



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

ANA CAROLINA CAVALCANTE DE LIMA

**CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS E ESTIMATIVA DO TEMPO DE
RESIDÊNCIA NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR
MUNDAÚ/MANGUABA (AL) ATRAVÉS DE MODELAGEM
COMPUTACIONAL.**

**MACEIÓ/AL
2017**

ANA CAROLINA CAVALCANTE DE LIMA

**CONDIÇÕES HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TEMPO DE
RESIDÊNCIA NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR
MUNDAÚ/MANGUABA (AL) ATRAVÉS DE MODELAGEM
COMPUTACIONAL.**

Dissertação apresentada ao
Departamento de Meteorologia / CCEN/
ICAT-UFAL, para obtenção do título de
Mestre em Meteorologia - Área de
concentração em Processos de
Superfície.

Orientador: Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo

MACEIÓ/AL
2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

L732c Lima, Ana Carolina Cavalcante de.
Condições hidrodinâmicas e estimativa do tempo de residência no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú/Mangaba (AL) através de modelagem computacional / Ana Carolina Cavalcante de Lima. – 2017.
102 f. : il.

Orientador: Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas, Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 99-102.

1. Estuários – Modificações físicas. 2. Tempo de resistência. 3. MIKE – 21 – Modelo computacional. I. Título.

CDU: 556.546

Certificado de apresentação

**CONDIÇÕES HIDRODINÂMICA E ESTIMATIVA DO TEMPO DE
RESIDÊNCIA NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR
MUNDAÚ/MANGUABA (AL) ATRAVÉS DE MODELAGEM
COMPUTACIONAL.**

Dissertação apresentada ao Departamento de Meteorologia / CCEN/ ICAT-UFAL, para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia** - Área de concentração em Processos de Superfície.

APROVADO EM: ____/____/_____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo
Universidade Federal de Alagoas
Orientador

Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso
Universidade Federal de Alagoas
Membro interno

Prof. Dr. Alessandro Luvison Bérghamo
Universidade Federal de Itabubá
Membro externo

Maceió-AL, 14 de julho de 2017.

A minha avó que tanto amo, Minervina
Lourenço de Lima.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os professores que lecionaram nesses 2 anos de Pós-graduação em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas no Instituto de Ciências Atmosféricas. Ao professor Carlos Ruberto Fragoso pela disponibilidade de dados e tornar o estudo possível. Aos amigos que fiz durante esse período, em especial Thaise Gomes da Silva, Nareida Simone Delgado Cruz, Edmara Ramos Melo, pelo incentivo, conversas e descontrações. Ao Adsson André da Silva Gomes por todo carinho, amor e apoio na realização deste trabalho.

Aos colegas de Laboratório de Oceanografia Física – UFAL, em especial Sara da Mota Ribeiro. Ao Professor e Orientador Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo por todo conhecimento passado, por toda paciência e compreensão das minhas limitações e por fazer esse trabalho se tornar real. E por fim, agradeço a minha família, meus pais Elson e Socorro, meu irmão Bruno, minha tia Graça Rodrigues e avó Minervina Lourenço, que torce por minhas realizações.

RESUMO

As lagoas Mundaú e Manguaba compõem o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), localizada no Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, são típicas lagoas costeiras conectadas com o oceano por canais estreitos e que sofrem com acelerado processo de degradação ambiental devido à práticas antrópicas deteriorantes como lançamento de esgoto sanitário, efluentes industriais, exploração dos recursos naturais. A modelagem em ambientes estuarinos tem sido amplamente utilizada como ferramenta auxiliares em tomadas de decisões em questões ambientais. O trabalho visou estudar as regiões mais suscetíveis a problemas relacionados a qualidade da água dentro do CELMM de acordo com o tempo de residência, calculado a partir do modelo computacional Mike 21. O tempo de residência nesse ambiente foi compreendido através de um traçador conservativo contendo 1kg/m^3 de uma substância hipotética dentro do CELMM e fora, na região costeira, contendo 0 kg/m^3 . Foram simulados o tempo de residência no período de 2 meses, julho e agosto, com dados históricos de vazão durante os anos de 1978 a 2016 e com dados diários reais de vazões em 2016. Os resultados da simulação mostraram que as lagoas são fortemente influenciadas pelas descargas fluviais dos principais rios afluentes, rio Mundaú e Paraíba do Meio, onde as altas e constantes descargas fluviais históricas 1978 - 2016 resultaram em tempos de renovação de 14 e 30 dias, para Mundaú e Manguaba, respectivamente. As áreas que necessitaram de mais tempos para atingir 37% da concentração do traçador foram: próximos as margens, ao leste da Mundaú e ao norte da Manguaba. A ausência de vazão com dados reais para julho na laguna Manguaba resultou em um retardo no tempo de residência onde as simulações no período de 2 meses não foram suficientes para atingir 37% da concentração do traçador em toda a área da laguna. A circulação no interior do CELMM mostrou ser bem limitada devido aos estreitos e irregulares canais de ligação com o oceano, com baixas eficiências na comunicação entre as lagoas, refletindo numa redução da amplitude da maré no interior dos ambientes, as máximas velocidades das correntes foram encontradas em períodos de marés de vazante.

Palavras-chaves: Tempo de residência, MIKE 21, Mundaú, Manguaba.

