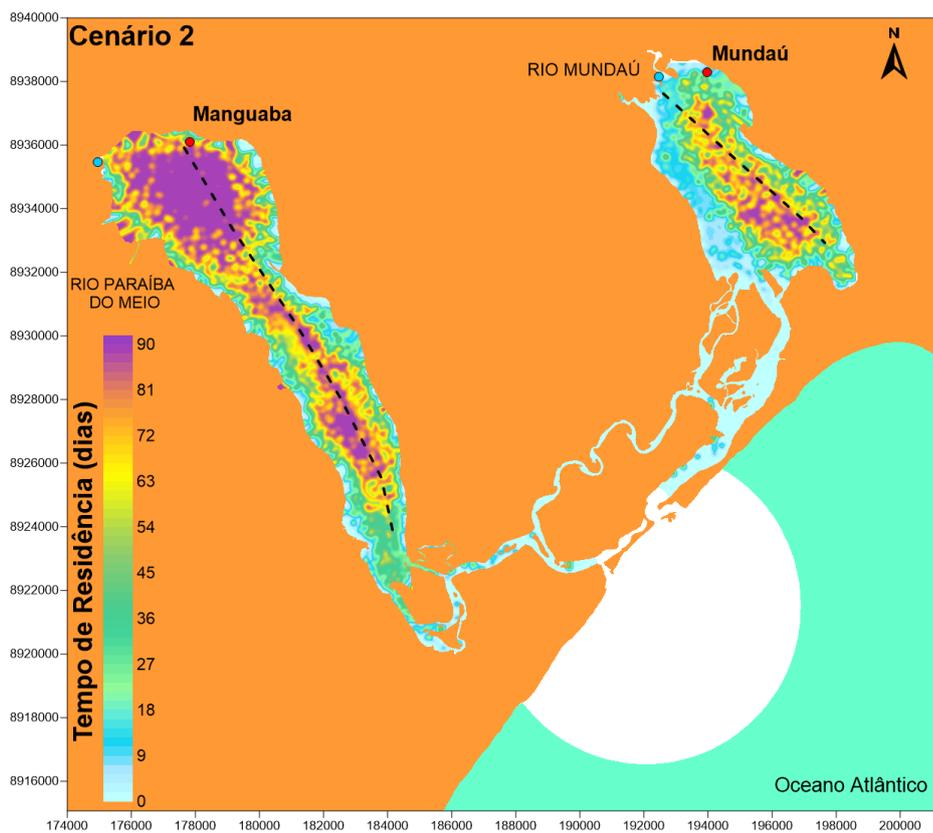


Figura 6.22 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C2 e indicação dos perfis longitudinais

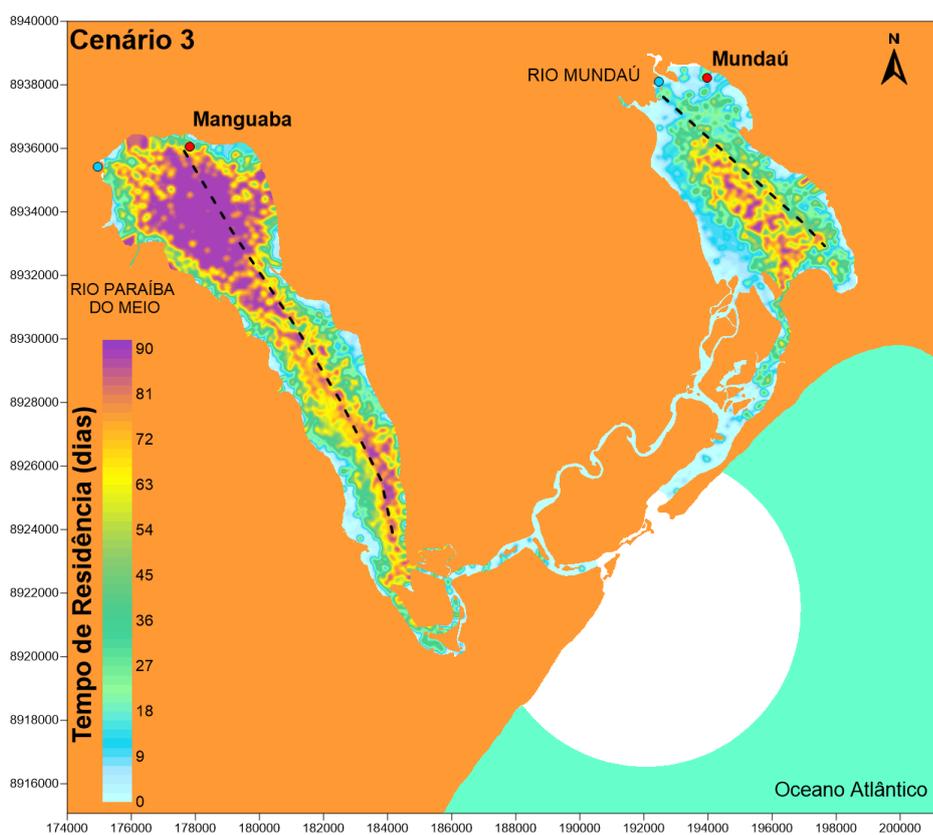


Figura 6.23 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para o cenário C3 e indicação dos perfis longitudinais

De forma geral, a laguna Mundaú possui tempos de residência mais elevados na região central, com valores entre 63 a 90 dias. Esses valores são inferiores nas áreas próximas às margens, com tempos de residência menores que 20 dias. A laguna Manguaba possui tempos de residência em torno de 63 a 90 dias em quase toda a sua extensão. Nos canais, o tempo de residência varia, geralmente, entre 0 a 15 dias, com algumas regiões de tempos de residência de até 45 dias.

São apresentados também perfis longitudinais de TR nas lagunas Mundaú e Manguaba (Figura 6.24 e Figura 6.25). Os perfis foram interpolados pelo método de Kriging. Na laguna Mundaú, o tempo de residência para o cenário C3 é inferior aos outros cenários, principalmente nas porções central e norte da laguna. O tempo de residência chega a 65 dias nesse cenário; os cenários C1 e C2 apresentam tempos de residência de até 80 dias. É possível definir três compartimentos na laguna: a região norte, próxima ao exutório do rio Mundaú, com tempos de residência de até 20 dias, onde as trocas de massas d'água são favorecidas pelo aporte fluvial; a porção intermediária, com TR entre 50 a 80 dias; e a região próxima à entrada do canal de ligação, com tempos de residência em torno de 40 dias; neste local, as trocas de massas d'água são favorecidas pela maré.

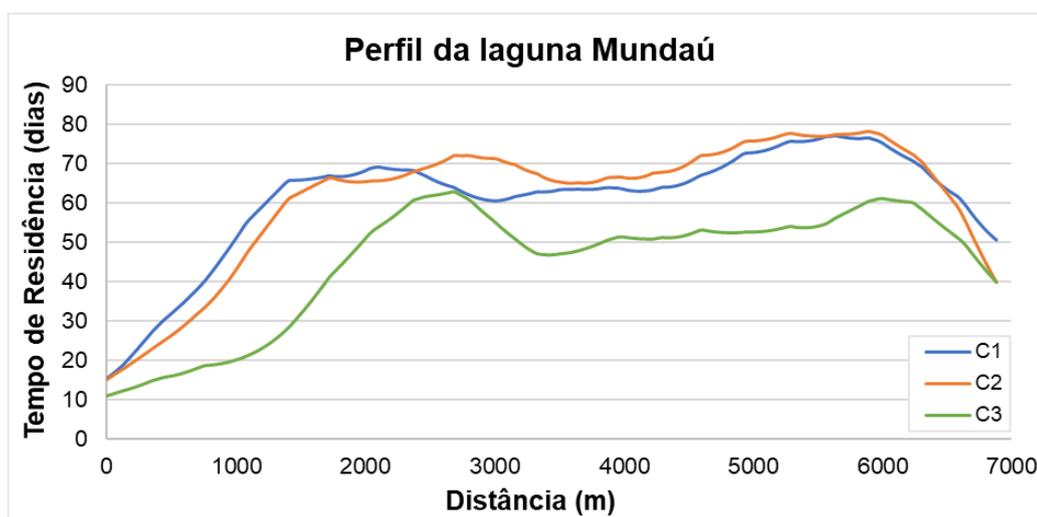


Figura 6.24 - Perfil longitudinal da laguna Mundaú para os cenários C1, C2 e C3 no período seco. Distância do norte da laguna ao sul.

No perfil longitudinal de TR na laguna Manguaba é possível visualizar que as maiores diferenças entre os cenários ocorrem na porção sul da laguna, com tempos de residência mais elevados no cenário C3, entre 60 a 70 dias; e valores menores nos C2 e C1, entre 25 a 60 dias. Percebe-se que as configurações de embocaduras

redistribuem espacialmente as trocas de água, principalmente nas regiões próximas ao canal, diminuindo o tempo de residência. Dois compartimentos podem ser definidos na laguna: a região sul da laguna, com relativa influência da maré e tempos de residência em torno de 25 a 70 dias; e a porção norte, próxima ao rio Paraíba do Meio, com tempos de residência em torno de 60 a 90 dias; nesta região o aporte fluvial é dominante e as vazões do rio Paraíba do Meio não são suficientes para gerar trocas significativas.

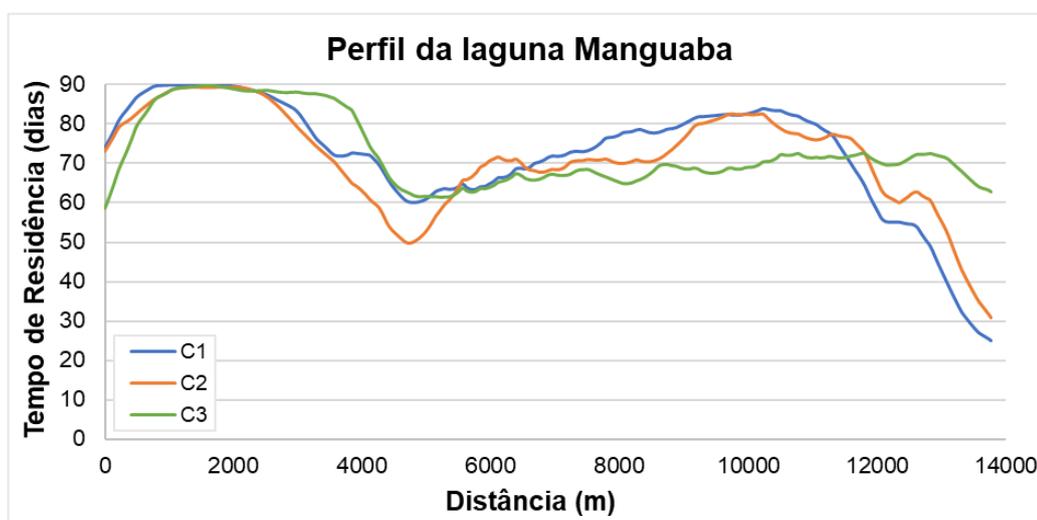


Figura 6.25 - Perfil longitudinal da laguna Manguaba para os cenários C1, C2 e C3 no período seco. Distância do norte da laguna ao sul.

As distribuições das partículas nos instantes finais de simulações do período chuvoso são mostradas da Figura 6.26 a Figura 6.28. Assim como no período seco, as partículas em azul são as partículas absorvidas e as com tons de preto são as partículas presentes na água. No interior da laguna Manguaba, as partículas estão acumuladas na porção norte. Já na laguna Mundaú, as partículas ficam reunidas em toda a parte leste da laguna. As partículas absorvidas ocupam praticamente todas as margens das lagunas e os canais de ligação. O período chuvoso apresenta menos partículas que o período seco no final da simulação. A maioria das partículas foram absorvidas, principalmente na região dos canais; outras saíram do domínio de modelagem.

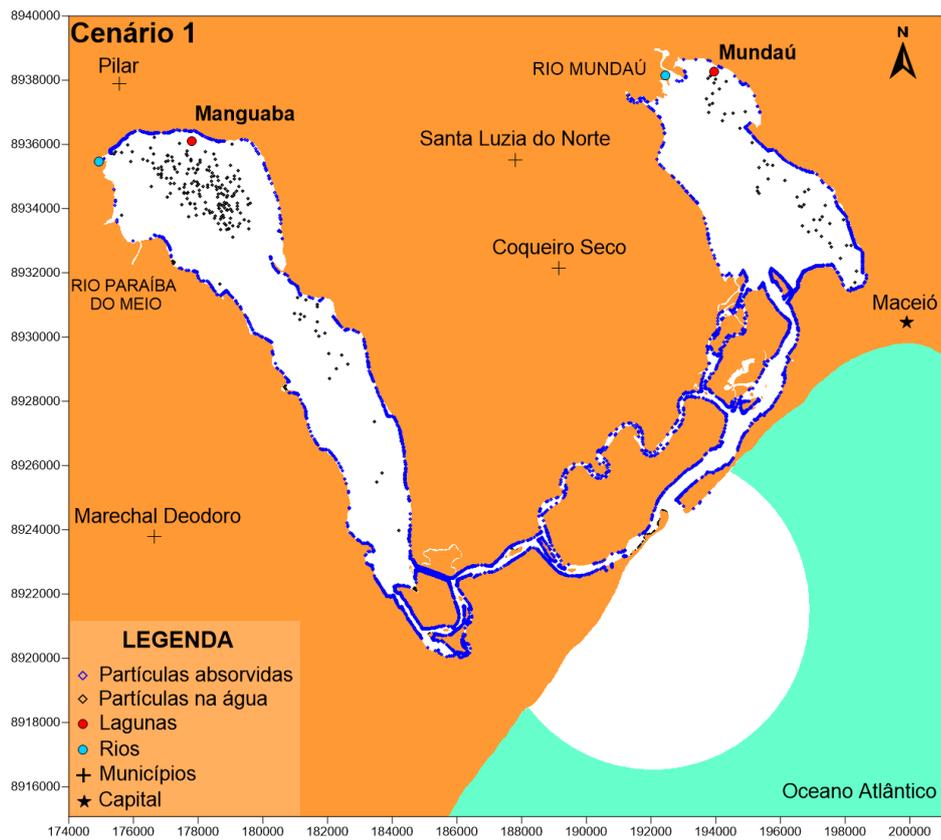


Figura 6.26 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C1

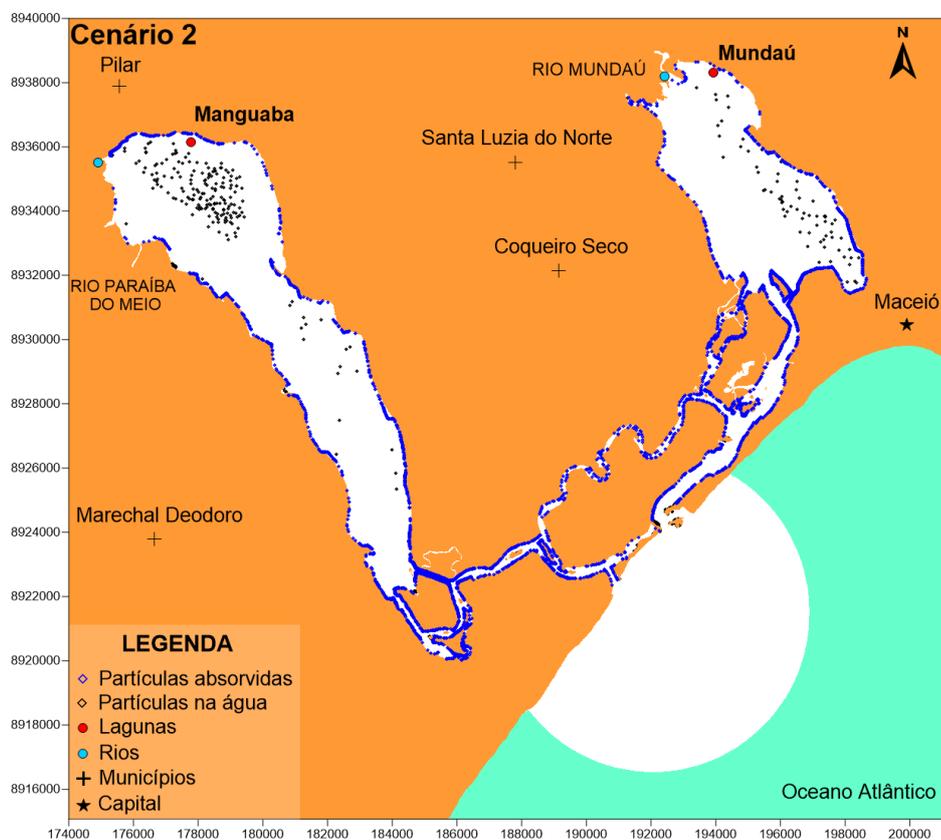


Figura 6.27 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C2

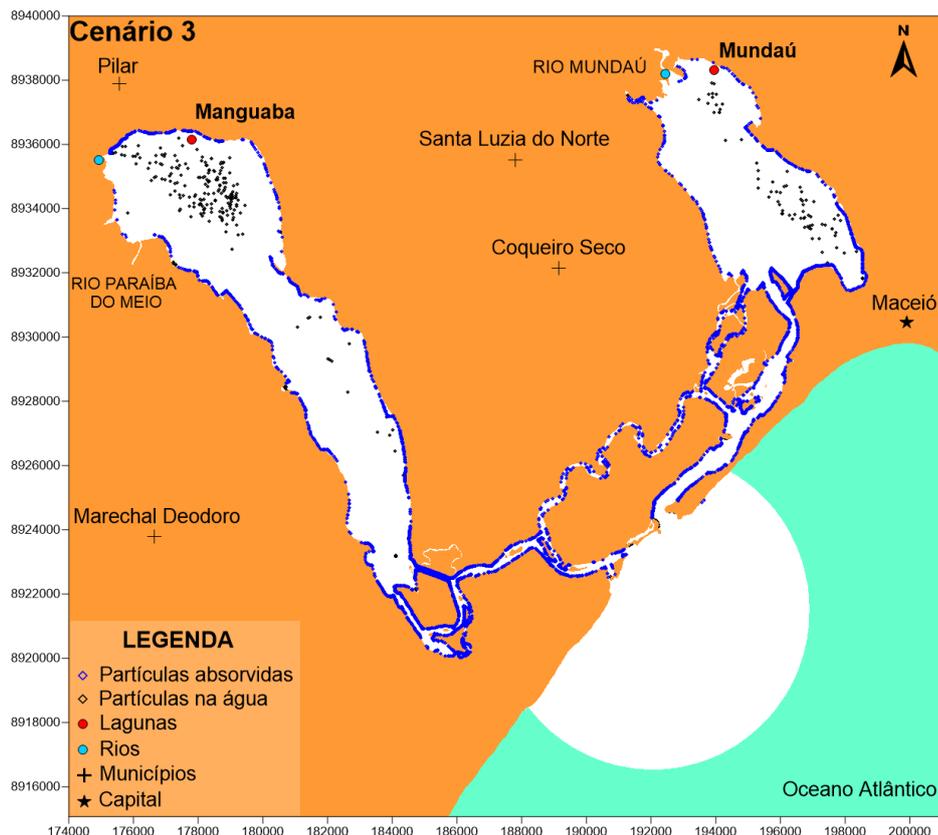


Figura 6.28 - Posição das partículas no instante final da simulação do período chuvoso no cenário C3

As Figura 6.29, Figura 6.30 e Figura 6.31 expõem os tempos de residência para o período chuvoso, considerando os cenários C1, C2 e C3 e as demarcações dos perfis longitudinais utilizados. O método de interpolação vizinho mais próximo foi utilizado para a apresentação dos resultados das isolinhas de TR.