ABSTRACT

The Mundaú and Manguaba lagoons compose the Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), located in Alagoas, in the Northeast of Brazil, are typical coastal lagoons connected to the ocean by narrow channels and suffering an accelerated process of environmental degradation due to deteriorating anthropogenic practices such as sanitary sewage, industrial effluents, the exploitation of natural resources. Modeling in estuarine environments has been widely used as aids in decision making in environmental issues. The study aimed to study the regions most susceptible to problems related to water quality within the CELMM according to the residence time calculated from the Mike 21 computational model. The residence time in this environment was comprised by a conservative tracer containing 1kg/m^3 of a hypothetical substance within the CELMM and outside, in the coastal region, containing 0 kg/m^3 . It was simulated the residence time in the period of 2 months, July and August, with climatological data of flow during the years of 1978 to 2016 and with data of real of flows in 2016. The results of the simulation showed that the lagoons are strongly influenced by the fluvial discharges from the main affluents rivers, Mundaú river and Paraíba do Meio, where high and constant climatological river discharges resulted in renewal times of 14 and 30 days, respectively for Mundaú and Manguaba. The areas that needed more time to reach 37% of the tracer concentration were: near the banks, east of Mundaú and north of Manguaba. The absence of flow with real data for July in the Manguaba lagoon resulted in a delay in residence time where the simulations in the 2-month period were not sufficient to reach 37% of the tracer concentration in the entire lagoon area. Circulation within the CELMM showed to be very limited due to the narrow and irregular channels of connection with the ocean, with low communication efficiencies between the lagoons, reflecting in a reduction of the amplitude of the tide inside the environments, the maximum currents velocities were found in periods of flusing tide.

Keywords: Residence time, MIKE 21, Mundaú, Manguaba.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos e forçantes locais e remotas na bacia de drenagem e no oceano adjacente determinantes de características e da dinâmica de um estuário.....	19
Figura 2: Diagrama esquemático de um estuário do tipo cunha salina.....	20
Figura 3: Diagrama esquemático de um estuário do tipo parcialmente misturado.....	21
Figura 4: Diagrama esquemático de um estuário do tipo completamente misturado.....	22
Figura 5: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental.....	27
Figura 6: Localização do CELMM e dos principais rios afluentes.....	34
Figura 7: Dados históricos de precipitação da estação 82994 localizada no município de Maceió entre as coordenadas: latitude -9.66; longitude -35.7.....	39
Figura 8: Dados históricos de temperatura da estação 82994 localizada no município de Maceió entre as coordenadas: latitude -9.66; longitude -35.7.....	39
Figura 9: Batimetria da Laguna Mundaú.....	46
Figura 10: Batimetria da Laguna Manguaba produzidas pela PORTOBRÁS/INPH.....	47
Figura 11: Batimetria da Laguna Manguaba produzidas pela PORTOBRÁS/INPH.....	48
Figura 12: Extração dos dados batimétricos durante a execução no Arcgis.....	48
Figura 13: Detalhe da malha de discretização em elementos finitos e batimetria do CELMM.....	49
Figura 14: Localização da estação de cólera de dados de maré.....	50
Figura 15: Localização das estações utilizadas como condição de contorno do modelo.....	51
Figura 16: Dados reais de vazão dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio para o ano de 2016...52	52
Figura 17: Dados históricos de vazão do Rio Mundaú da estação 39770000 localizada no município de Rio Largo entre as coordenadas: latitude -9.46°; longitude -35.85°.....	53
Figura 18: Dados históricos de vazão do Rio Paraíba do Meio da estação 39870000 localizada no município de Atalaia entre as coordenadas: latitude -9.50°; longitude -36.02°.....	53
Figura 19: Localização do Aeroporto Zumbi dos Palmares.....	54
Figura 20: Calibração do modelo Mike 21 através de dados observados de maré na estação do IMA, para o mês de julho de 2016.....	56
Figura 21: Validação do modelo Mike 21 através de dados observados de maré na estação do IMA, para o mês de agosto de 2016.....	56
Figura 22: Localização da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Manguaba. (MD) (ME).....	57
Figura 23: Localização da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Mundaú.....	58
Figura 24: Visão da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Mundaú.....	58
Figura 25: Sonda CTD para amostragem da salinidade e temperatura da água.....	59
Figura 26: ADCP utilizado para medição da velocidade e direção da corrente.....	60
Figura 27: Anemômetro portátil acoplado a uma bússola analógica utilizado para medição da velocidade e direção dos ventos.....	62
Figura 28: Distribuição dos ventos durante a campanha dos dias 14/10/2016 e 17/10/2016.....	63
Figura 29: Variações da maré para o período analisado. (Gerado a partir da maré prevista para o porto de Maceió, DHN da Marinha do Brasil).....	64
Figura 30: Distribuição espaço/temporal da salinidade no canal principal próximo à desembocadura da laguna Mundaú (Lat. 9° 42'30.58 S; Long. 35°47'47.35''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 14/10/2016.....	64
Figura 31: Distribuição espaço/temporal da salinidade no canal principal próximo à desembocadura da laguna Manguaba (Lat. 9° 43'57.27''S; Long. 35°49'20.47''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 17/10/2016.....	65

Figura 32: Distribuição espaço/temporal da temperatura no canal principal próximo à desembocadura da laguna Mundaú (Lat. 9° 42'30.58 S; Long. 35°47'47.35''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 14/10/2016.	66
Figura 33: Distribuição espaço/temporal da temperatura no canal principal próximo à desembocadura da laguna Manguaba (Lat. 9° 43'57.27''S; Long. 35°49'20.47''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 17/10/2016.	67
Figura 34: Componentes longitudinais (u) e transversais (v) nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba.	68
Figura 35: Velocidades das Componentes longitudinais (u) e transversais (v) em coletas realizadas no dia 14 e 17/10 nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba.	69
Figura 36: Distribuição das velocidades e direções das correntes em coletas realizadas no dia 14 e 17/10 nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba.	69
Figura 37: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados históricos durante os primeiros dias.	71
Figura 38: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados históricos a cada 5 dias.	73
Figura 39: Localização da extração dos dados históricos de concentração e de velocidades das componentes u e v no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação A2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação A3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação A4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação A5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A6: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação B2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação B3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação B4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação B5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação B6: Lat. -9.733; Long. -35.855.	75
Figura 40: Dados históricos de concentração da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.	76
Figura 41: Dados históricos de concentração da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.	77
Figura 42: Dados históricos de velocidade das componentes u e v da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.	78
Figura 43: Dados históricos de velocidade das componentes u e v da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.	79
Figura 44: Mapas de velocidade e direção das correntes com dados históricos no complexo estuarino lagunar Mundaú Manguaba.	80
Figura 45: Localização da extração dos dados históricos das correntes distribuídos espacialmente em 8 pontos no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.	81

Figura 46: Dados históricos de elevação das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.	82
Figura 47: Dados históricos de elevação das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.	82
Figura 48: Dados históricos de velocidades das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.....	83
Figura 49: Dados históricos de velocidades das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.....	84
Figura 50: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados reais durante os primeiros dias.	85
Figura 51: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados reais a cada 5 dias.	86
Figura 52: Localização da extração dos dados reais de concentração e de velocidades das componentes u e v no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação A2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação A3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação A4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação A5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A6: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação B2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação B3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação B4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação B5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação B6: Lat. -9.733; Long. -35.855.....	88
Figura 53: Dados reais de concentração da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.	89
Figura 54: Dados reais de concentração da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.	89
Figura 55: Dados reais de velocidade das componentes u e v da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.	90
Figura 56: Dados reais de velocidade das componentes U e V da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.	91
Figura 57: Mapas de velocidade e direção das correntes com dados reais no complexo estuarino lagunar Mundaú Manguaba.	92
Figura 58: Localização da extração dos dados reais das correntes distribuídos espacialmente em 8 estações no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2:	

Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.	93
Figura 59: Dados reais de elevação das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estações A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.	94
Figura 60: Dados reais de elevação das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.	95
Figura 61: Dados reais de velocidades das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.	96
Figura 62: Dados reais de velocidades das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.	96

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Estuário.....	17
2.1.1 Classificação.....	17
2.1.1.2 Estratificação de Salinidade	20
2.1.1.3 Geomorfologia	22
2.2 Tempo de residência estuarino	23
2.2.1 Importância para Biogeoquímica	23
2.3 Modelagem em recursos hídricos.....	24
2.4 Classificação dos modelos hidrodinâmicos.....	25
2.5 Processo de Modelagem.....	26
2.6 Estudos anteriores	28
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
3.1 Localização e Descrição.....	32
3.2 Características morfológicas e hidrográficas	34
3.3 Climatologia	36
3.4 Aspectos Socioeconômicos	40
3.5 Poluição ambiental no CELMM	40
4. METODOLOGIA	42
4.1 Definição do modelo computacional.....	42
4.2 Cenários simulados	44
4.3 Definição da área de estudo e do mapa base.....	45
4.4 Batimetria	45
4.5 Domínio do modelo hidrodinâmico	49
4.6 Forçantes do modelo hidrodinâmico	49
4.7 Validação e calibração do modelo hidrodinâmico	54
5. METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO DAS CORRENTES E SALINIDADE	56
5.1 Localização das estações de medição.....	57
5.2 Medições de salinidade	59
5.3 Medições de correntes.....	59
5.4 Medidas de vento	61
5.5 Processamento de dados.....	62
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
6.1 Coletas realizadas nos dias 14/10/2016 e 17/10/2016.....	63

6.2 Tempo de residência com dados históricos (1978 – 2016)	70
6.3 Variabilidade das correntes com dados históricos de vazão	78
6.4 Tempo de residência com dados observados de vazão	84
6.5 Correntes com dados observados de vazão	90
7. Conclusão	97
REFERÊNCIAS	98

1. INTRODUÇÃO

Devido as diversas atividades antrópicas em áreas costeiras, os ecossistemas estão constantemente sujeitos a degradação ambientais provenientes de lançamentos de efluentes domésticos e industriais, exploração indiscriminada dos recursos hídricos, entre outros, e quando esses impactos são maiores que a capacidade de auto recuperação do ambiente, comprometem todo o ecossistema prejudicando as atividades desenvolvidas na região (ANA, 2005; 2006). Devido a essa situação de degradação ambiental, se faz necessária a manutenção, preservação e recuperação desses ecossistemas, bem como a implementação de políticas e ações que possam proporcionar um desenvolvimento sustentável das regiões costeiras (ANA, 2006).

A escala temporal denominada tempo de residência é um indicador do comportamento ecológico, um parâmetro que tem se mostrado de grande eficiência ao determinar diretamente a capacidade de suporte para efluentes e resíduos de atividades antrópicas, esse parâmetro tem como finalidade determinar o tempo de duração de uma parcela d'água em um determinado sistema (ALVES E WASSERMAN, 2002). Estudos referentes a determinação do tempo de residência tornam-se de fundamental importância para processos químicos e biológicos num corpo d'água, dado que a determinação do tempo de renovação controla a concentração e capacidade acumulativa de todas as substâncias presentes em um ambiente aquático, o que permite conhecer a dinâmica, diluição e a permanência dessas substâncias, tendo implicações diretas na qualidade da água (AMBROSETTI, 2003).

Regiões em que apresentam maiores tempos de residência tendem a sofrer mais impactos por mostrarem baixas renovações de suas águas a lançamentos de poluentes do que regiões que apresentam menos tempos de residência. Além de quantificar o tempo do poluente, os resultados do tempo de renovação estão ligados aos processos de florações de algas e transporte de sedimentos, uma vez que o fluxo da coluna d'água para o sedimento de matérias particulados e substâncias adsorvidas a este, depende da velocidade vertical da partícula, profundidade da água e tempo de residência (BRAUNSCHWEIG, 2001).