Na laguna Mundaú, as partículas ficaram retidas na porção leste da laguna, então nessa área os tempos de residências são mais elevados, de 30 a 72 dias, com algumas regiões com tempos de residência de até 90 dias. A parte oeste da laguna Mundaú apresenta valores de tempos de residências inferiores a 15 dias. Em Manguaba, as porções central e sul da laguna, mais próximas dos canais, tem tempos de residência de cerca de 20 dias; na região norte, os valores ficam entre 36 e 90 dias.

Sant'Ana (2019) encontrou regiões de recirculação de água nas porções ao leste da laguna Mundaú e ao norte da laguna Manguaba. Esse resultado é coerente com o encontrado neste trabalho, em que os locais com a presença de vórtices possuem os maiores valores de tempos de residência.

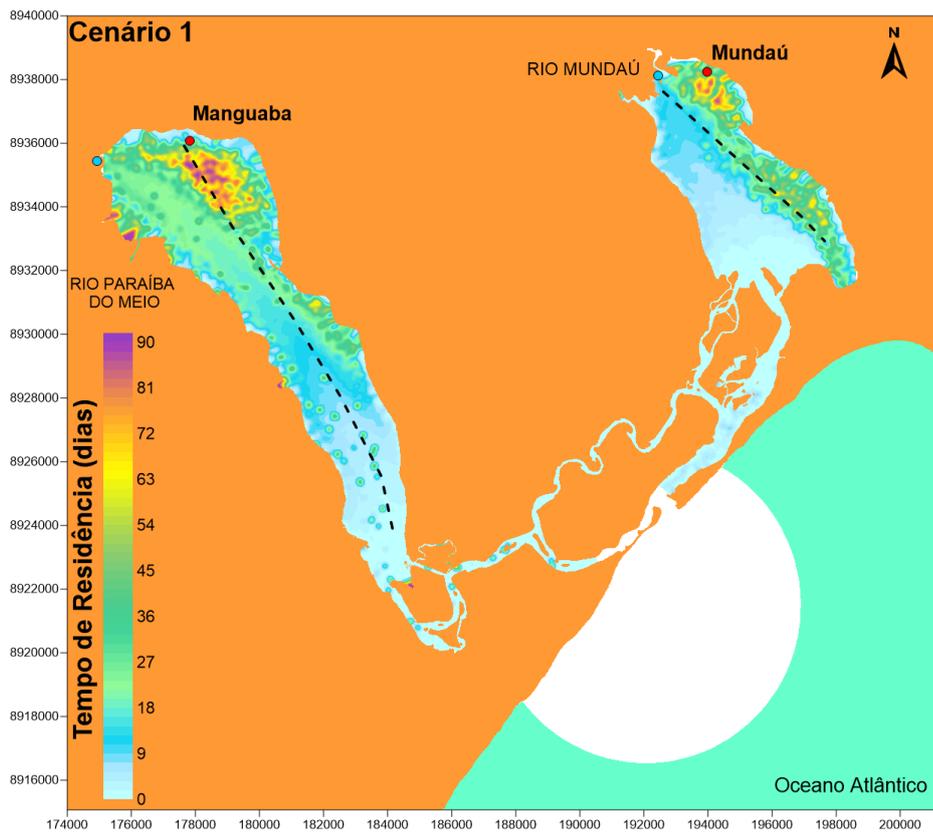


Figura 6.29 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C1 e indicação dos perfis longitudinais

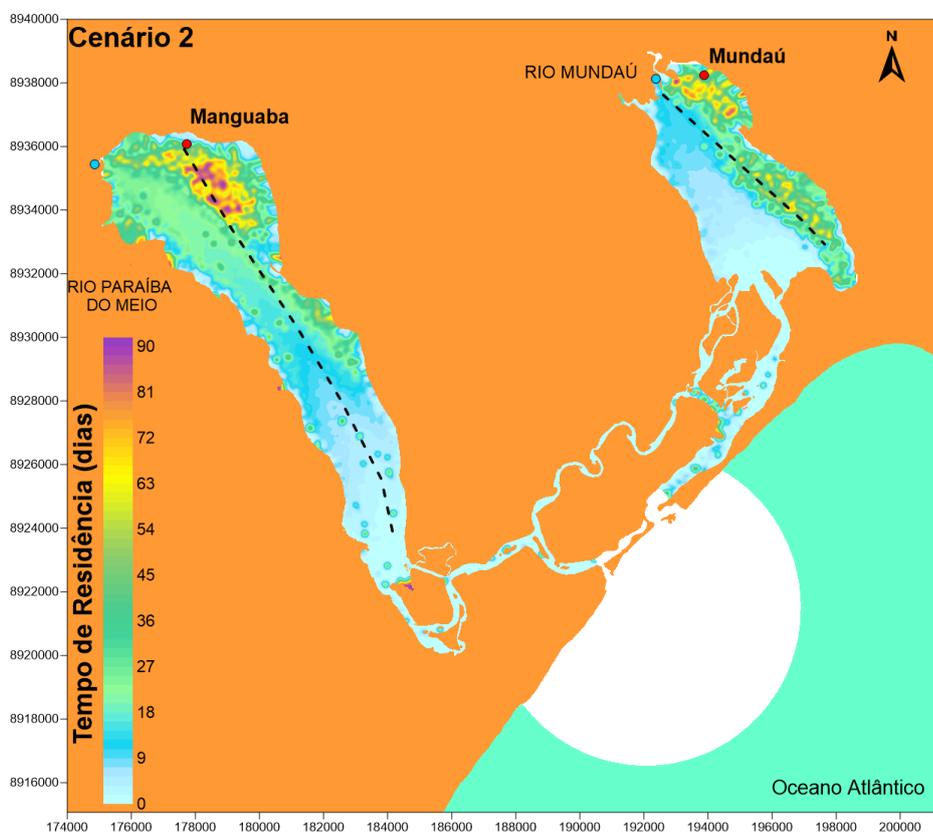


Figura 6.30 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C2 e indicação dos perfis longitudinais

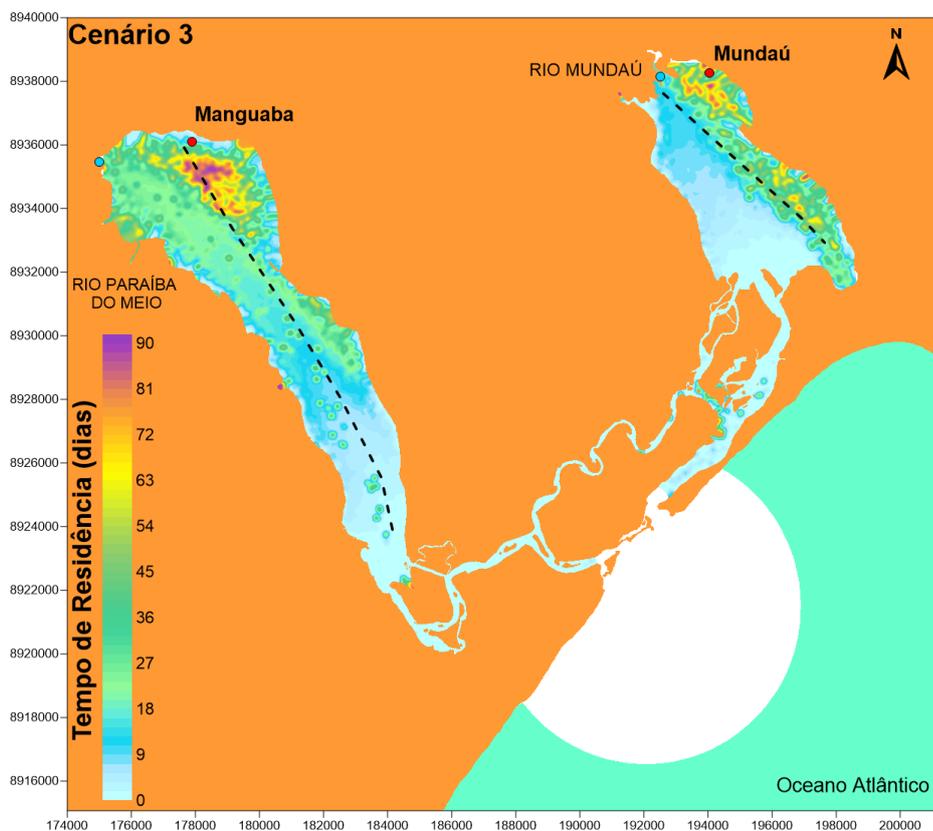


Figura 6.31 - Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para o cenário C3 e indicação dos perfis longitudinais

Perfis longitudinais também foram realizados para o período chuvoso, conforme a Figura 6.32, interpolados pelo método de Kriging. Não são percebidas diferenças significativas entre os cenários analisados.

Nota-se que a laguna Mundaú possui TR entre 10 e 20 dias na porção norte da laguna, devido à maior influência do rio Mundaú. Na região próxima ao canal de ligação, os tempos de residência chegam a 30 dias. A laguna Manguaba pode ser subdividida em dois compartimentos: a região norte da laguna, com valores entre 30 e 70 dias, devido à maior descarga fluvial do rio Paraíba do Meio no período chuvoso; e as regiões central e sul, com tempos de residência entre 0 e 20 dias.

Comparando os perfis longitudinais entre os períodos seco e chuvoso, percebe-se uma queda acentuada nos tempos de residência, indicando que a descarga fluvial interfere, de maneira significativa, nas trocas de massas d'água no CELMM. As áreas mais propícias à estagnação de poluentes são a região norte da laguna Manguaba e as porções leste e sul da laguna Mundaú.

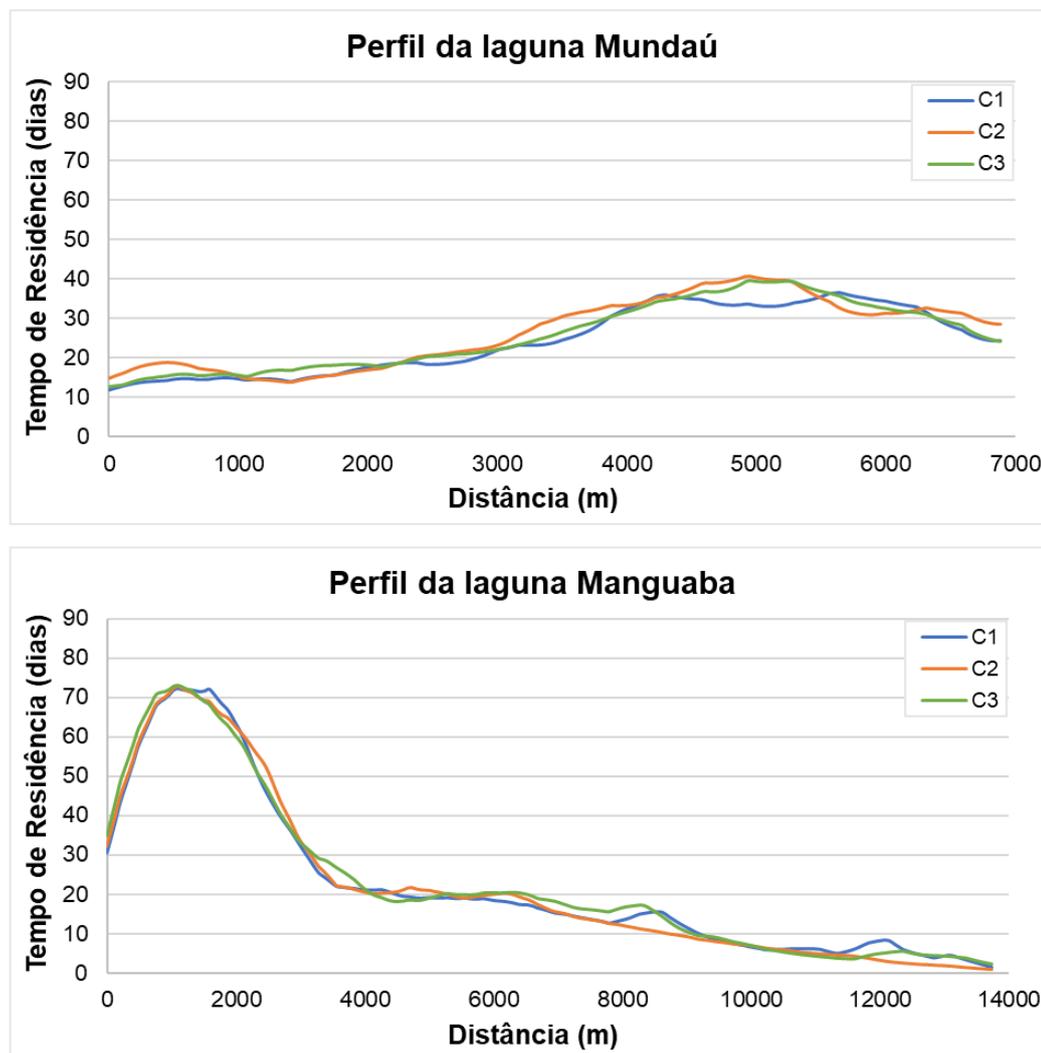


Figura 6.32 - Perfis longitudinais das lagunas Mundaú e Manguaba para os cenários C1, C2 e C3 no período chuvoso. Distância do norte das lagunas ao sul.

6.4. Resultados do modelo de transporte euleriano

Os resultados dos modelos de Taxa de Renovação e Idade da Água são apresentados a seguir, na forma de isolinhas e séries temporais. As condições iniciais e de contorno do modelo estão descritas no item 5.3 deste trabalho. Os parâmetros considerados para os modelos estão presentes da Figura A.4 a Figura A.8.

6.4.1. Taxa de renovação

Foram realizadas seis simulações para a taxa de renovação, abrangendo todos os três cenários de embocaduras (C1, C2 e C3) e os períodos seco e

chuvoso. Para o período seco, foi utilizado o intervalo de 01/01 até 31/03; e para o período chuvoso, o intervalo de 01/06 até 29/08.

Os resultados espaciais para o período seco, após os 90 dias de simulações, estão dispostos nas Figura 6.33, Figura 6.34 e Figura 6.35. Na laguna Mundaú, percebe-se que em todos os cenários as taxas de renovação das águas variam entre 80% e 100%, com índices relativamente menores no cenário C3. O canal de ligação entre a laguna e a região costeira (estações B e C) possui uma influência significativa da maré, e também apresentou taxa de renovação em torno de 80% em todos os cenários avaliados.

Já na laguna Manguaba e no canal de ligação com a região costeira, os resultados mostram que as taxas de renovação variam entre 50% e 80%, com diferenças mais perceptíveis nas porções central (estação J) e sul da laguna (estações I), representando uma taxa de renovação em torno de 50% no cenário C1; e taxas em torno de 60% nos C2 e C3. É notável que essas estações possuem maiores taxas de renovação nos cenários C2 e C3, quando comparados ao C1, já que nessas configurações, a embocadura está ramificada, favorecendo a entrada da maré na região, como discutido anteriormente.