O alto grau de poluição dentro do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú - Manguaba (CELMM) e as diversas atividades com elevado potencial poluidor na região demonstram a necessidade para elaboração de pesquisas, como esta aqui desenvolvida, pois a determinação do tempo de residência no CELMM é indispensável para avaliação da qualidade ambiental, já que suas águas são utilizadas para os mais diversos usos, como por exemplo: recreação, pesca, navegação, irrigação, abastecimento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Esse estudo visa estimar a variabilidade espacial do tempo de residência da água no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba com base em um modelo hidrodinâmico bidimensional.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- Caracterizar a circulação hidrodinâmica do CELMM;
- Quantificar o tempo de residência no CELMM por meio do modelo computacional MIKE 21;
- Avaliar áreas de maior/menor sensibilidade a processos de degradação ambiental de acordo com o tempo de residência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estuário

Estuários são corpos de água semifechados onde acontece a diluição mensurável da água do mar pela água doce proveniente da drenagem continental, tendo uma conexão livre com o mar aberto (Cameron & Pritchard, 1963).

Segundo Yáñez-Arancibia (1987) os estuários são ecossistemas abertos e dominados por processos físicos e subsídios de energia, com grande intercâmbio de matérias bióticas e abióticas provenientes de outros ecossistemas, incluindo água, sais minerais, sedimentos, matéria orgânica e organismos. A riqueza dos estuários, caracterizada por elevado suprimento de nutrientes de origem alóctone e consequentemente produção fitoplanctônica, transformam esses ecossistemas em berçários naturais para muitas espécies de peixes, crustáceos e outros animais que completam seus ciclos de vida nestes ecossistemas.

São ambientes altamente produtivos no aspecto ecológico por terem essencialmente essa interação com o mar, apresentam altas concentrações de nutrientes que estimulam sua produtividade primária, secundária e bacteriana (MIRANDA et al, 2002; SILVA et al, 2004). Regiões estuarinas, constituem ambientes de diversos usos como: desenvolvimento de ocupações populacionais, recreação, pesca, navegação, irrigação, fontes de abastecimento entre outros.

Os impactos sobre esse ambiente costeiro estão relacionados principalmente com alterações físicas, introdução a produtos tóxicos, o enriquecimento provocado por níveis excessivos de matéria orgânica e exploração econômica (DAY JR et al, 1989). Todas essas atividades e aquelas relacionadas a rápida expansão urbana apresentam grave impactos sobre esse ecossistema. (DIEGUES, 1994).

2.1.1 Classificação

Diversos autores descrevem diferentes classificações de estuários baseado em fundamentos de padrões de circulação, salinidade, características geomorfológicas. São apresentados a seguir as classificações de acordo com Pritchard (1955) e Kjerfve (1989), Pritchard (1967) e Fairbridge (1980).

2.1.1.1 Forçantes físicas

Segundo Miranda (2002) os processos físicos que ocorrem na bacia de drenagem e no oceano adjacente são responsáveis pela circulação e processos de mistura dentro de ambientes estuarinos. As atividades exercidas pelas forçantes variam de estuário para o outro, os principais processos, forçantes locais e remotas são ilustradas na figura 1. Entre elas, destacam-se em maior ou menor intensidade os ventos, descarga fluvial, marés e topografia.

Ventos

Os ventos são forçantes meteorológicos sazonais que promovem a aeração e a circulação de massas das águas estuarinas e costeiras, além de gerarem ondas e correntes nos estuários que intensificam a mistura vertical.

As lagoas Mundaú e Manguaba possuem limitada troca de água com o oceano e sua dinâmica se torna fundamentalmente determinada pelos ventos, com uma grande capacidade de acumulação de sedimentos, de eutrofização e de poluição, tornando um ambiente sensível a impactos antrópicos.

Descarga fluvial

A descarga fluvial e os gradientes longitudinais de salinidade são essenciais para a dinâmica do ambiente costeiro, dos processos de transporte e de mistura. Pela descarga de água doce são transportados sedimentos em suspensão e nutrientes orgânicos e inorgânicos, desempenhando uma grande importância para o desenvolvimento urbano, social e econômico dos estuários.

Marés

As oscilações periódicas e a amplitude de maré são determinantes para a caracterização dos estuários, são intimamente relacionados com o gradiente de salinidade e a circulação de massas. Estuário com aspectos de maré semidiurna, ocorrem duas preamares e duas baixas-mares em um dia lunar, em marés diurnas apenas uma preamar e uma baixa-mar aproximadamente iguais a cada dia lunar e em estuários de maré mista são encontrados duas preamares e duas baixas-mares com grande diferença de altura entre as mesmas segundo Dyer (1997).

As marés de enchente são responsáveis pela penetração de água salina ao longo do canal fluvial até distâncias variáveis, à medida que se verifica a máxima intrusão no estuário a

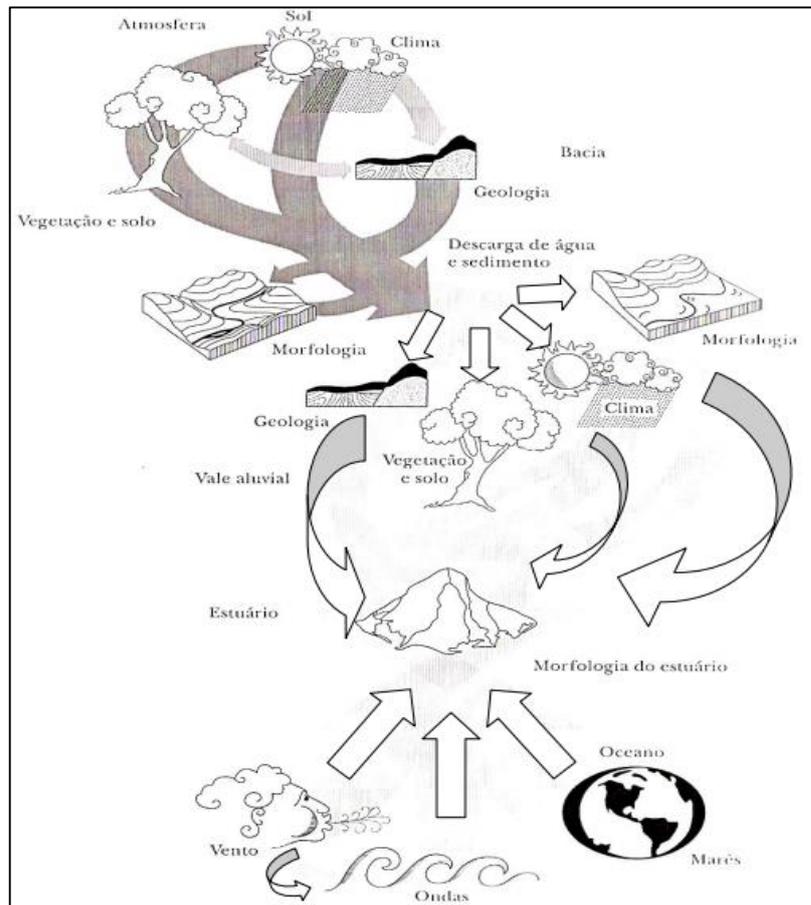
amplitude vai reduzindo, até desaparecer completamente. Marés de vazante processo contrário, com o auxílio da descarga fluvial podem aumentar as velocidades das correntes e carrear mais sedimentos para costa.

Topografia

A topografia está intimamente relacionada com a dinâmica do ambiente estuarino, o que torna essencial na distribuição de salinidade e na hidrodinâmica no seu interior devido a sua morfologia e declividade.

A topografia, em maior ou menor proporção, tende a condicionar as forçantes, segundo Dias (2002) as curvas dos estuários são capazes de produzir correntes laterais e alteração de salinidade. A estreita boca de um estuário pode provocar o aumento na velocidade do fluxo fluvial e por consequência a diminuição da ação das marés através da fricção. Um estuário aberto facilita a atuação das marés e gera uma predominância de água salgada.

Figura 1: Processos e forçantes locais e remotas na bacia de drenagem e no oceano adjacente determinantes de características e da dinâmica de um estuário.



Fonte: Miranda (2002).

2.1.1.2 Estratificação de Salinidade

Segundo Dame (2000) a salinidade é um indicador primário da circulação estuarina por causa do seu caráter conservativo, além de um fator determinante significativo da produtividade biológica, distribuição de organismos e estrutura de habitat. A entrada de água doce é o agente causador primário da variabilidade da salinidade em estuários.

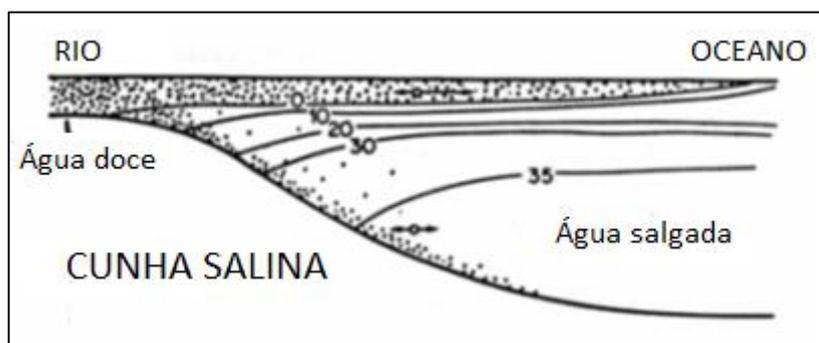
A salinidade torna-se uma barreira ecológica para os organismos, pois controla as espécies da flora e da fauna que podem sobreviver nas águas, nos sedimentos e ao longo de suas margens (KJERFVE & MAGILL, 1989; KJERFVE, 1990).

Conforme a classificação da estratificação vertical de salinidade por Pritchard (1955) e Kjerfve (1989) onde o fundamento é baseado conforme os principais fenômenos da circulação estuarina como a descarga do rio, da amplitude da maré e de características geométricas como a razão largura/profundidade. Classifica a salinidade em: cunha salina, moderadamente ou parcialmente misturado, completamente misturado (lateralmente estratificado e bem misturado).

Cunha salina

São estuários em que a salinidade das águas superficiais é menor que a salinidade das águas dos níveis inferiores, apresentando uma diferença acentuada no perfil vertical de salinidade. Segundo Stommel (1953) os estuários do tipo cunha salina são dominados pela descarga fluvial e são regiões típicas de micromarés, este tipo de estuário é descrito na figura 2, onde podemos observar a camada superficial deslocando-se estuário abaixo sobre a camada mais densa.

Figura 2: Diagrama esquemático de um estuário do tipo cunha salina.



Fonte: Pritchard (1989).

Parcialmente misturado

Estuários com gradientes verticais moderados de salinidade são denominados parcialmente misturados, nesses ambientes a energia da maré tem grande influência, porém a contribuição da descarga fluvial é compatível com a influência da maré. Devido a mistura ocasionada pelas marés, a interface entre a camada superficial e o fundo é desaparecida, e as águas provenientes da descarga fluvial e do oceano são transportados para cima e para baixo através dos vórtices turbulentos (DIAS, 2002).