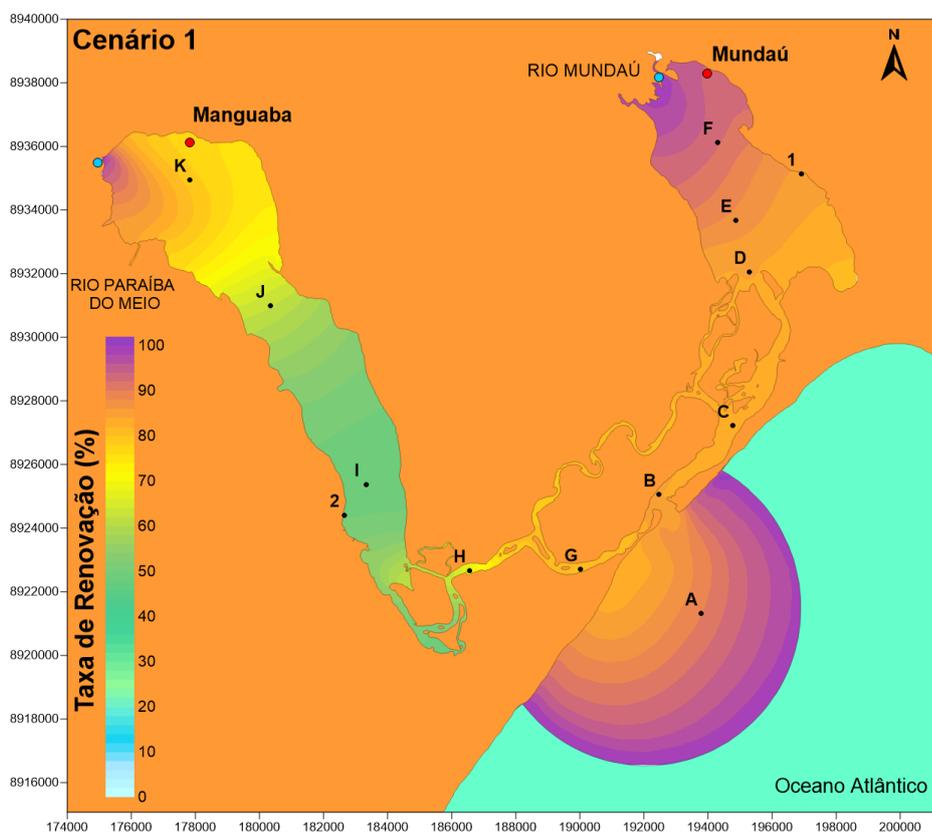


Figura 6.33 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C1

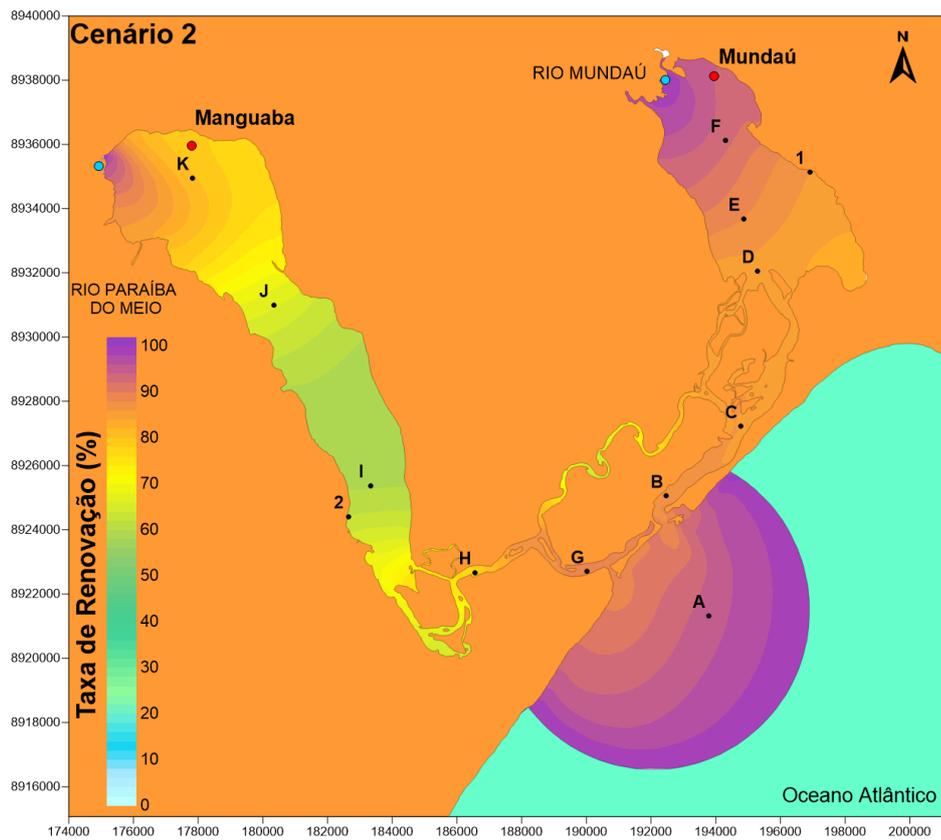


Figura 6.34 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C2

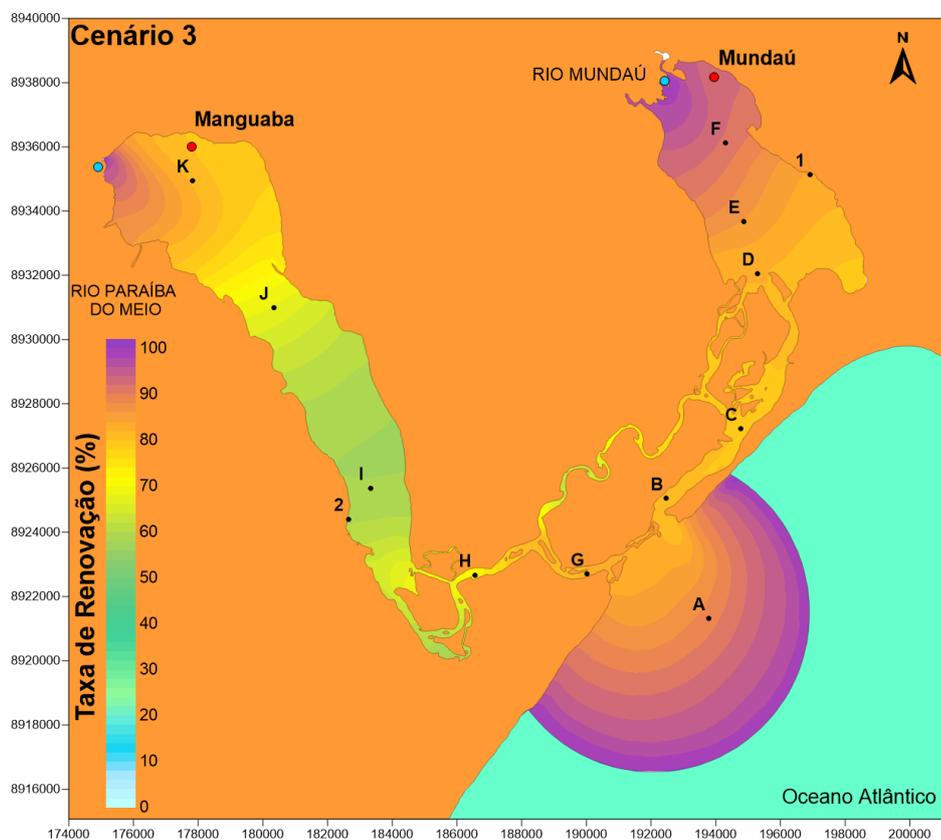


Figura 6.35 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período seco para o cenário C3

As séries temporais das taxas de renovação do período seco para as estações compreendidas no interior das lagunas (D, E, F, I, J e K) nos três cenários são apresentadas da Figura 6.36 a Figura 6.38. Para retratar as diferenças entre os cenários simulados, alguns resultados também são apresentados para os últimos 30 dias de simulação. As séries indicam também a porcentagem máxima dos valores e foram filtradas usando uma média móvel com o período de 24 horas para auxiliar na visualização dos resultados.

Como observado nas imagens, não há renovação completa das águas em todas as regiões durante o período de simulação realizado. Na laguna Mundaú, há poucas diferenças entre os cenários; o cenário C2 (2014) tem taxas mais elevadas; o cenário C1 tem taxas de renovação intermediárias e o C3 representa a pior situação. Na região sul da laguna (estação D), por exemplo, as diferenças chegam a 2,86% entre os cenários C2 e C3. Essas diferenças caem para 1,0 % na região norte (estação F), influenciada pelas descargas fluviais. Os resultados indicam que as diferentes configurações de embocaduras não influenciam de forma significativa a renovação das águas na laguna Mundaú no período seco.

Na laguna Manguaba (estações I, J e K) ocorrem diferenças mais significativas entre os cenários, com taxas de renovação mais elevadas no C2 e taxas menores no cenário C1, como foi verificado no amortecimento da maré e no balanço de volumes de entrada e saída.

Na região sul da laguna Manguaba (estação I), a água do cenário C2 é renovada cerca de 7,64% a mais que no C1. Essa diferença chega a 3,28% na região intermediária (estação J). A porção norte, que está mais próxima do rio Paraíba do Meio (estação K), tem as maiores taxas de renovação, na ordem de 82,07%, 81,51% e 81,12%, para os cenários C2, C3 e C1, respectivamente.

Percebe-se que a laguna Manguaba é mais propensa a problemas de qualidade de água, principalmente nas regiões central e sul (estação I e J). Essas porções têm menores taxas de renovação devido à menor influência das águas novas que chegam no sistema. A região sul tem uma influência relativa da maré, com taxas de renovação menores; e a região norte possui a atuação direta do rio Paraíba do Meio.

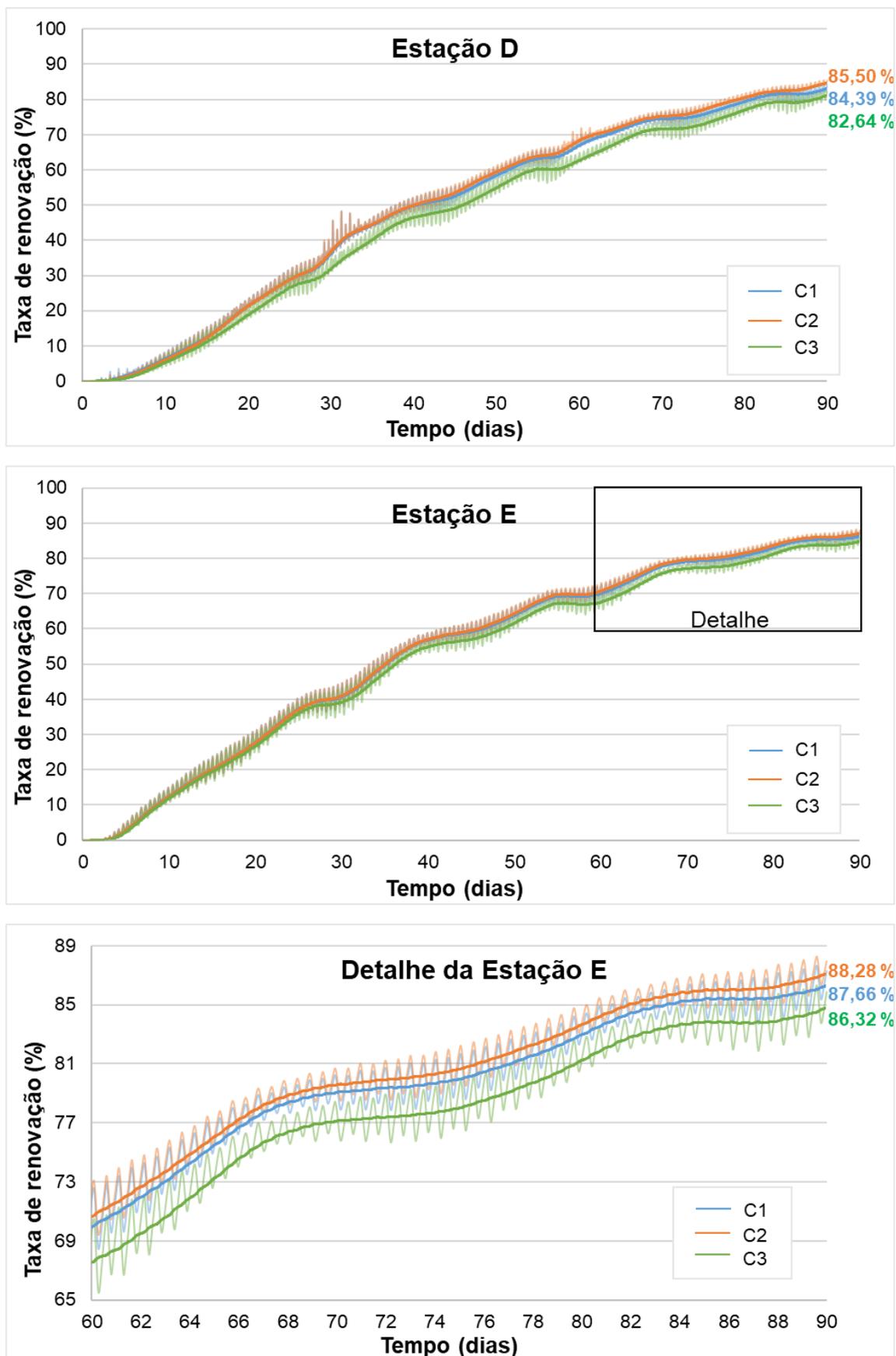


Figura 6.36 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação nas estações D e E da laguna Mundaú durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3

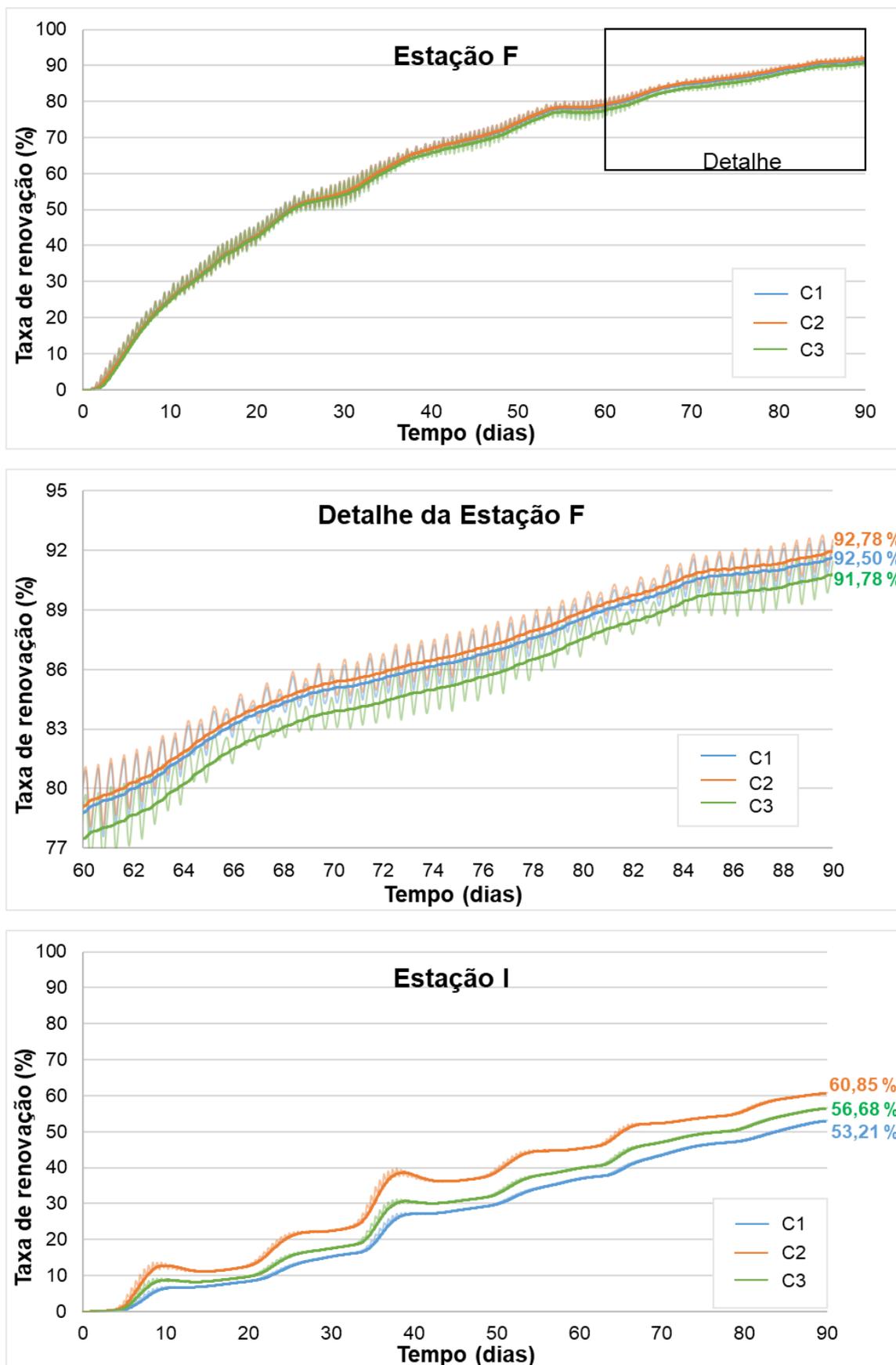


Figura 6.37 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação na estação F na laguna Mundaú e estação I na laguna Manguaba, durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3

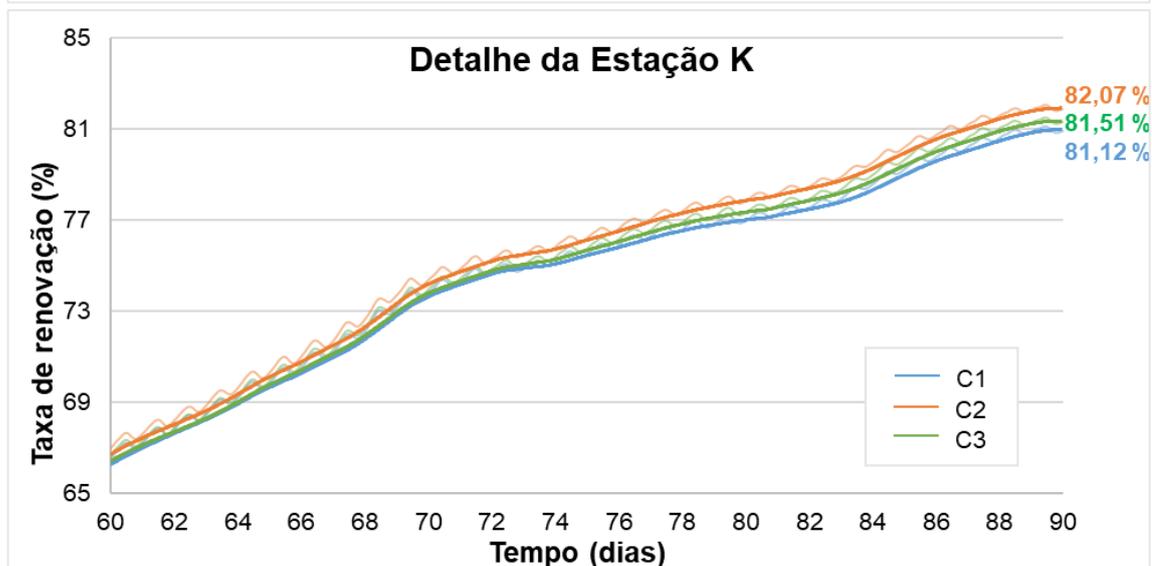
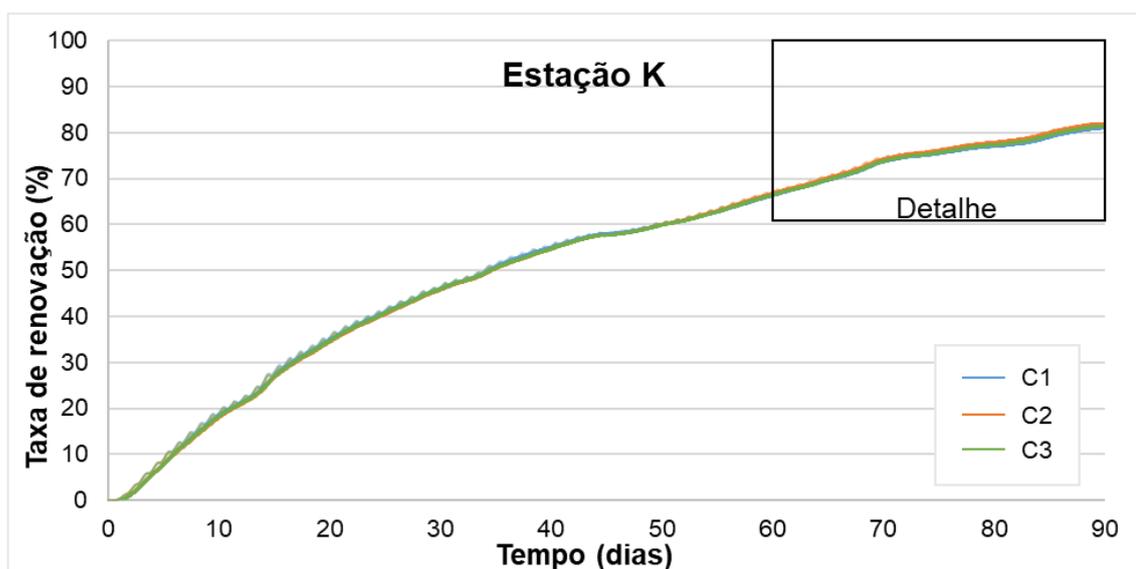
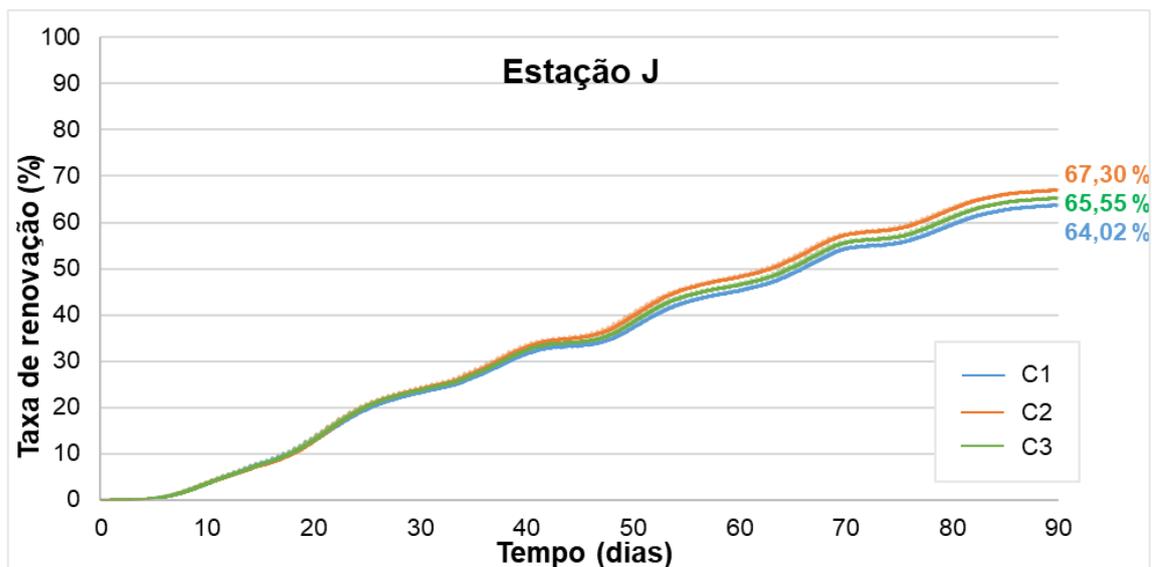


Figura 6.38 - Séries temporais e detalhes dos 30 dias finais de simulação da taxa de renovação nas estações J e K da laguna Manguaba, durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3

Os resultados espaciais para o período chuvoso, após os 90 dias de simulações, estão dispostos da Figura 6.39 a Figura 6.41. É possível identificar como a sazonalidade influencia na renovação das águas no CELMM. No período chuvoso, com ventos na direção sudeste e vazões elevadas, a taxa de renovação é mais alta ao longo de todo o complexo, do que no período seco, caracterizado por vazões baixas e por ventos mais intensos de direção leste. Percebe-se que as taxas de renovação variam entre 96% e 100% no final da simulação e que não existem variações significativas entre os cenários abordados. Assim, os efeitos das diferentes embocaduras podem ser visualizados apenas durante o período seco.

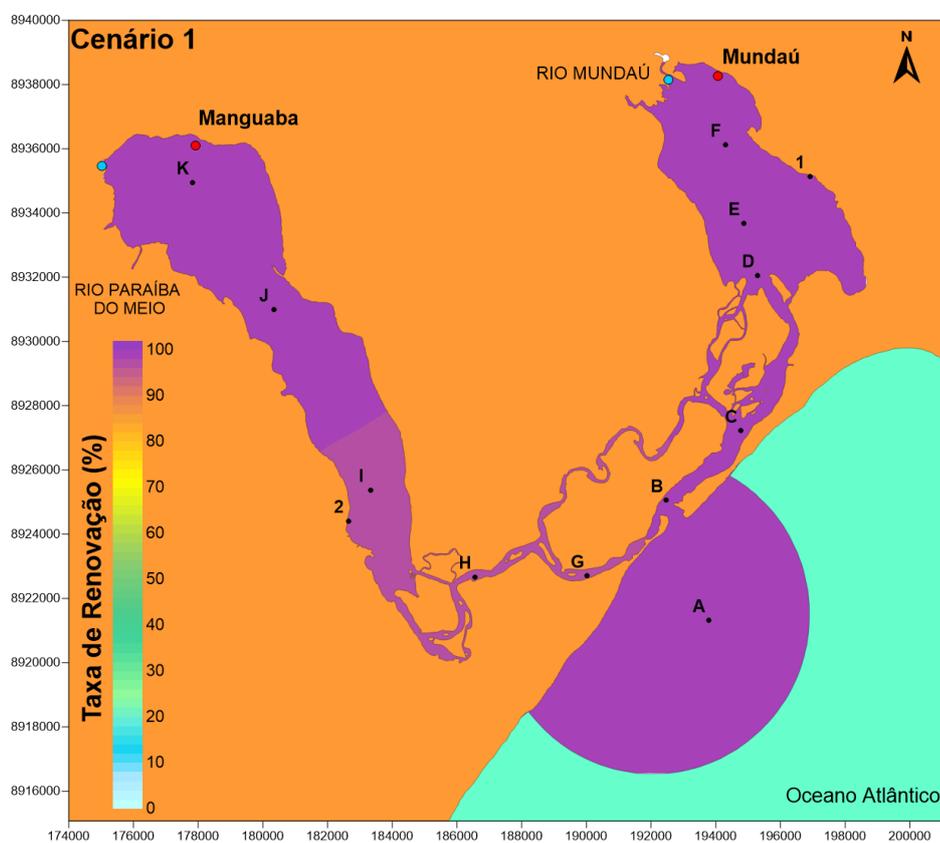


Figura 6.39 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C1

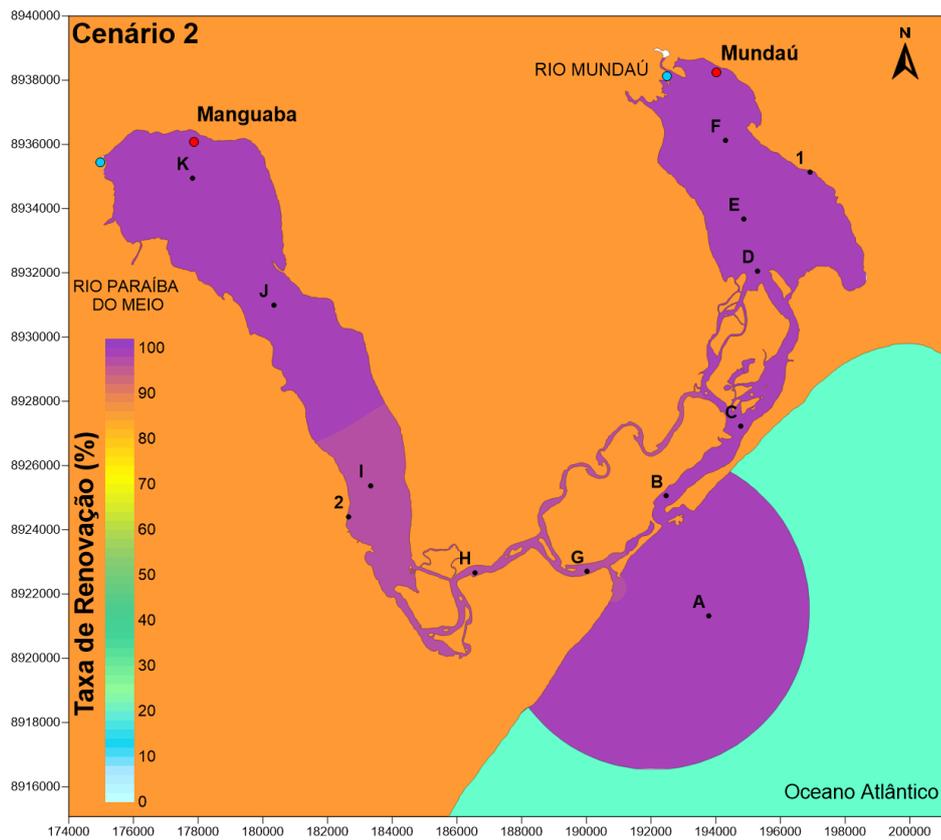


Figura 6.40 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C2

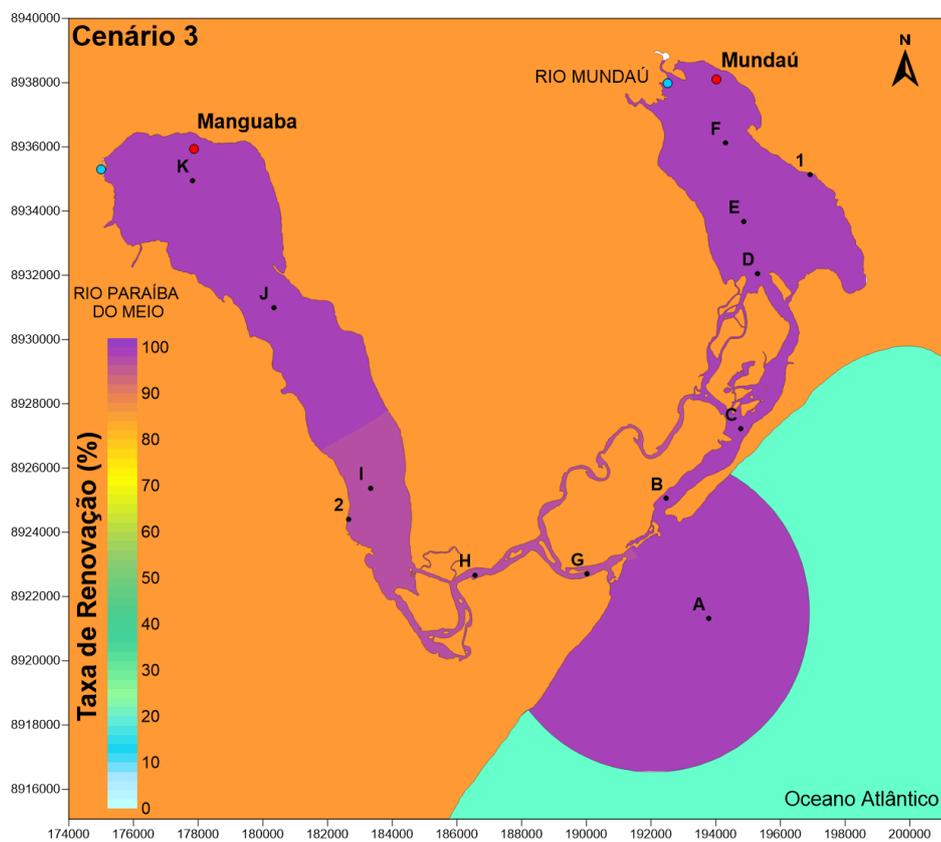


Figura 6.41 - Taxa de renovação após 90 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C3

As séries temporais das taxas de renovação do período chuvoso para as estações compreendidas no interior das lagunas (D, E, F, I, J e K) nos três cenários são mostradas da Figura 6.42 a Figura 6.43. Os resultados são apresentados para os 90 dias de simulação e filtrados por meio de média móvel.

Verifica-se que nas duas lagunas não ocorrem diferenças significativas entre os cenários. Na região sul da laguna Mundaú (estação D), as taxas de renovação se estabilizam após 50 dias de simulação, com porcentagem máxima de 99,74%, representando uma diferença de 0,06% entre os cenários. A renovação de 99% das águas ocorre depois de 48 dias de simulação na porção central (estação E) e 36 dias na região norte (estação F), que está sob influência direta do rio Mundaú.

Na laguna Manguaba, como os volumes de entrada e saída são menores e a vazão fluvial é pequena, as taxas de renovação são menores que na laguna Mundaú, como também pode ser verificado no período seco. Apenas a porção norte (estação K) que está próxima ao rio Paraíba do Meio, possui uma renovação completa das águas, com índices de 99,6%. Nessa estação, as taxas de renovação se estabilizam após 60 dias de simulação. As outras regiões da laguna (estações I e J) possuem taxas elevadas, na ordem de 97% a 98%.

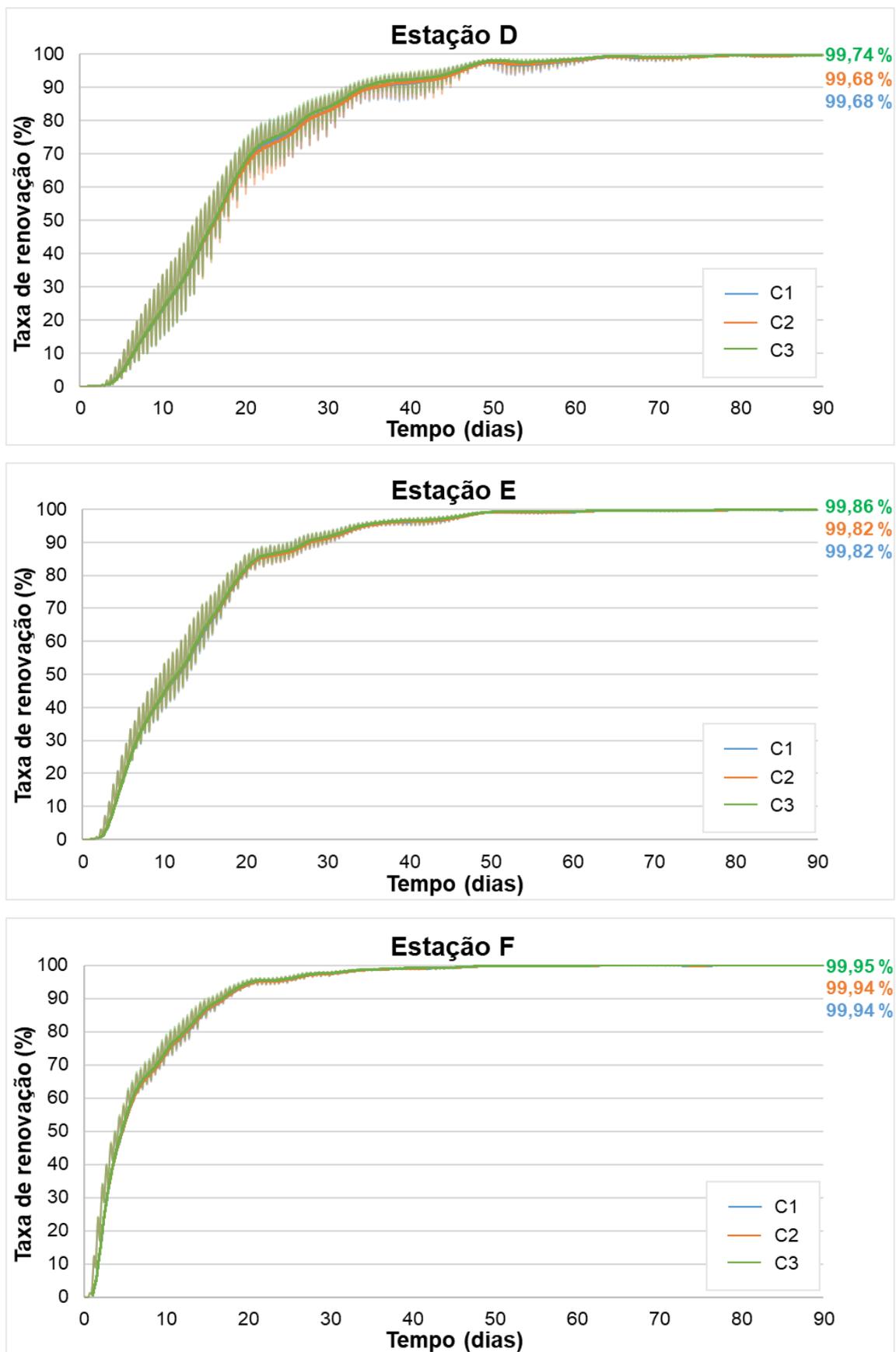


Figura 6.42 - Séries temporais da taxa de renovação da laguna Mundaú (estações D, E e F), para o período chuvoso nos cenários C1, C2 e C3

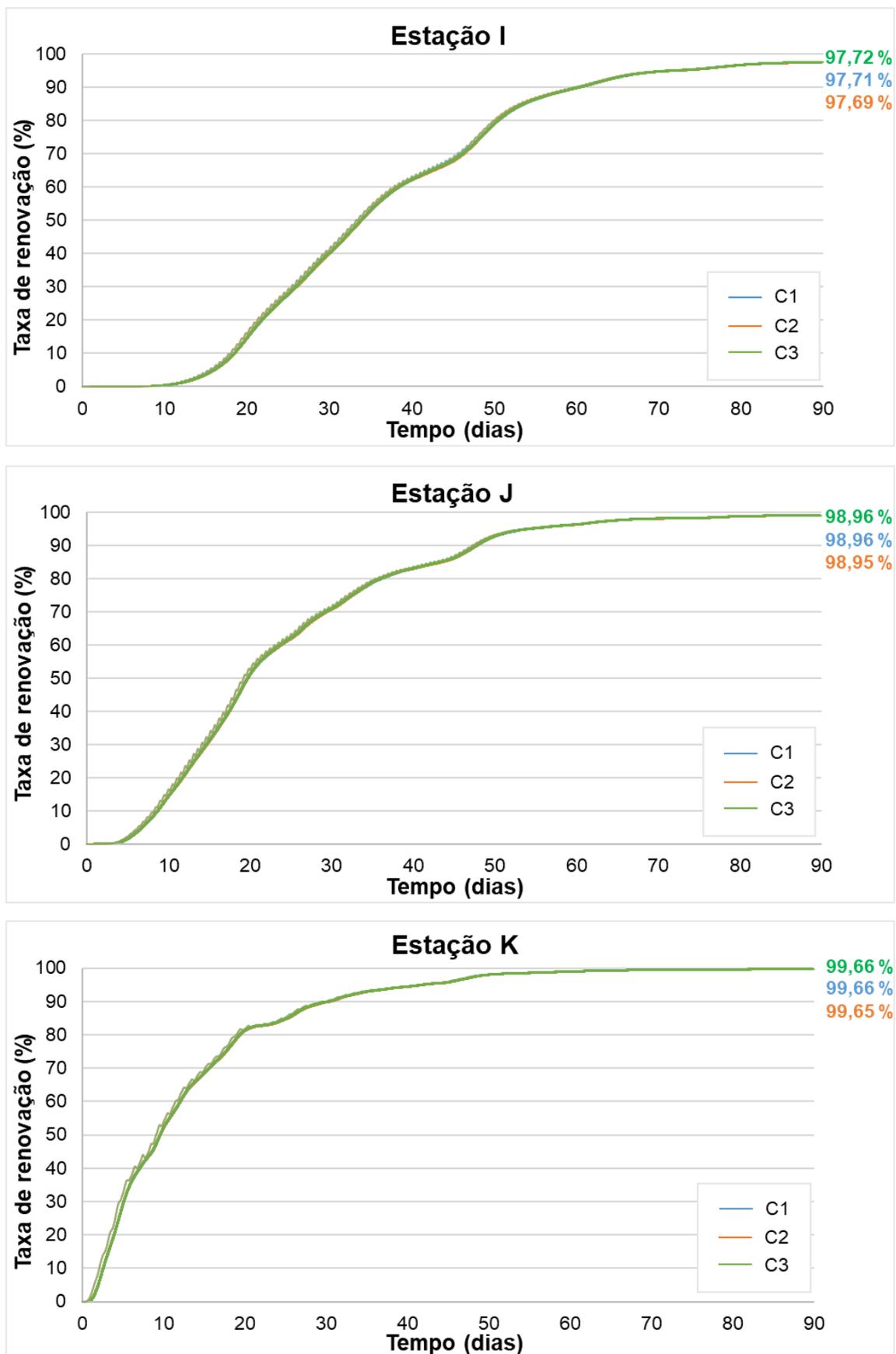


Figura 6.43 - Séries temporais da taxa de renovação da laguna Manguaba (estações I, J e K), para o período chuvoso nos cenários C1, C2 e C3

6.4.2. Idade da água

Foram realizadas seis simulações para a idade da água, para os três cenários analisados e considerando o período seco (01/01 até 30/04) e o chuvoso (01/06 até 28/09). Os resultados espaciais da idade da água para o período seco no instante final das simulações estão ilustrados a seguir (Figura 6.44, Figura 6.45 e Figura 6.46). Percebe-se que na laguna Mundaú, a região norte (estação F) tem idade da água na faixa entre 0 e 16 dias e que a região sul (estação D) possui uma idade da água mais elevada, em torno de 24 até 40 dias. No canal de ligação, essa variação é de 32 a 40 dias. Não é possível notar diferenças significativas entre os cenários.

Na laguna Manguaba, as diferenças entre os cenários são perceptíveis na porção sul (estação I) e no canal de ligação, que tem influência da embocadura. No cenário C1, os valores encontrados variam de 48 a 80 dias, enquanto o cenário C2 tem idade da água em torno de 40 a 64 dias. Já o cenário C3 apresenta resultados intermediários, na faixa de 40 a 72 dias. Na porção norte (estação K) da laguna, o valor máximo encontrado é de 40 dias.