Figura 3: Diagrama esquemático de um estuário do tipo parcialmente misturado.



Fonte: Pritchard (1989).

Completamente misturado

Forma-se em geral em canais rasos e estreitos forçados por descarga fluvial pequena e com grande atuação da maré, as condições naturais nestes estuários apresentam pequena estratificação vertical de salinidade, o fluxo vertical de sal é desprezível e o processo de mistura ocorre principalmente na direção longitudinal (DYER, 1997).

A salinidade pode aumentar gradativamente estuário abaixo devido ao cisalhamento lateral podendo gerar condições homogêneas lateralmente, o movimento médio está orientado nessa direção em todas as profundidades, indicando um estuário bem misturado (MIRANDA, 2002).

Figura 4: Diagrama esquemático de um estuário do tipo completamente misturado



Fonte: Pritchard (1989).

2.1.1.3 Geomorfologia

Utilizando o critério de classificação do Pritchard (1967) e Fairbridge (1980) a tabela abaixo resume as características presentes num estuário para explicar a relação entre a estrutura do sistema e os fenômenos que o formaram diferentes tipos de morfologia.

Tabela 1: Classificação dos estuários quanto a geomorfologia.

Tipos		Características
Alto relevo	Fiorde	Estuários de seção em U, em geral originados por glaciares, caracterizados por grandes profundidades e estratificação.
Relevo médio	Rias ou de Vale inundado	Estuários com seção em V em que a parte terminal do vale tem uma cota abaixo do nível do mar.
Baixo relevo	Planície costeira	De configuração em funil, com ou sem barra na ligação com o mar.
	De restinga	Estuários gerados quando uma cadeia de ilhas barreira delimita uma zona de costa onde deságuam cursos de água doce, com restinga paralela à costa.
	Cego	Com ligação ao mar temporária.

Delta estuarial		Com braços efêmeros fora do canal principal.
Composto	De origem tectônica	Originados por movimentos tectônicos como falhas ou subsidência local. Com canal de ligação ao mar e estuário de planície costeira no interior.

Fonte: Pritchard (1967).

Segundo ANA (2006) as lagoas Mundaú e Manguaba foram originadas pelo barramento da foz dos rios Mundaú e Paraíba do Meio por deposição dos sedimentos marinhos e por consequência houve afogamento dos seus leitos, quando o nível do mar subiu no Holoceno (OLIVEIRA et al, 1993).

Os aspectos geomorfológicos de um ambiente (parâmetros caracterizadores da largura, do comprimento e da profundidade do estuário) descrevem os processos de transporte, principalmente de sedimentos, o que tornam suas informações prioritárias quanto aos estudos voltados para a circulação do sistema.

2.2 Tempo de residência estuarino

O termo tempo de residência no ambiente lagunar é usado para designar o tempo médio em que o material dissolvido e particulado fica retido no ambiente antes de serem transportados para o oceano adjacente (GÓMEZ-GESTEIRA et al, 2003). Constituindo em um parâmetro conveniente que representa na escala de tempo os processos de transporte físicos que ocorrem nestes ambientes, e muitas vezes são usados para comparação na escala de tempo de processos biogeoquímicos (CUCCO & UMGIESSER, 2006). Segundo Ambrosetti (2003) este parâmetro controla a concentração e a capacidade acumulativa de todas substâncias presentes no sistema. Em lagoas altamente impactadas o estado trófico pode estar intimamente relacionado com o tempo de residência, havendo uma relação inversa entre o tempo de residência e a renovação das águas nos estuários, relação essa, que condiciona a amplitude dos impactos causados pelo lançamento de poluentes (Knoppers et al, 1991).

2.2.1 Importância para Biogeoquímica

Os processos físicos e biológicos e as reações químicas caracterizam a sensibilidade dos ecossistemas naturais aos impactos ambientais, incluindo as próprias atividades antrópicas, afetando a dinâmica dos nutrientes nos ecossistemas aquáticos (ODUM, 1986).

Segundo Mcglathery et al, (2001) o tempo de residência da água, correntes, efeitos das marés, ondas e acúmulo de sedimentos em suspensão estão intimamente relacionados com os nutrientes através dos processos biogeoquímicos. Segundo Wang (2004) o poluente presente no ambiente aquático efetua mais efeitos se sua escala de tempo bioquímico é comparável ou mais curta do que o tempo de residência e, em relação a produção primária, mais lenta se sua escala de tempo de desenvolvimento for maior que o de residência. O volume de água transportado pelos rios varia conforme características geomorfológicas locais como visto anteriormente, a turbulência e a velocidade de fluxo dos rios afetam diretamente a quantidade de material carregado designando a capacidade de erosão, transporte e deposição final de detritos.

Sistemas lagunares são ambientes costeiros muito vulneráveis as atividades humanas, através dos despejos de efluentes domésticos e industriais, o uso de fertilizantes e da queima de combustíveis fósseis, a carga de nitrogênio, fósforo e de carbono, o que implica no mal desenvolvimento turístico e/ou aquicultura, no desequilíbrio entre as forças de erosão e sedimentação, na modificação das taxas e balanços dos processos biogeoquímicos e gerando a eutrofização (ANA, 2005; 2006).

2.3 Modelagem em recursos hídricos

Os recursos disponíveis através da modelagem tornam-se cada vez mais importantes na estrutura de projetos, desenvolvimento de trabalhos e a grande motivação para o uso dessa ferramenta é a visão dinâmica dos processos em ambientes de corpos d'água naturais como estuários, lagoas, zona costeira adjacente das bacias hidrográficas e reservatórios. Na prática, as aplicações de modelos a corpos d'água naturais consiste na modelagem hidrodinâmica e no transporte de substâncias dissolvidas ou em suspensão.