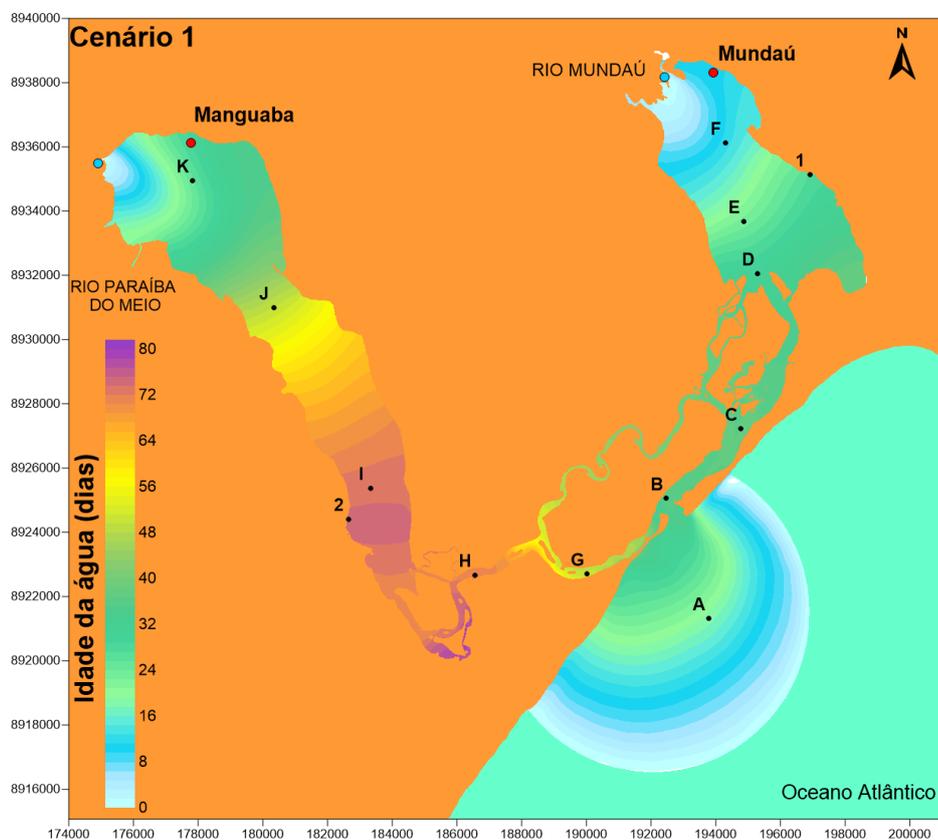


Figura 6.44 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C1

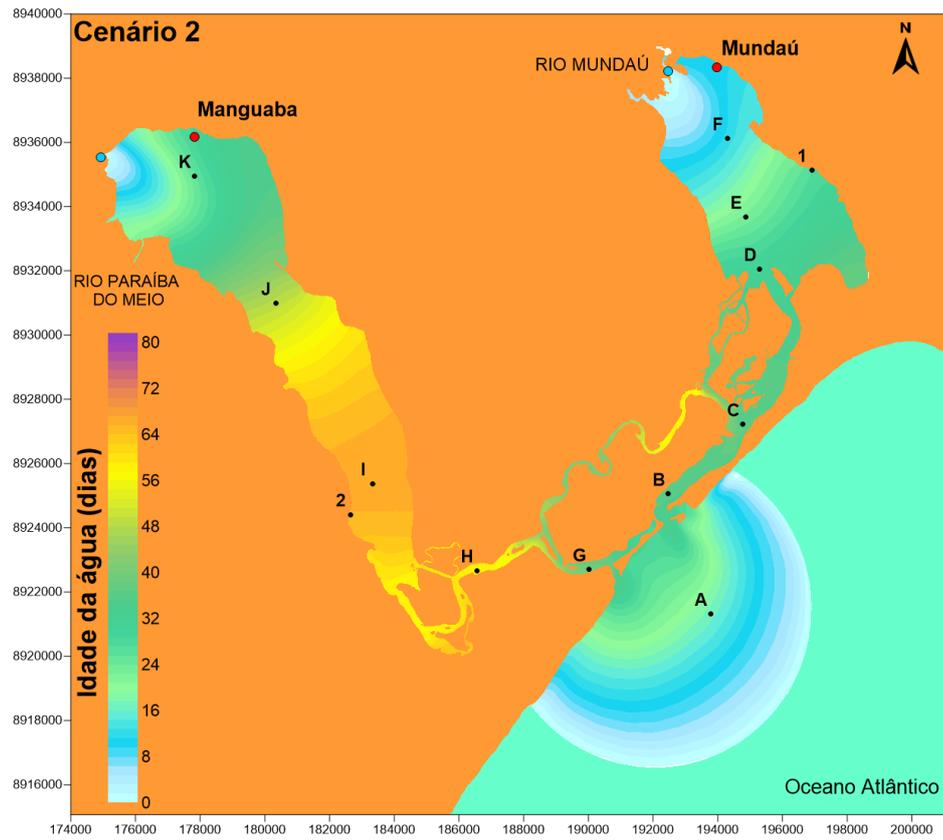


Figura 6.45 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C2

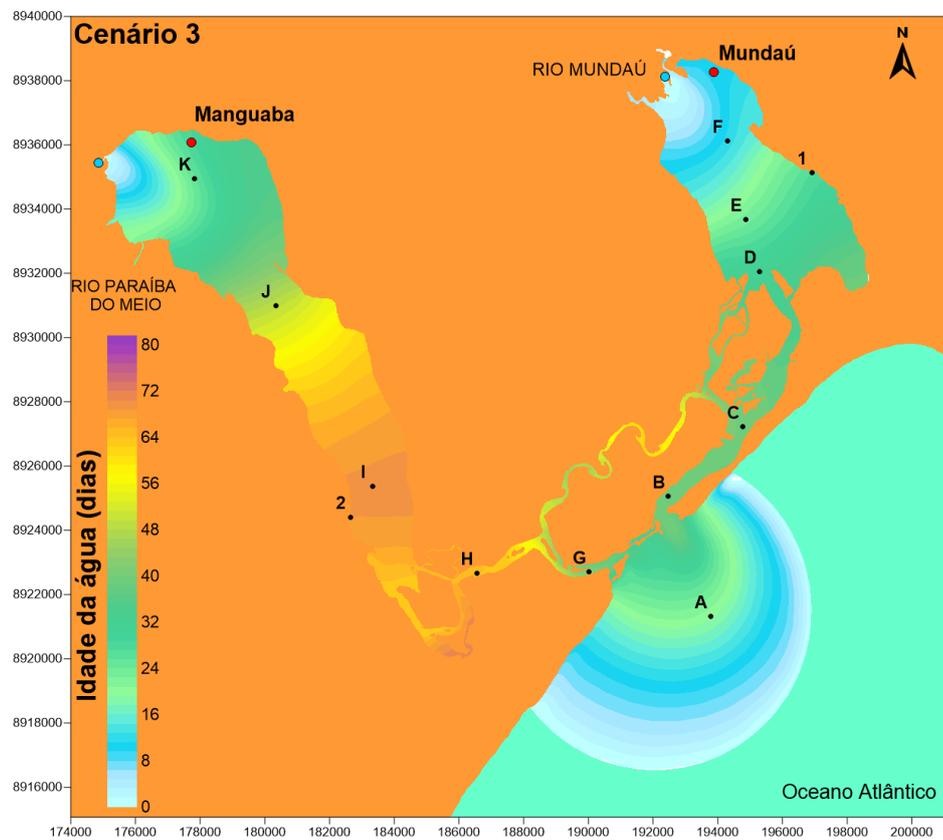


Figura 6.46 - Idade da água após 120 dias de simulação do período seco para o cenário C3

Nas Figura 6.47 e Figura 6.48, estão compreendidas as séries temporais de idade da água para o período de estiagem das estações D, E, F, I, J e K. As séries exibem a idade da água máxima encontrada e foram filtradas com a média móvel com período de 24 horas. As regiões com menores idades das águas estão ao norte das lagoas Mundaú (estação F) e Manguaba (estação K), com idades máximas de 26 dias e 32 dias, respectivamente. Essas estações estão localizadas em áreas próximas às entradas dos rios, com taxas de renovações mais elevadas, como visto na seção anterior.

As idades das águas na laguna Mundaú (estações D e E) são mais estáveis a partir de 60 dias de simulação. Comparando os cenários, percebe-se que o cenário C2 tem idades inferiores aos outros cenários. No sul da laguna (estação D), a máxima do cenário C3, que possui idades mais elevadas, é de 43,33 dias, o que corresponde a uma diferença de, aproximadamente, 3 dias entre os cenários C2 e C3. Para a estação E, essa diferença cai para 1,6 dias, para a idade máxima de 36,07 dias.

Na laguna Manguaba, percebe-se o mesmo comportamento encontrado na taxa de renovação, em que o cenário C2 tem idades menores, seguido pelos cenários C3 e C1. Na porção sul (estação I) o cenário C1 tem uma idade da água de até 74,15 dias, representando uma diferença de 6,6 dias entre o C1 e o C2. Na região intermediária (estação J), as idades das águas variam de 51,17 até 52,03 dias.

De maneira geral, as porções leste e sul da laguna Mundaú e as regiões central e sul da laguna Manguaba apresentam idades das águas mais elevadas, condizentes com os resultados encontrados para a taxa de renovação e o tempo de residência. Diferenças entre os resultados para o tempo de residência e a idade da água são encontradas na porção norte da laguna Manguaba, com tempo de residência elevado e idade da água baixa.

O tempo de residência mostra a trajetória das partículas que são advectadas pelas correntes. Como a região norte da laguna possui velocidades muito baixas e áreas de recirculação de corrente, o tempo de residência torna-se elevado. Já a idade da água está relacionada com a concentração das substâncias presentes no corpo de água, a partir do transporte advectivo-difusivo. A região norte está próxima ao rio Paraíba do Meio, com concentrações elevadas, assim a idade da água torna-se mais baixa nessa região.

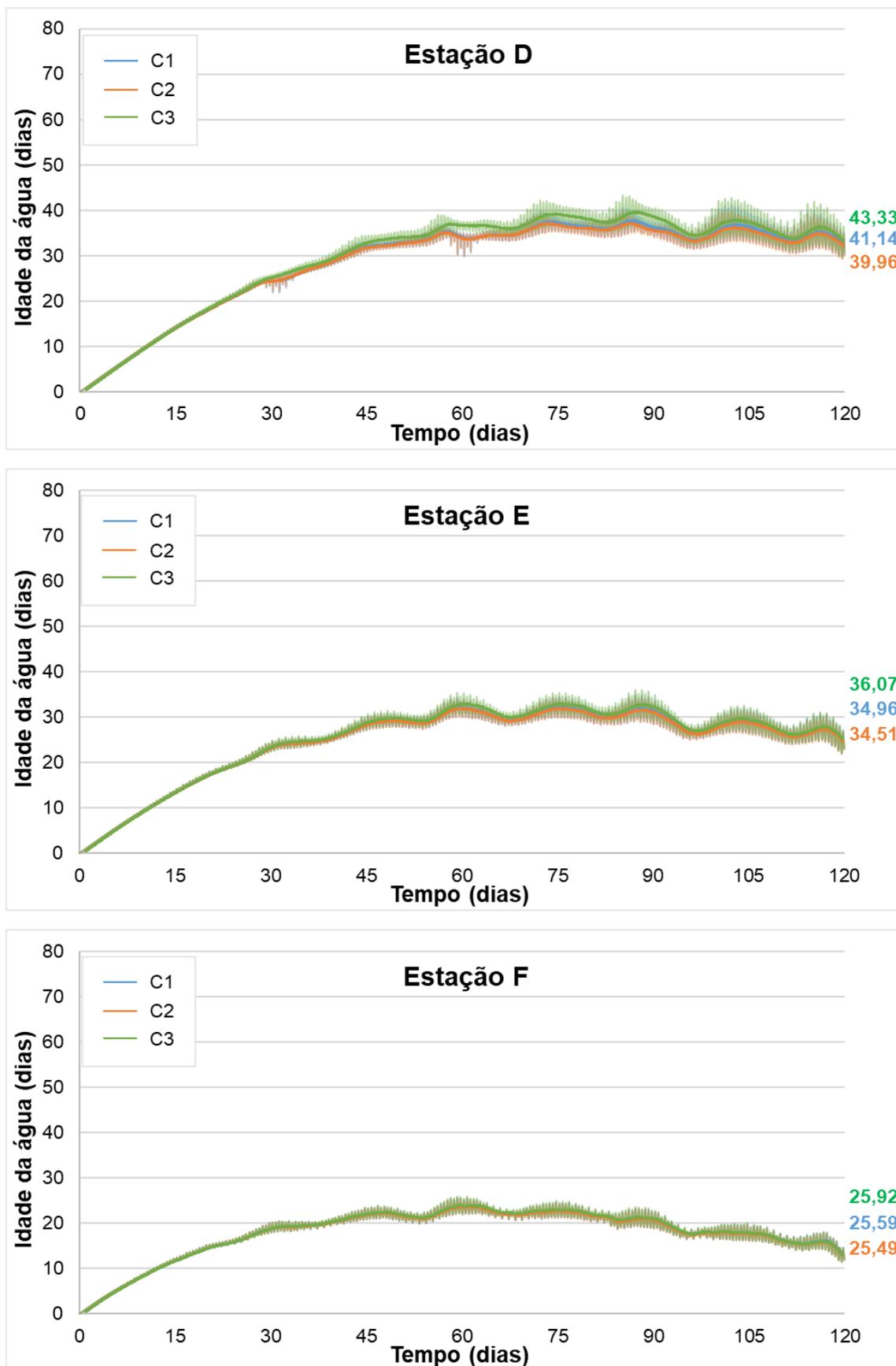


Figura 6.47 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações D, E e F da laguna Mundaú durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3

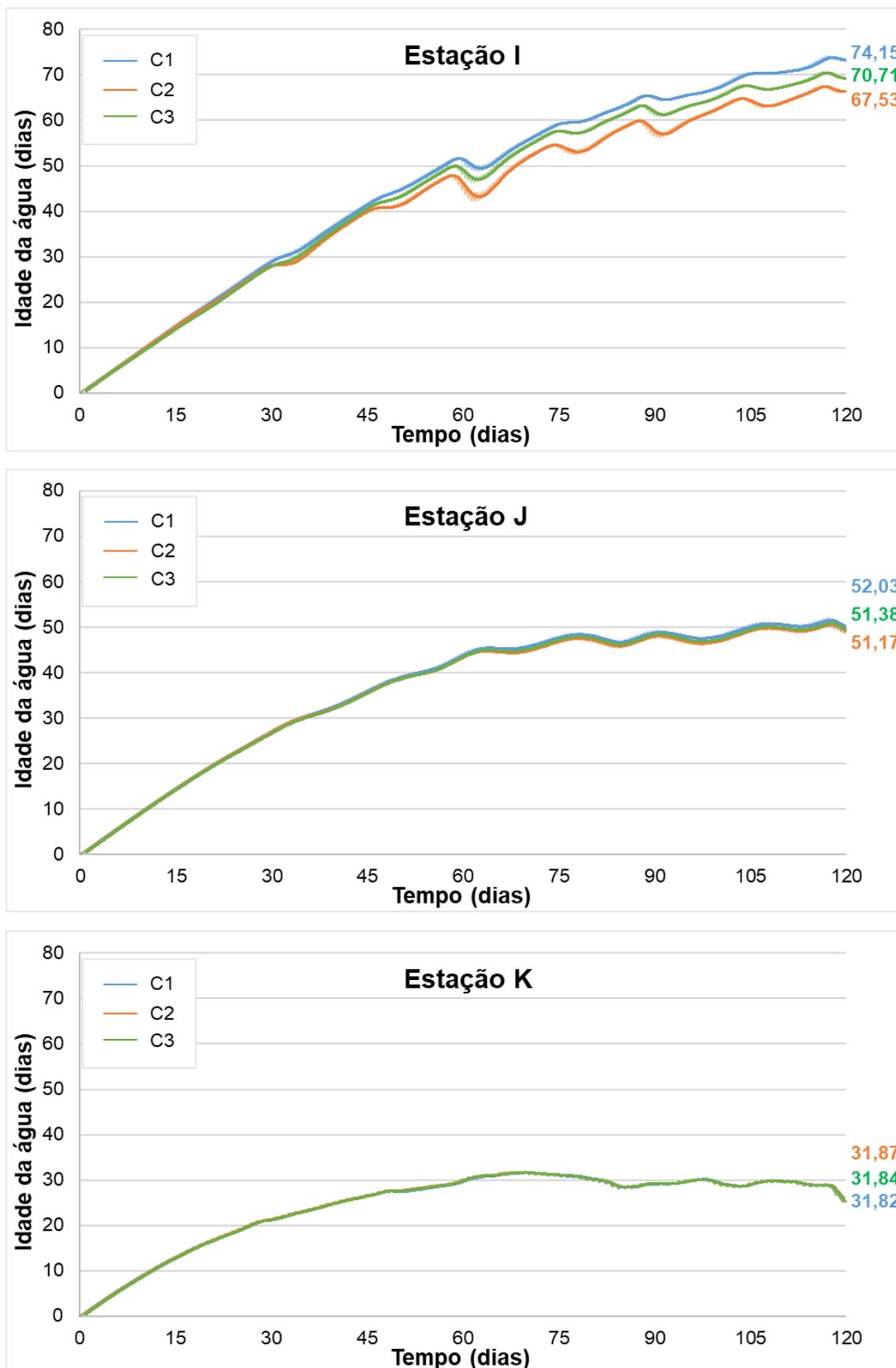


Figura 6.48 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações I, J e K da laguna Manguaba durante o período seco para os cenários C1, C2 e C3

Os resultados espaciais das idades das águas para o período chuvoso (Figura 6.49, Figura 6.50 e Figura 6.51) para os cenários C1, C2 e C3, após os 120 dias de simulações, mostram idades inferiores aos encontrados no período seco.

Na laguna Mundaú, a região sul (estação D) apresenta uma idade da água na faixa de 16 até 32 dias e o canal de ligação possui uma variação de 24 a 32 dias. A porção norte da laguna (estação F) têm idades da água entre 0 até 16 dias devido à influência direta do rio Mundaú. A porção norte da laguna Manguaba (estação K) apresenta idades de até 32 dias; essa região está próxima ao exutório do rio Paraíba do Meio. A região sul da laguna Manguaba (estação I), tem idade da água em torno de 56 dias.

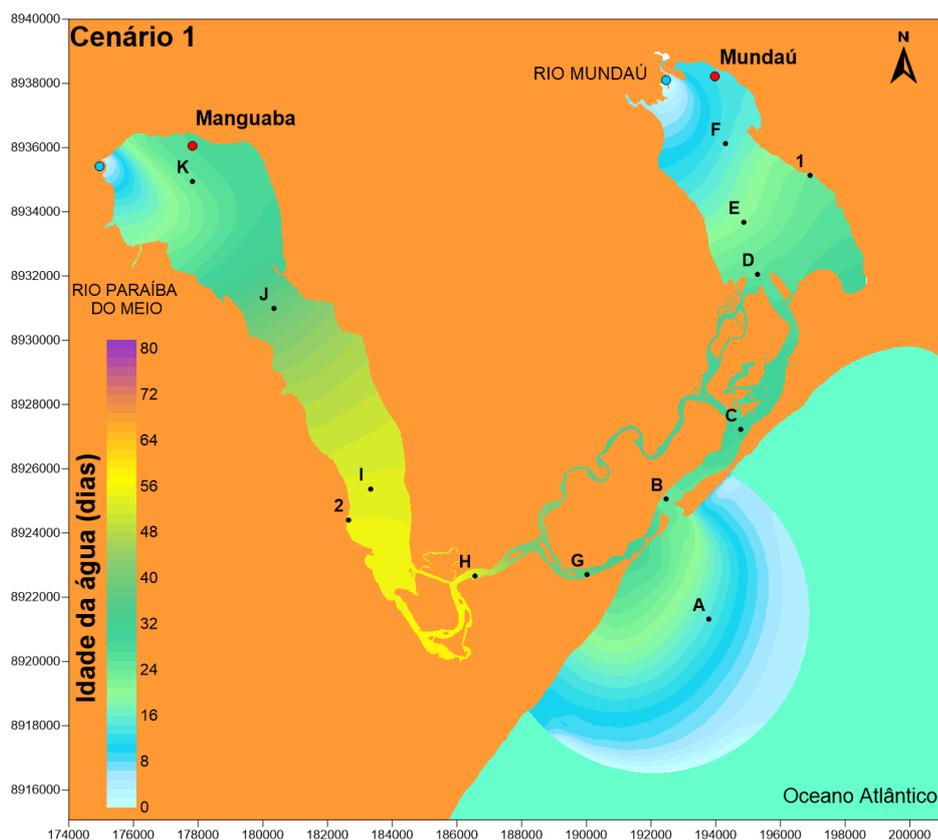


Figura 6.49 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C1

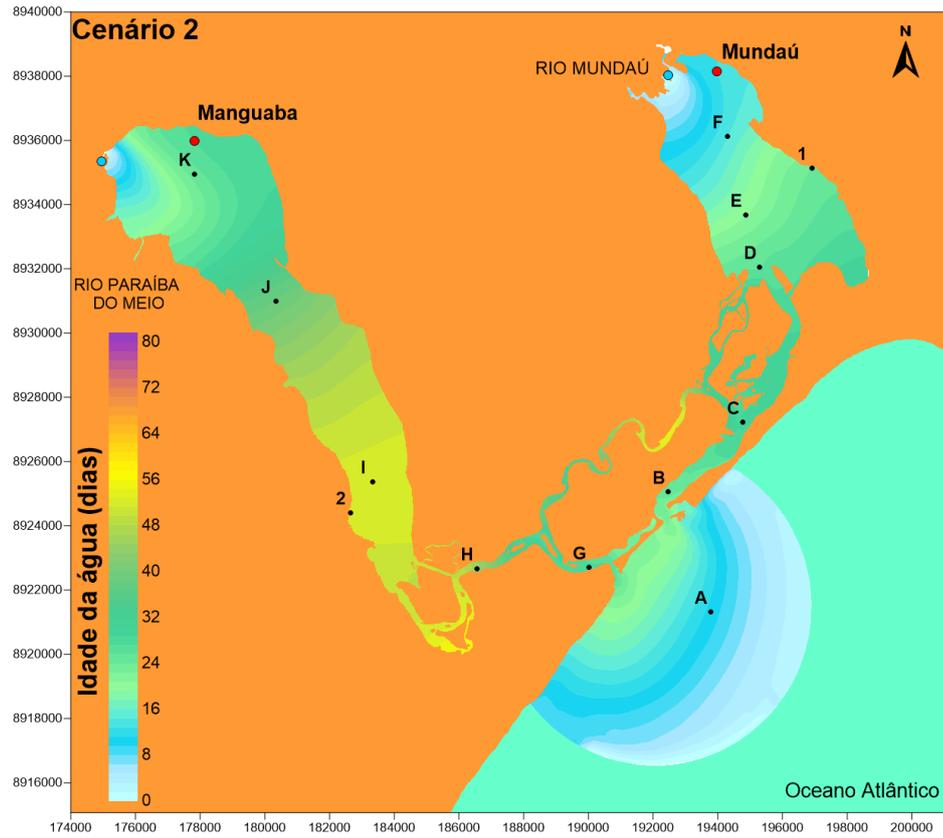


Figura 6.50 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C2

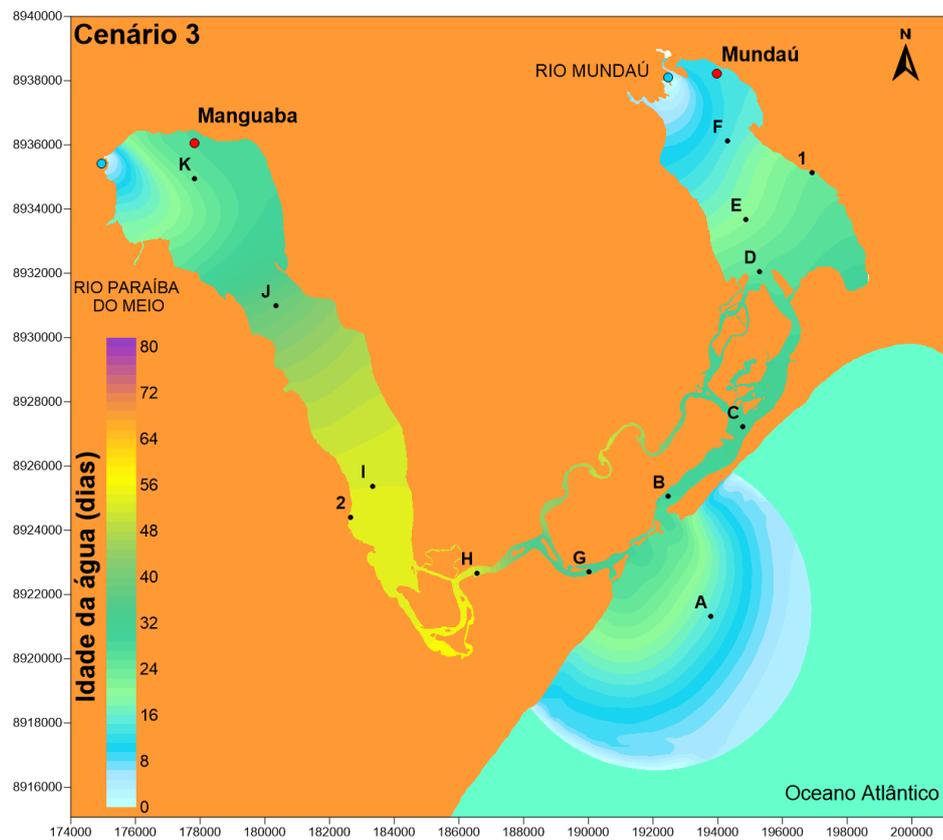


Figura 6.51 - Idade da água após 120 dias de simulação do período chuvoso para o cenário C3

As séries temporais de idade da água para o período chuvoso (Figura 6.52 e Figura 6.53) estão mostradas com os 120 dias de simulação e média móvel com o período de 24 horas.

Apenas a porção sul da laguna Manguaba (estação I) apresenta diferenças significativas entre os cenários. Nessa região, o comportamento é similar ao encontrado na simulação do período seco, ou seja, as idades das águas são superiores nessas estações e, com relação aos cenários, o cenário C1 tem os maiores valores alcançados e o cenário C2 os menores. Verifica-se uma redução de até 20 dias entre os períodos seco e chuvoso nessa porção, devido à idade máxima de 53,54 dias do cenário C1. Apesar da redução, essa porção ainda tem valores muito elevados de idades das águas, representando um local mais suscetível à problemas ambientais.

Na laguna Mundaú, a porção sul (estação D) apresenta uma idade máxima de 29,67 dias, diminuindo para 22,41 dias na região intermediária (estação E) e 15,27 dias na porção norte (estação F). Nota-se a importância da descarga fluvial na região, que mostrou uma redução de até 14 dias da idade da água na laguna.

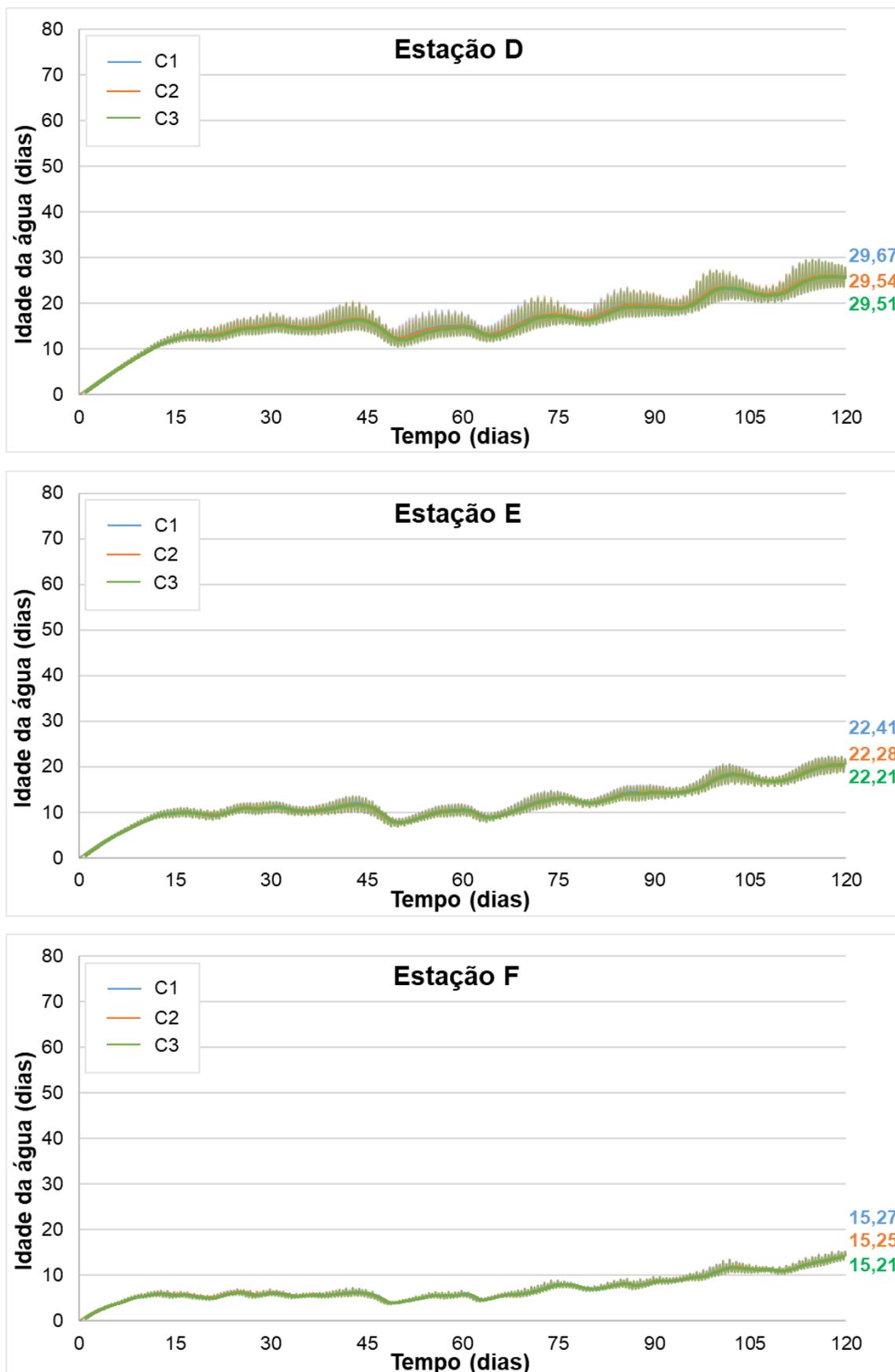


Figura 6.52 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações D, E e F da laguna Mundaú durante o período chuvoso para os cenários C1, C2 e C3

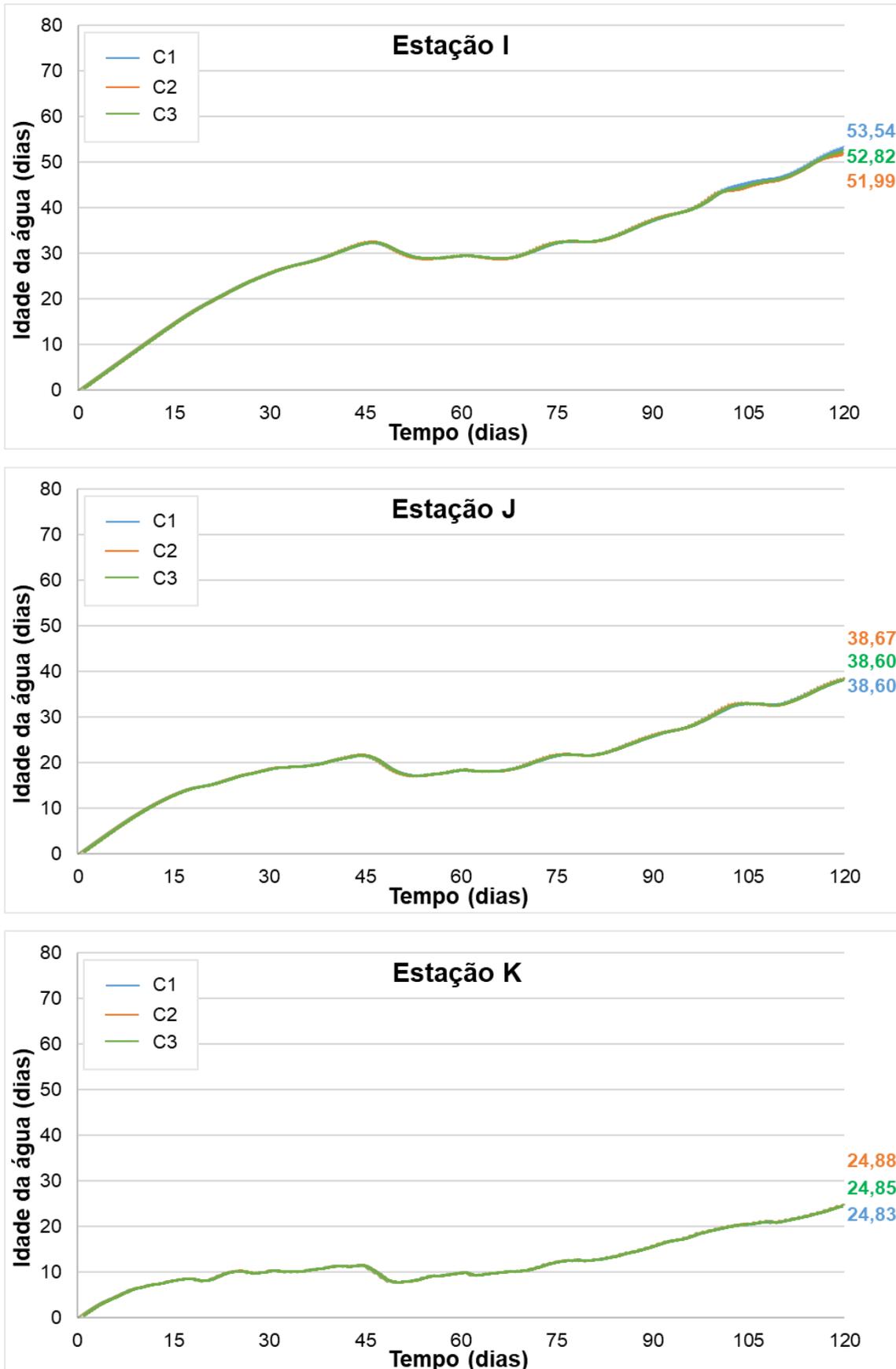


Figura 6.53 - Séries temporais com 120 dias de simulação das idades das águas nas estações I, J e K da laguna Mangueira durante o período chuvoso para os cenários C1, C2 e C3

A Tabela 6.3 traz o resumo quantitativo das taxas de renovação e idades das águas encontrados nas estações D, E, F, I, J e K das lagoas Mundaú e Manguaba. No período seco, as taxas de renovação são maiores e as idades das águas são menores nas estações F e K, devido às descargas fluviais dos rios Paraíba do Meio e Mundaú. Nota-se que mesmo durante o período de estiagem, com vazões menores dos rios, existe uma influência significativa do aporte fluvial na região.

Como o rio Mundaú possui vazões mais elevadas que o rio Paraíba do Meio e a maré penetra com mais facilidade na laguna Mundaú devido ao menor amortecimento das marés, as taxas de renovação nas regiões central e sul da laguna são mais elevadas na laguna Mundaú, em comparação com a laguna Manguaba. Por conseguinte, as regiões da laguna Manguaba possuem menores taxas de renovação e maiores idades das águas, quando comparadas à laguna Mundaú. Isso ocorre devido ao menor aporte fluvial, trocas de águas reduzidas e ao maior amortecimento da maré, na ordem de 98,9%.

Com relação aos cenários, as regiões central e sul da laguna Manguaba (estações I e J) possuem maiores diferenças entre os cenários C1, C2 e C3; a maré possui uma maior influência nessas áreas e as configurações das embocaduras nos cenários C2 e C3 favorecem a entrada da maré na região. Percebe-se que não existem diferenças significativas entre os cenários analisados durante o período chuvoso.

Comparando o período seco com o chuvoso, verifica-se a influência do aumento das descargas fluviais na região, que ocasiona em elevadas taxas de renovações e em baixas idades das águas.

Tabela 6.3 - Resumo quantitativo das taxas de renovação e idades das águas para os períodos seco e chuvoso nos cenários C1, C2 e C3

Local	Taxa de Renovação (%)						Idade da água (dias)					
	Período Seco			Período Chuvoso			Período Seco			Período Chuvoso		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D	84,4	85,5	82,6	99,7	99,7	99,7	41,1	40,0	43,3	29,7	29,5	29,5
E	87,7	88,3	86,3	99,8	99,8	99,9	35,0	34,5	36,1	22,4	22,3	22,2
F	92,5	92,8	91,8	99,9	99,9	100,0	25,6	25,5	25,9	15,3	15,3	15,2
I	53,2	60,9	56,7	97,7	97,7	97,7	74,2	67,5	70,7	53,5	52,0	52,8
J	64,0	67,3	65,6	99,0	99,0	99,0	52,0	51,2	51,4	38,6	38,7	38,6
K	81,1	82,1	81,5	99,7	99,7	99,7	31,8	31,9	31,8	24,8	24,9	24,9

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho são apresentados os resultados das simulações da circulação hidrodinâmica, do tempo de residência, da taxa de renovação e da idade da água com o objetivo de analisar os efeitos das diferentes configurações de embocaduras no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM), bem como as alterações provocadas pelas diferenças sazonais, a partir do modelo SisBaHiA®.

A calibração do modelo de circulação hidrodinâmico mostrou-se eficaz para a representação da região de estudo; os dados de elevação da superfície livre medidos foram comparados com os resultados do modelo, exibindo uma adequada reprodução dos valores. As análises e discussões dos resultados das modelagens com dados médios de vazão e de vento foram adequados para uma análise qualitativa comparativa entre os cenários abordados no estudo.

Os resultados hidrodinâmicos indicaram velocidades e amplitudes de marés mais elevadas nas embocaduras dos canais principais das lagunas Mundaú e Manguaba. A sazonalidade não influenciou de forma significativa nas velocidades e elevações da superfície livre. A verificação do amortecimento da maré mostrou-se coerente com os resultados de outros trabalhos, revelando que o sistema de canais do CELMM funciona como um filtro eficiente na redução da amplitude da maré no interior das lagunas.