Modelagem permite, devido à escassez de dados proveniente de altos custos, interpolar e extrapolar espacialmente e temporalmente as informações obtidas para regiões nas quais possuem poucos pontos de coletas de dados, portanto auxiliam na explanação de medições estabelecidas em estações pontuais (Rosman, 2001).

Sem dúvida os modelos desempenham um papel fundamental como ferramenta no gerenciamento de corpos d'água e, submetidos a um rigoroso processo de desenvolvimento, calibração e verificação, tornam-se uma ferramenta razoável para uma dada região e até o uso

de previsão, tendo em vista problemas de limitação de dados durante o processo de andamento do mesmo (Hassan, 2004).

2.4 Classificação dos modelos hidrodinâmicos

Segundo Rosman (1997), os modelos hidrodinâmicos adequados a sistemas estuarinos podem ser divididos em três tipos, variando de acordo com a sua complexidade, conforme mostra a tabela 2:

Tabela 2: Classificação dos modelos hidrodinâmicos.

Modelos	Descrição
Tridimensionais	Possuem todas as dimensões (x,y,z,t), sendo z a dimensão vertical. Os modelos 3Dg, ou gerais, incluem gradientes de densidade. Sendo assim, se aplicam a qualquer caso. Já o modelo 3D possui uma hidrodinâmica mais simples, pois não incluem gradientes de densidades. São aplicáveis a corpos d'água com coluna d'água homogênea ou pouco estratificada, com o objetivo de se obter perfis verticais das variáveis.
Bidimensionais	Subdivididos em 2 tipos: modelo bidimensional na horizontal ou modelo em planta (2DH) e modelo bidimensional na vertical (2DV). No modelo 2DH as variáveis são médias verticalmente, ou seja, possuem somente as dimensões (x,y,t). São aplicáveis a corpos d'água pouco estratificados, tendendo a verticalmente homogêneos. No modelo 2DV as variáveis são médias lateralmente, restando as dimensões (x,z,t). São aplicáveis a corpos d'água com estratificação vertical de densidade, mas com pouca variação lateral. Normalmente são corpos d'água estreitos.
Unidimensional	Aplicável a corpos d'água longitudinais com seção transversal homogênea, como canais. Considerando o eixo x como longitudinal, têm-se somente as dimensões (x,t).

Fonte: Adaptado de Rosman (1997).

A escolha do modelo a ser aplicado depende antes de tudo da relação custo/benefício. A adoção do modelo tridimensional geral é possível para todos os casos. Entretanto, os custos relacionados a sua utilização, seja o tempo ou o tipo de ferramenta a ser utilizada, são maiores, oferecendo resultados que podem ser alcançados com modelos mais simplificados, dependendo das características do corpo d'água a ser estudado e da qualidade dos resultados requeridos (Rosman, 1997).

Considerando a condição de um estuário verticalmente homogêneo, suas características morfológicas e a objetividade desse estudo, o modelo aplicado no Complexo Estuarino Mundaú – Manguaba foi o modelo bidimensional 2DH.

2.5 Processo de Modelagem

Para iniciar o processo da modelagem é necessária uma projeção, ou seja, aplicação de leis e conceitos físicos em um modelo matemático, numérico ou físico. Essa projeção é chamada modelo conceitual, isto é, exprime a concepção do fenômeno de interesse, suas causas e efeitos, compreender as interações e relevância dos agentes intervenientes na sua ocorrência, permitindo traduzir essa concepção em linguagem matemática. Segundo Rosman (2001) uma vez elaborado o modelo conceitual, o desenvolvimento dos demais modelos (matemáticos, numéricos e/ou físicos) será mais consistente, bem como a interpretação e avaliação dos resultados obtidos por estes.

Os modelos mais comumente utilizados são os matemáticos e os numéricos, sendo que o primeiro exprime de maneira mais robusta os processos físicos do modelo conceitual ou do fenômeno em questão, e o segundo traduz o modelo matemático para diferentes métodos de cálculo, por exemplo, diferenças finitas, elementos de contorno, elementos e volumes finitos. O diagrama que segue representa resumidamente o processo de modelagem adaptado de Rosman (2001) (Figura 5).

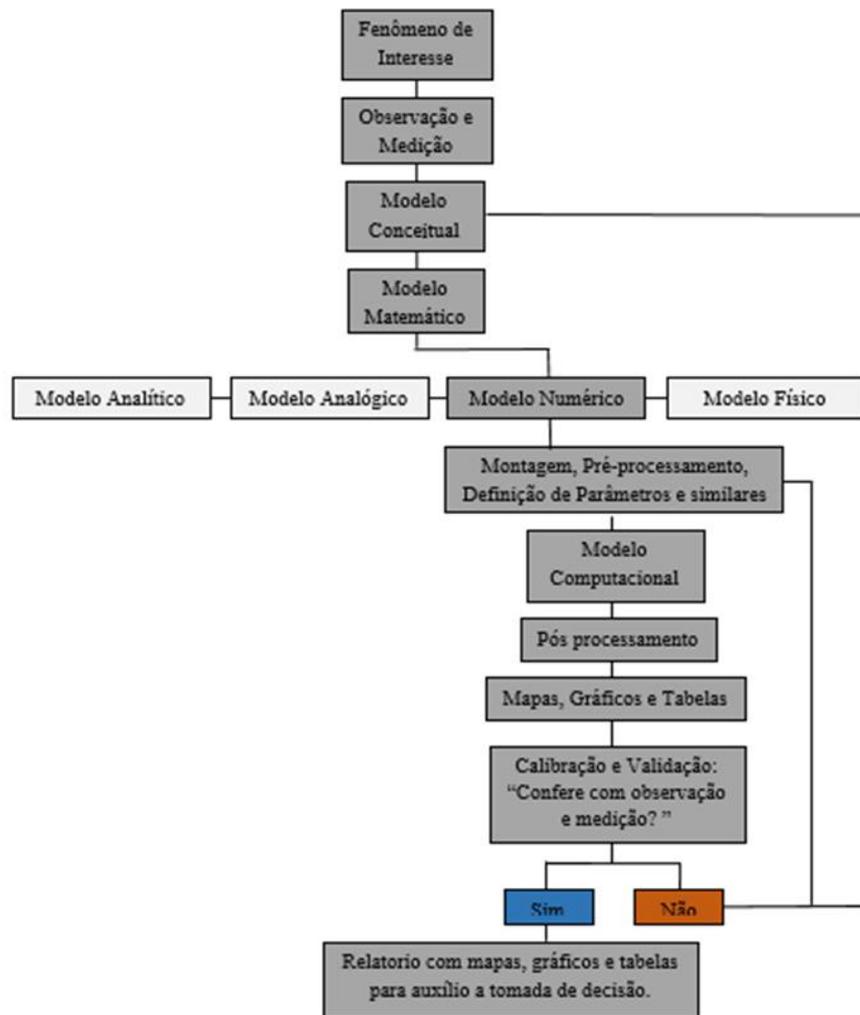
Os modelos físicos foram muito utilizados em tempos remotos, quando não se havia recursos computacionais para expressar o fenômeno de interesse. Estes modelos são verdadeiros protótipos ou maquetes da situação a qual se quer estudar, exigindo um esforço de tempo e espaço, além de custo financeiro alto.