Com relação aos cenários analisados, na laguna Manguaba, a configuração de embocadura de 2014 apontou velocidades, amplitudes e volumes mais elevados, seguido pela embocadura de 2017 e pela configuração de 2006. Estes resultados foram encontrados devido às configurações de embocaduras ramificadas em 2014 e 2017, que favorecem as trocas de águas na laguna Manguaba. Na laguna Mundaú, o cenário de 2006 apresentou velocidades, amplitudes e volumes maiores, devido à configuração de embocadura com uma única saída para o mar, que aumenta a entrada das águas na região.

A distribuição espacial dos tempos de residência na região do CELMM revelou áreas de estagnação, propensas ao acúmulo de substâncias dissolvidas, na região norte da laguna Manguaba e nas porções leste e sul da laguna Mundaú. As diferenças encontradas durante os períodos seco e chuvoso revelaram que o aporte fluvial interfere, de forma significativa, nas misturas de água da região.

As simulações dos tempos hidráulicos característicos (tempo de residência, idade da água e taxa de renovação) evidenciaram que o CELMM é fortemente influenciado pela descarga fluvial dos seus rios principais, Mundaú e Paraíba do Meio, ocasionando a diminuição na idade da água e no tempo de residência e aumento das taxas de renovação. A maré também desempenha um papel fundamental na renovação das águas, principalmente nos canais e nas regiões ao sul das lagunas.

As regiões central e sul da laguna Manguaba apresentaram as menores taxas de renovação e idades das águas mais elevadas; essas porções têm menos influência do rio Paraíba do Meio. Como as trocas de águas são menores na laguna Manguaba, o aporte fluvial é pequeno e o amortecimento da maré é mais pronunciado, esta laguna tem tempos de residências e idades das águas elevados, e taxas de renovação baixas, revelando áreas mais vulneráveis à poluição por lançamento de efluentes não tratados.

De maneira geral, o cenário com a configuração de embocadura de 2014 apresentou as maiores taxas de renovação e as menores idades das águas, expondo que a ramificação das embocaduras causou uma melhoria significativa nas trocas de águas do CELMM.

Para futuros trabalhos, recomenda-se uma nova campanha de medição com o monitoramento dos níveis de água e velocidades das correntes da região, visando o aprimoramento da calibração e validação dos dados. A realização de um novo levantamento batimétrico é indispensável para o aperfeiçoamento da modelagem hidrodinâmica. Sugere-se também uma simulação que considere os efeitos dos recifes de arenitos, paralelos à costa do CELMM, na circulação hidrodinâmica e renovação das águas.

As análises da circulação hidrodinâmica e renovação das águas consideraram os valores médios de vazão e de vento para verificar somente os efeitos das variações das embocaduras no CELMM. Para uma análise mais detalhada do sistema, recomenda-se a utilização de valores diários, observados nos anos de 2006, 2014 e 2017, e as comparações entre os resultados encontrados.

Simulações de qualidade de água também poderiam ser feitas para os parâmetros OD (oxigênio dissolvido), DBO (demanda bioquímica de oxigênio), nitrogênio e fósforo. Conhecidas as concentrações desses parâmetros para cada um

dos cenários abordados, poderiam ser estudados os possíveis efeitos que as diferentes embocaduras causam na qualidade da água do CELMM.

REFERÊNCIAS

ABBOT, M. B.; BASCO, D. R. **Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers**. Logan Group, UK Limited, 1989.

ABREU, C. H. M. de; BARROS, M. L. C.; BRITO, D. C.; TEIXEIRA, M. R.; CUNHA, A. C. da. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the lower Amazon river. **Water**, v.12, n.3, p. 1 – 29, 2020. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/w12030660>.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. Acesso em: 14 jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Esturiano-Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM)**. Brasília: ANA, 2006. Disponível em: http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/planejamento/planoderecursos/Celmm_Inicial.aspx. Acesso em: 17 set. 2018.

AGUILERA, L.; SANTOS, A. L. F. dos; ROSMAN, P. C. C. On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.15, n.2, p. 1 – 20, 2020. SciELO. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2456>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711 – 728, 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ALVES, Marina Cabral. **Composição e acumulação da matéria orgânica (C, N, ligninas) nos sedimentos do sistema lagunar Mundaú-Manguaba, AL - Brasil**. 98f. Dissertação (Mestrado em Geociências – Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

ANDRADE, E. L.; OLIVEIRA, A. N. S.; GUIMARÃES JÚNIOR, S. A. M. Análise da dispersão estimada de coliformes termotolerantes para os períodos de inverno e verão na laguna Mundaú, Alagoas. **Revista Contexto Geográfico**, v.1, n.2, p. 95 – 106, 2016. SEER UFAL. <https://doi.org/10.28998/contegeo.v1i2.6097>.

ANTHONY, A.; ATWOOD, J.; AUGUST, P.; BYRON, C.; COBB, S.; FOSTER, C.; FRY, C.; GOLD, A.; HAGOS, K.; HEFFNER, L.; KELLOGG, D. Q.; LELLIS-DIBBLE, K.; OPALUCH J. J.; OVIATT, C.; PFEIFFER-HERBERT, A.; ROHR, N.; SMITH, L.; SMYTHE, T.; SWIFT, J.; VINHATEIRO, N. Coastal lagoons and climate change: ecological and social ramifications in U.S. atlantic and gulf coast ecosystems. **Ecology and Society**, v. 14, n. 1, p. 1 – 29. 2009. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art8/> >. Acesso em: 14 set. 2020.

ARAÚJO, T. M. de; SANTOS, R. C. A. L.; SEOANE, J. C. S.; MANSO, V. A. V.

Alagoas. In: MUEHE, D. (Organizador). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. p. 197-213.

BARROS, A. H. C.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, A. B. da; SANTIAGO, G. A. C. F. **Climatologia do Estado de Alagoas**. 2. ed. Recife, PE: Embrapa Solos, 2012.

BIRD, Eric. **Coastal geomorphology: an introduction**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; CHAMBEL, P.; NEVES, R. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. **Ocean Dynamics**, v.53, p. 137 – 145, 2003. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10236-003-0040-0>.

BRITO JÚNIOR, A. N. de; FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; LARSON, M. Tidal Exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, 7, p. 133 – 142. 2018. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.12.005>.

BRYE, B. de; BRAUWERE, A. de; GOURGUE, O.; DELHEZ, E. J. M.; DELEERSNIJDER, E. Reprint of water renewal timescales in the Scheldt Estuary. **Journal of Marine Systems**, v.128, p. 3 – 16. 2013. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.03.002>.

CHEVALIER, C.; DEVENON, J. L.; PAGANO, M.; ROUGIER, G.; BLANCHOT, J.; ARFI, R. The atypical hydrodynamics of the Mayotte Lagoon (Indian Ocean): Effects on water age and potential impact on plankton productivity. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.196, p. 182 – 197, 2017. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.06.027>.

CORREIA, M. D.; SOVIERZOSKI, H. H. Gestão e desenvolvimento sustentável da zona costeira do estado de Alagoas, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v.8, n.2, p.25-45, 2008. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-146_Correia.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2020.

COSTA, T. L. F.; ARAUJO, M. P.; CARREIRA, R. S.; KNOPPERS, B. A. Lipídios como indicadores de fontes e distribuição de matéria orgânica particulada em um complexo estuarino-lagunar tropical (Mundaú – Manguaba, AL). **Química Nova**, v. 33, n. 9, p. 1915 – 1922. 2010. SBQ (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000900018>.

COTOVICZ JUNIOR, L. C.; BRANDINI, N.; KNOPPERS, B. A.; SOUZA, W. F. L. de; MEDEIROS, P. R. P. Comparação de modelos e índices para avaliação do estado trófico do complexo estuarino-lagunar Mundaú-Manguaba (AL). **Geochimica Brasiliensis**, v. 26, n. 1, p.7–18. 2012. <https://doi.org/10.21715/gb.v26i1.353>.

CUNHA, C. L. N; SCUDELARI, A. C.; SANT'ANA, D. O.; LUZ, T. E. B.; PINHEIRO, M. K. R. Effects on the circulation and water renewal in a brazilian estuary lagoon complex, due to the variations in the river flow and the wind. **Revista Ambiente & Água**, v.16, n.2, p. 1 – 18, 2021. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2600>.

CUNHA, C. L. N.; SCUDELARI, A. C.; ROSMAN, P. C. C. Using modelling techniques to assess sewage pollution in the Potengi River Estuary, Brazil. **Water and Society III**, v. 200, p.237 – 248, 2015. WIT. <http://dx.doi.org/10.2495/ws150201>.

DALAZEN, Jessyca Petry. **Modelagem numérica da renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DAVIDSON-ARNOTT, R. Wave-Dominated Coasts. In: WOLANSKI, E.; MCLUSKY, D. (Ed.). **Treatise on estuarine and costal science**. Academic Press, 2011. Vol. 3. p. 73 – 116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374711-2.00305-3>.

DAVIS JR, R. A. Evolution of Coastal Landforms. In: SHRODER, J. F. (Ed.). **Treatise on geomorphology**. Academic Press, 2013. Vol. 10. p. 417 – 448. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00293-1>.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Coastal processes with engineering applications**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

DELTAES. **Delft-3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics**. Deltares, 2020. 690 p. Disponível em: <https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf> Acesso em: 01 ago. 2020.

DHI – Danish Hydraulic Institute. **MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM: Hydrodynamic Module**. Short Description. DHI, 2017. 12 p. Disponível em: <<https://www.mikepoweredbydhi.com/download/product-documentation>> Acesso em: 02 ago. 2020.

DIAS, J. M.; SOUSA, M. C.; BERTIN, X.; FORTUNATO, A. B.; OLIVEIRA, A. Numerical modeling of the impacto f the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). **Environmental Modelling & Software**, v. 24, p. 711 – 725. 2009. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.10.017>.

ENGEL, B.; STORM, D.; WHITE, M.; ARNOLD, J.; ARABI, M. A hydrologic/water quality model application protocol. **Journal of the American Water Resources Association**, v.43, n.5, p.1223-1236, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00105.x>.

FERREIRA, R. V.; SHINZATO, E; DANTAS, M. E.; TEIXEIRA, W. G. Origem das paisagens. In: VILLANUEVA, T. C. B.; MARTINS, V. S. (Org.). **Geodiversidade do estado de Alagoas**. Salvador, BA: CPRM, 2016. Cap. 3.

FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. de A.; SOUZA, V. C. B. de. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10, 2010, Fortaleza, CE. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2010. p. 1 – 20.

FORTUNATO, A. B.; CLÍMACO, M.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, A.; SANCHO, F. FREIRE, P. Dinâmica fisiográfica da orla costeira: estudos de reabilitação e proteção. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v.8, n.1, p.45-63, 2008. <https://doi.org/10.5894/rgci28>.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR (FEMAR). **Catálogo de estações maregráficas brasileiras**. Rio de Janeiro: FEMAR, 2000.

GARCÍA-OLIVA, M.; MARCOS, C.; UMGIESSER, G.; MCKIVER, W.; GHEZZO, M.; PASCALIS, F. de; PÉREZ-RUZAFÁ, A. Modelling the impact of dredging inlets on the salinity and temperature regimes in coastal lagoons. **Ocean and Coastal Management**, v. 180, p. 1 – 33. 2019. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104913>.

GAVA, Guilherme Luís. **Avaliação de renovação de águas na Lagoa de Araruama – RJ, via abertura de canal com o mar no extremo oeste**. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

GERMANO, Alaerte da Silva. **Aspectos sinóticos de vórtices ciclônicos em altos níveis que provocaram precipitações extremas nas cidades de Recife, Maceió e Aracaju no período de 2011 à 2015: estudo de casos**. 87f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

GÖNENÇ, E.; WOLFLIN, J. P. Introduction. In: GÖNENÇ, E.; WOLFLIN, J. P. (Ed.). **Coastal lagoons: ecosystem processes and modeling for sustainable use and development**. CRC Press, 2005. Cap. 1.

GUIMARÃES JÚNIOR, S. A. M.; NASCIMENTO, M. C. do; SILVA, D. J. R. P. da. Impactos do uso da terra no complexo estuarino-lagunar Mundaú-Manguaba – Alagoas - Brasil. **Revista Contexto Geográfico**, v.2, n.3, p.86-99, 2017. SEER UFAL. <https://doi.org/10.28998/contegeo.v2i3.6137>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados. População no censo de 2010**. IBGE, 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências. Downloads**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações Automáticas. Estação Maceió-AL**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

IPH-ECO – Modelo hidrodinâmico e de qualidade de água tridimensional para ecossistemas aquáticos. **IPH-ECO**. Disponível em: <<http://ipheco.yooh.com.br/pt-br/>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

KENOV, I. A.; GARCIA, A. C.; NEVES, R. Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.106, p. 13 – 22, 2012.

ELSEVIER. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.04.008>.

KJERFVE, B. Coastal lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal lagoon processes**. Elsevier Oceanography Series, 1994. Cap. 1.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, D. A. (Ed.). **Estuarine Variability**. Academic Press, 1986. p. 63 - 81.

KJERFVE, B.; MAGILL, K. E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. **Marine Geology**, v.88, p. 187 – 199, 1989. ELSEVIER. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90097-2).

LARSSON, Linnea; NILSSON, Staffan. **Hydrodynamic modeling of the Mundaú-Manguaba estuarine-lagoon system, Brazil**. 85f. Dissertação (Mestrado em Water Resources Engineering) – Lund University, Lund, 2014.

LIMA, Ana Carolina Cavalcante de. **Condições hidrodinâmicas e estimativa do tempo de residência no complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba (AL) através de modelagem computacional**. 102f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

LIMA, Elysson David de Santana. **Avaliação das concentrações de elementos inorgânicos potencialmente tóxicos presentes em águas e moluscos do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba: possível fonte de contaminação à saúde humana**. 83f. Dissertação (Mestrado em Química e Biotecnologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

LINS, R. C.; MARTINEZ, J. M.; MARQUES, D. M.; CIRILO, J. A.; MEDEIROS, P. R. P.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. A multivariate analysis framework to detect key environmental factors affecting spatiotemporal variability of chlorophyll-a in a tropical productive estuarine-lagoon system. **Remote Sensing**, v.10, n.853, p.1-17, 2018. MDPI. <https://doi.org/10.3390/rs10060853>.

LI, X.; SHEN, Y. Numerical simulation of the impacts of water level variation on water age in Dahuofang Reservoir. **Frontiers of Earth Science**, v. 9, p. 209 – 224. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0460-9>.

LUZ, T. E. B.; PINHEIRO, M. K. R.; CUNHA, C. L. N.; SANT'ANA, D. O.; SCUDELARI, A. C. Avaliação da circulação hidrodinâmica devido a diferentes configurações de embocaduras do complexo estuarino Mundaú-Manguaba, AL/Brasil. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, 2021, Recife, PE. ABES, 2021. p. 1 – 15. (em publicação). (2021a).

LUZ, T. E. B.; PINHEIRO, M. K. R.; MATOS, M. F. A. de; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Alterações morfológicas na embocadura do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba, AL/Brasil. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, 2021, Recife, PE. ABES, 2021. p. 1 – 8. (em publicação). (2021b).

MATEUS, M.; VIEIRA, R. S.; ALMEIDA, C.; SILVA, M.; REIS, F. ScoRE – a simple

approach to select a water quality model. **Water**, v.10, n.12, p. 1 – 24, 2018. MDPI. <https://doi.org/10.3390/w10121811>.

MELO-MAGALHÃES, E. M.; MEDEIROS, P. R. P.; LIRA, M. C. A.; KOENING, M. L.; MOURA, A. N. Determination of eutrophic areas in Mundaú/Manguaba lagoons, Alagoas-Brazil, through studies of the phytoplanktonic Community. **Brazilian Journal of Biology**, v.69, n.2, p.271-280, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842009000200006>.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

MOHID – Water Modelling System. **What is MOHID?**. Disponível em: <<http://www.mohid.com/>>. Acesso em: 03 ago. 2020.

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

MONSEN, N. E.; CLOERN, J. E.; LUCAS, L. V.; MONISMITH, S. G. A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. **Limnology and Oceanography**, v.47, n.5, p. 1545 – 1553, 2002. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>.

NICHOLS, M. M.; BIGGS, R. B. Estuaries. In: DAVIS, R. A. (Ed.). **Coastal Sedimentary Environments**. Springer-Verlag, 1985. Cap. 2.

NICOLITE, M.; TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, C. E. V. Oscilação do nível de água e a co-oscilação da maré astronômica no baixo estuário do rio Paraíba do Sul, RJ. **Revista brasileira de geofísica**, v.27, n.2, p.225-239, 2009. SBGF (SciELO). <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2009000200006>.

NUNES, A.; LARSON, M.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. Morphological modeling of long-term inlet channel Evolution with an application to the Mundaú lagoon inlet, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.235, p.1-11, 2020. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106618>.

OLIVEIRA, A.; FORTUNATO, A. B.; REGO, J. R. L. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). **Continental Shelf Research**, v.26, p. 917-942, 2006. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.02.011>.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.37, n.6, p. 575-591, 1993. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1006/ecss.1993.1074>.

OLIVEIRA, D. L.; SOUZA, V. C. B. de; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Análise hidrológica da cheia excepcional ocorrida em junho de 2010 nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.3, p. 279 – 293, jul./set. 2014. ABRHidro.

<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p279-293>.

PANDA, U. S.; MOHANTY, P. K.; SAMAL, R. N. Impact of tidal inlet and its geomorphological changes on lagoon environment: a numerical model study. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.116, p. 29 – 40, 2013. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.06.011>.

PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P. C. C.; ALVAREZ, C.; SCHETINI, C. A. F.; SOUZA R. O.; VIEIRA, R. H. S. F. Modeling of coastal water contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). **Water Science & Technology**, v.72, n. 6, p. 928 – 936. 2015. IWA. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.292>.

RIBEIRO, M. A. T. S. B.; KNOPPERS, B. A.; CARREIRA, R. S. Fontes e distribuição de matéria orgânica sedimentar no complexo estuarino-lagunar de Mundaú-Manguaba/AL, utilizando esteróis e álcoois como indicadores. **Química Nova**, v.34, n. 7, p. 1111 – 1118. 2011. SBQ. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000700002>.

ROLLNIC, M.; MEDEIROS, C. Application of a probabilistic sediment transport model to guide beach nourishment efforts. In: CONLEY, D. C.; MASSELINK, G.; RUSSELL, P. E.; O'HARE, T. J. (Ed). Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), **Journal of Coastal Research**, 65, p. 1856 – 1861, 2013. <https://doi.org/10.2112/SI65-314.1>.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA**. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2020. 400 p. Disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9d_.pdf> Acesso em: 21 mar. 2020.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.11, n.3, p. 566 – 585. jul./set. 2016a. (SciELO). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1770>.

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise das trajetórias das águas continentais afluentes ao sistema estuarino de Santos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.1, p. 242 – 250. jan./mar. 2016b. ABRHidro (SciELO). <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p242-250>.

RYNNE, P.; RENIERS, A.; KREEKE, J. V. de; MACMAHAN, J. The effect of tidal exchange on residence time in a coastal embayment. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.172, p. 108 – 120, 2016. ELSEVIER. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.02.001>.

SALORANTA, T. M.; KAMARI, J.; REKOLAINEN, S.; MALVE, O. Benchmark Criteria: a tool for selecting appropriate models in the field of water management. **Environmental Management**, v.32, n.3, p. 322 – 333, 2003. SPRINGER. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-003-0069-3>.

SANT'ANA, Danilo de Oliveira. **Estudos das condições hidrodinâmicas e**

avaliação do tempo de residência do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

SANTOS JÚNIOR, Rivaldo Couto dos. **Avaliação do estado trófico aplicando o Índice TRIX no Sistema Lagunar Manguaba (Alagoas/Brasil) acoplado ao uso de geoprocessamento.** 93f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

SEMARH AL – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas. **Regiões hidrográficas e bacias hidrográficas do estado de Alagoas.** SEMARH, 2007. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/dataset/regioes-hidrograficas-estado-de-alagoas>>. Acesso em: 21 mai. 2020.

SEPLAG AL – Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio de Alagoas. **Recursos hídricos de Alagoas. Rios do estado de Alagoas.** SEPLAG, 2019. Disponível em: <<http://dados.al.gov.br/lv/dataset/recursos-hidricos-de-alagoas>>. Acesso em: 01 ago. 2020.

SILVA, D. F. da; SOUSA, F. A. S. de. Proposta de manejo sustentável para o complexo estuarino-lagunar Mundaú/Manguaba (AL). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.1, n.2, p. 78 – 94. set/dez. 2008. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v1.2.p78-94>.

SILVA, R. A. G.; GALLO, M. N.; ROSMAN, P. C. C.; NOGUEIRA, I. C. M. Tidal inlet short-term morphodynamics analysed through the tidal prism – longshore sediment transport ratio criterion. **Geomorphology**, v.351, p. 1 – 12, 2020. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106918>.

SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C. Viabilidade hidro-sedimentológica de um canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama - RJ. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.1, p.25–35, 2016. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p25-35>.

SOUZA, Alane Patrícia de Melo. **Avaliação do efeito do assoreamento na hidrodinâmica e no tempo de residência de um complexo estuarino lagunar tropical.** 38f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

SOUZA, B. D.; FERNANDES, V. O. Estrutura e dinâmica da comunidade fitoplanctônica e sua relação com as variáveis ambientais na lagoa Mãe-Bá, Estado do Espírito Santo, Brasil. **Acta Scientiarum Biological Sciences**, v.31, n.3, p.245-253, 2009. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v31i3.1266>.

SOUZA, R. C. de; REIS, R. S.; FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; SOUZA, C. F. Uma análise na dragagem do complexo estuarino-lagunar Mundaú/Manguaba em Alagoas através de um modelo numérico hidrodinâmico bidimensional – resultados preliminares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.9, n.4, p.21 – 31, out./dez. 2004. ABRhidro. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v9n4.p21-31>.

SUN, J.; LIN, B.; LI, K.; JIANG, G. A modelling study of residence time and exposure time in the Pearl River Estuary, China. **Journal of Hydro-environment Research**, v.8, n.3, p. 281 – 291, 2014. ELSEVIER. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2013.06.003>.

TEIXEIRA, R. L.; SÁ, H. S. Abundância de macrocrustáceos decápodos nas áreas rasas do complexo lagunar Mundaú/Manguaba, AL. **Revista Brasileira de Biologia**, v.58, n.3, p.393-404, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0034-71081998000300005>.

USGS - United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 21 dez. 2018.

VIERO, D. P.; DEFINA, A. Water age, exposure time and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. **Journal of Marine Systems**, v.156, p.16 - 29, 2016. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.11.006>.

VILLANUEVA, T. C. B. Evolução geológica do estado de Alagoas. In: VILLANUEVA, T. C. B.; MARTINS, V. S. (Org.). **Geodiversidade do estado de Alagoas**. Salvador, BA: CPRM, 2016. Cap. 2.

ZIMMERMAN, J. T. F. Estuarine residence times. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Hydrodynamics of Estuaries. Volume I: Estuarine Physics**. CRC Press, 1988. Cap. 6.

APÊNDICE A – PARÂMETROS CONSIDERADOS NAS SIMULAÇÕES

SisBaHiA 10 - Modelos Hidrodinâmicos

Título: 1.ano_2006_valor_medio Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros | Fronteiras | Infiltração & Viscosidade | Dados Meteorológicos | Condições Iniciais | Absorção | Estruturas | Observações | Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Termos da Equação | Interfaces Dissipativas | Alaga & Seca | Ondas

Termos da equação do movimento

- Advecção
- Viscosidade turbulenta
- Atrito no fundo
- Filtragem espacial de turbulência
- Filtragem temporal de turbulência
- Efeito de Coriolis
- Gradiente de Densidade (Baroclínico)

Escala dos termos

Filtro espacial em X: 1.00

Filtro espacial em Y: 1.00

Filtro temporal: 1.00

Viscosidade: 1.00

Cte. de Von Karman: 0.4040

Simulação

Instante Inicial (s): 0.0000 Passo de Tempo (s): 10.0000

Instante Final (s): 31449600.0000

Modelo 3D

Número de Níveis: 2

Modo de Cálculo do Modelo 3D: Não calcula

Computa Evolução Morfológica do Fundo

Sedimentos Coesivos

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [Selecione]

Passo de Tempo (s): [Selecione]

Sedimentos não Coesivos

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [Selecione]

Passo de Tempo (s): [Selecione] Fórmula: [Selecione]

Modelo Sal & Temperatura Acoplado

Título: [Selecione]

Passo de Tempo (s): [Selecione]

Subdiretório de Resultados: MH1914493750

SisBaHiA 10 - Modelos Hidrodinâmicos

Título: 1.ano_2006_valor_medio Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros | Fronteiras | Infiltração & Viscosidade | Dados Meteorológicos | Condições Iniciais | Absorção | Estruturas | Observações | Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Termos da Equação | Interfaces Dissipativas | Alaga & Seca | Ondas

Interface de Elevação

- Nenhuma vez
- uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
- 1 vezes a cada passo de tempo

Peso de Ponderação: 0.5000

Interface de Velocidade

- Nenhuma vez
- uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
- 1 vezes a cada passo de tempo

Peso de Ponderação: 0.3333

Interface de Vazão Nodal e Elevação

- Nenhuma vez
- uma vez a cada 2 passo(s) de tempo
- 2 vezes a cada passo de tempo

Peso de Ponderação: 0.2500

Simulação

Instante Inicial (s): 0.0000 Passo de Tempo (s): 10.0000

Instante Final (s): 31449600.0000

Modelo 3D

Número de Níveis: 2

Modo de Cálculo do Modelo 3D: Não calcula

Computa Evolução Morfológica do Fundo

Sedimentos Coesivos

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [Selecione]

Passo de Tempo (s): [Selecione]

Sedimentos não Coesivos

Modelo de Transporte de Sedimentos Acoplado: [Selecione]

Passo de Tempo (s): [Selecione] Fórmula: [Selecione]

Subdiretório de Resultados: MH1914493750

Figura A.1 - Termos da equação e interfaces dissipativas utilizados nas simulações hidrodinâmicas

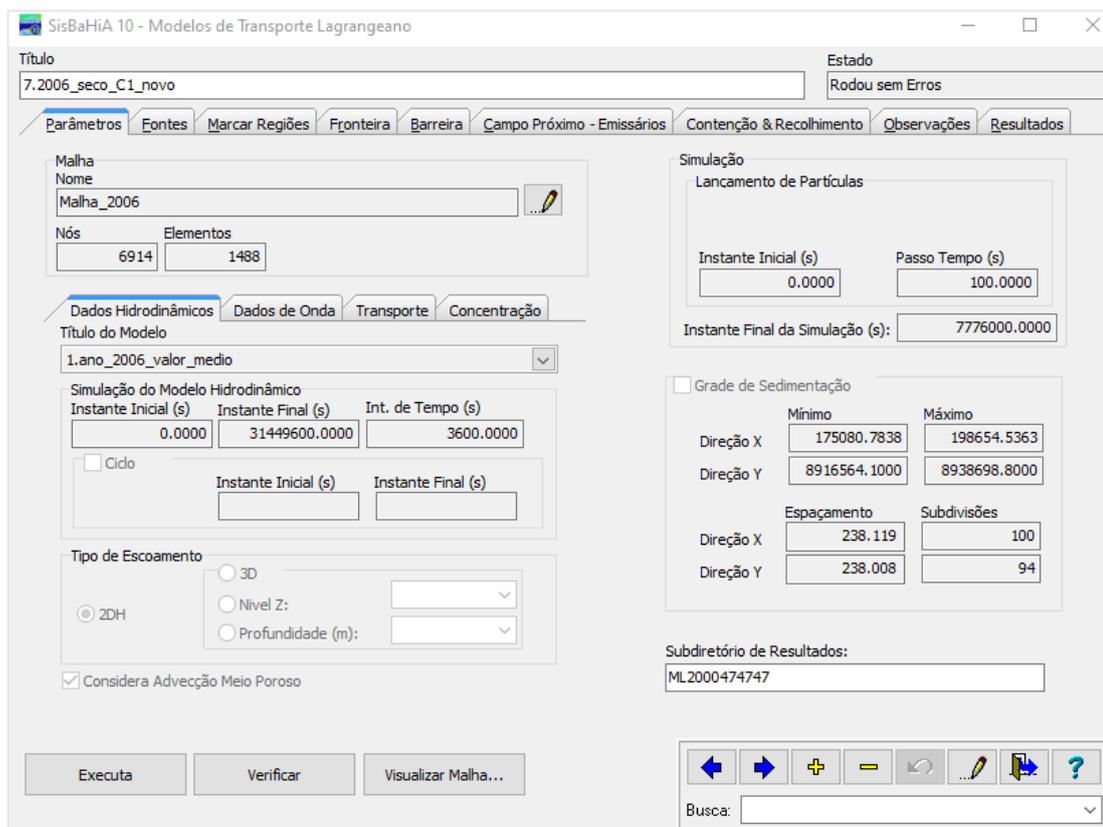
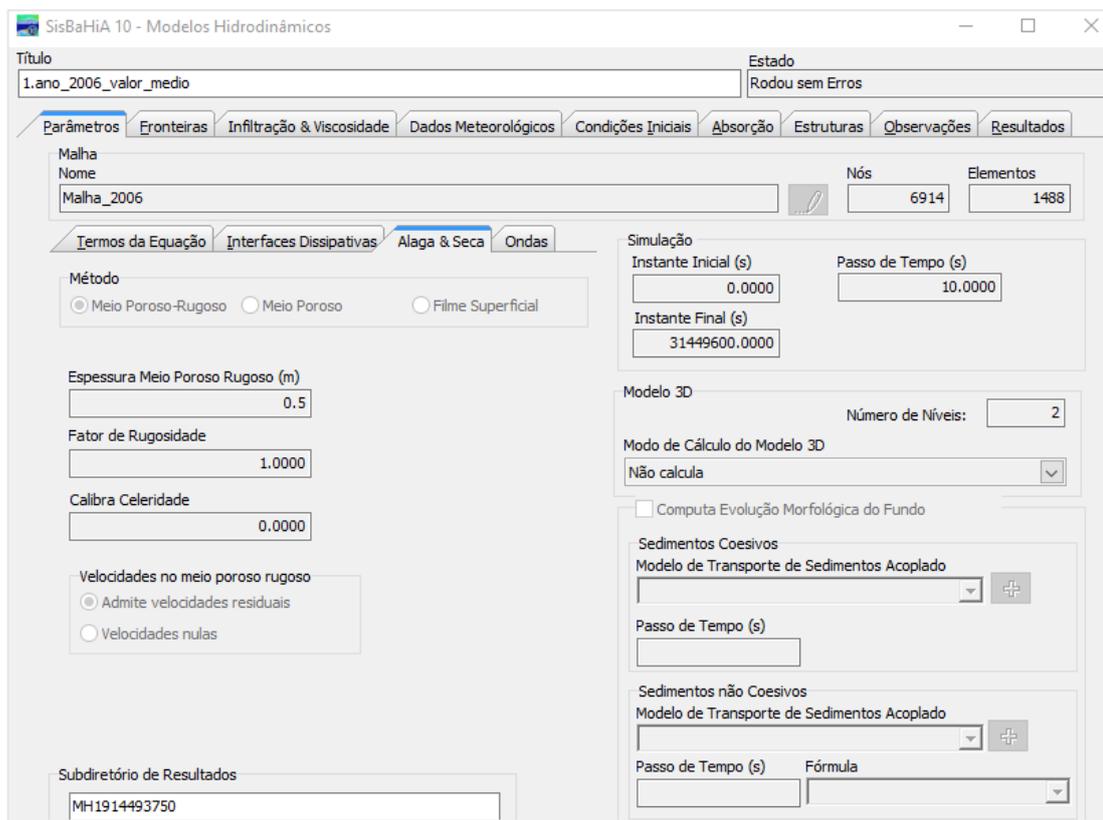


Figura A.2 - Parâmetros hidrodinâmicos utilizados nas simulações hidrodinâmicas e dados do lançamento de partículas do modelo de transporte lagrangeano no período seco

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 5.2006_seco_tx Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Tipos de Coeficientes
 Apenas Valores Constantes
 Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes
 Dxx: 1.0000E+00 Dxy (=Dyx): 5.0000E-02
 Dyy: 5.0000E-01

Escala da Dispersão
 Longitudinal: 1.0000 Transversal: 0.5000

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Pedet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH 3D Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 7776000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME1982628874

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 5.2006_seco_tx Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Termos de Filtragem Espacial
 Inclui permitindo difusão negativa
 Não inclui
 Inclui sem permitir difusão negativa

Termos de Filtragem Temporal
 Inclui permitindo difusão negativa
 Não inclui
 Inclui sem permitir difusão negativa

Escala dos termos
 Filtro espacial em X: 1.0000 Filtro espacial em Y: 1.0000
 Filtro temporal: 1.0000

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Peclet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH 3D Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 7776000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME1982628874

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Figura A.4 - Parâmetros de dispersão turbulenta utilizados nas simulações das taxas de renovações do modelo de transporte euleriano para o período seco

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 5.2006_seco_tx Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Concentrações
 Nenhuma vez
 uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
 1 vezes a cada passo de tempo
 Peso de Ponderação: 0.1000

Concentração Limite
 Mínima: 0.0000E+00 Máxima: 1.0000E+02

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Peclet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH
 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 7776000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME1982628874

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 5.2006_seco_tx Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Tipo do T90
 Constante Valor do T90 (seg.): 0.0000
 Variável

Vel. Sedimentação (mm/s): 0.0000

Tensão Crítica Fundo (N/m²): 0.0000

Tolerância (de 0 a 0.5): 0.0000

Fator de ressuspensão: 1

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Peclet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH
 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 7776000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME1982628874

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Figura A.5 - Parâmetros de interface dissipativa utilizados nas simulações das taxas de renovações do modelo de transporte euleriano para o período seco

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 6.2006_chuv_tx Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Tipos de Coeficientes
 Apenas Valores Constantes
 Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes
 Dxx: 1.0000E+00 Dxy (=Dyx): 5.0000E-02
 Dyy: 5.0000E-01

Escala da Dispersão
 Longitudinal: 1.0000 Transversal: 0.5000

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Peclet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH 3D Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 13046400.0000 Instante Final (s): 20822400.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME1992159355

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 2006_seco_id4 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Tipos de Coeficientes
 Apenas Valores Constantes
 Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes
 Dxx: 1.0000E+00 Dxy (=Dyx): 5.0000E-02
 Dyy: 5.0000E-01

Escala da Dispersão
 Longitudinal: 1.0000 Transversal: 0.5000

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Peclet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000
 Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):
 Tipo de Escoamento
 2DH 3D Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 10368000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME2051756899

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Figura A.6 - Parâmetros de dispersão turbulenta utilizados nas simulações das taxas de renovações e das idades das águas do modelo de transporte euleriano para o período seco

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 2006_seco_id4 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Terms de Filtragem Espacial

Inclui permitindo difusão negativa
 Não inclui
 Inclui sem permitir difusão negativa

Terms de Filtragem Temporal

Inclui permitindo difusão negativa
 Não inclui
 Inclui sem permitir difusão negativa

Escala dos termos

Filtro espacial em X: 1.0000 Filtro espacial em Y: 1.0000
 Filtro temporal: 1.0000

Calcula usando Espessura da Camada: 1.0000

Num. Peclet Máximo: 10.0000

Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico: 1.ano_2006_valor_medio

Simulação do Modelo Hidrodinâmico

Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000

Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):

Tipo de Escoamento: 2DH 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação

Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 10368000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados: ME2051756899

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 2006_seco_id4 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Concentrações

Nenhuma vez
 uma vez a cada 1 passo(s) de tempo
 1 vezes a cada passo de tempo

Peso de Ponderação: 0.1000

Concentração Limite

Mínima: 0.0000E+00 Máxima: 1.0000E+00

Calcula usando Espessura da Camada: 1.0000

Num. Peclet Máximo: 10.0000

Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico: 1.ano_2006_valor_medio

Simulação do Modelo Hidrodinâmico

Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000

Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):

Tipo de Escoamento: 2DH 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação

Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 10368000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados: ME2051756899

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Figura A.7 - Parâmetros de interface dissipativa utilizados nas simulações das idades das águas do modelo de transporte euleriano para o período seco

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 2006_seco_id4 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros | Fronteiras | Condições Internas | Fontes | Condição Inicial | Infiltração | Absorção | Observações | Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa | Reações

Tipo do T90
 Constante Valor do T90 (seg.): 10368000.0000
 Variável

Vel. Sedimentação (mm/s): 0.0000

Tensão Crítica Fundo (N/m²): 0.0000

Tolerância (de 0 a 0.5): 0.0000

Fator de ressuspensão: 1

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000

Num. Pedet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio

Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 31449600.0000 Int. de Tempo (s): 3600.0000

Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):

Tipo de Escoamento
 2DH
 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 10368000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME2051756899

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Sisbahia 10 - Modelos de Transporte Euleriano

Título: 2006_chuv_id4 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros | Fronteiras | Condições Internas | Fontes | Condição Inicial | Infiltração | Absorção | Observações | Resultados

Malha
Nome: Malha_2006 Nós: 6914 Elementos: 1488

Dispersão Turbulenta | Filtragem | Interface dissipativa | Reações

Tipos de Coeficientes
 Apenas Valores Constantes
 Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes
 Dxx: 1.0000E+00 Dxy (=Dyx): 5.0000E-02
 Dyy: 5.0000E-01

Escala da Dispersão
 Longitudinal: 1.0000 Transversal: 0.5000

Calcula usando
 Espessura da Camada: 1.0000

Num. Pedet Máximo: 10.0000
 Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico
 1.ano_2006_valor_medio

Simulação do Modelo Hidrodinâmico
 Instante Inicial (s): 13046400.0000 Instante Final (s): 23414400.0000 Int. de Tempo (s): 60.0000

Ciclo Instante Inicial (s): Instante Final (s):

Tipo de Escoamento
 2DH
 3D
 Nivel Z:
 Profundidade (m):

Simulação
 Instante Inicial (s): 13046400.0000 Instante Final (s): 23414400.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados
 ME2051353785

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Figura A.8 - Parâmetros de dispersão turbulenta e dados das simulações das idades das águas do modelo de transporte euleriano