A etapa de pré-processamento inclui a obtenção de medidas quantitativas para as grandezas envolvidas no modelo conceitual e matemático. Estas informações consistem nos

dados de entrada do modelo, que devem ser organizados e preparadas de acordo com o modelo numérico elaborado.

O pós-processamento dos dados se faz necessário para que as informações geradas pelo modelo computacional possam ser facilmente analisadas e interpretadas. Neste sentido, a elaboração de mapas, gráficos e tabelas facilitam o entendimento do fenômeno a que os valores numéricos obtidos se referem.

Figura 5: Diagrama do processo de modelagem hidrodinâmica ambiental.



Fonte: adaptado de ROSMAN (2001).

A etapa final de calibração e validação é essencial e merece maior atenção, uma vez que assegura se o modelo desenvolvido é capaz de representar de maneira adequada o fenômeno de interesse.

No processo de calibração variam-se os parâmetros (coeficientes) do modelo, dentro de limites aceitáveis e pré-estabelecidos, com o objetivo de se obter um bom ajuste entre os dados

estimados (calculados) pelo modelo a aqueles observados (medidos) em campo (ALBANO, 2004; VON SPERLING, 2007). Isto é, averiguar se as escalas características do fenômeno e do modelo são compatíveis; checar a geometria do domínio e suas feições; ajustar parâmetros relativos ao campo de velocidade (turbulência, rugosidade, profundidade), respectivamente. Na prática, a calibração do modelo pode ser descrita por um parâmetro que reflete o ajuste dos resultados em relação aos dados de campo.

E por fim, a validação dos modelos, que refere a um processo longo e iterativo que resulta nesse ganho de credibilidade e faz com que o modelo seja reformulado caso sejam encontradas deficiências no mesmo (HASSAN, 2004).

Segundo Albano (2004) a validação é a verificação do modelo calibrado utilizando um serie de dados de campo diferente daquela utilizada na calibração. Simula-se uma situação que tenha sido adequadamente medida e o modelo mostrar-se-á adequado quando os valores observados forem similares aos simulados no decorrer da série. Em resumo é um processo de avaliação e verificação dos diferentes aspectos do modelo, com o propósito de poder utilizá-lo como ferramenta de previsão para a tomada de decisão.

2.6 Estudos anteriores

Neste item é apresentada, de forma resumida, alguns trabalhos anteriores que abordam a modelagem computacional na região do CELMM e trabalhos de interesse para o estudo apresentado.

2.6.1 Trabalhos de modelagem computacional de interesse para o estudo

Estudo realizado por Larsson e Nilsson (2014) apresentou modelagem hidrodinâmica no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú - Manguaba com o objetivo de construir um modelo hidrodinâmico atualizado com novas medições de batimetria, sedimentos ente os outros parâmetros com o modelo IPH-ECO.

O modelo IPH-ECO é um modelo hidrodinâmico e de qualidade de água tridimensional para corpos d'água e possui dois módulos: hidrodinâmico detalhado, descrevendo os fluxos quantitativos e nível de água; o modulo de qualidade da água, que trata dos mecanismos de transporte de nutrientes e todas interações de organismos aquáticos da cadeia alimentar, essas informações estão na página (<http://ipheco.org>) para livre acesso. O modelo hidrodinâmico IPH-ECO é baseado no modelo TRIM (Cheng et al., 1993), que utiliza uma abordagem Eurliana-Langrangeana para a resolução das equações de momento e continuidade.

Os dados batimétricos adotados pelos autores consistiram em um preenchimento de medições existentes para atualizar de certa maneira a batimetria no CELMM, a batimetria na laguna Mundaú foi adotada de coletas realizadas pela Agencia Nacional de Águas em 2012, a mesma utilizada no presente estudo. Em 2011 houve medições efetuadas com o instrumento ADP (Perfilador Acústico Doppler) em parte da laguna Manguaba pela Petrobrás. De acordo com os autores, os dados faltantes na parte sul da comprida laguna Manguaba foi estabelecida com os dados de 1985 pelas cartas topohidrográficas produzidas pela PORTOBRÁS/INPH (1985).

Todos esses arranjos refletiram nos resultados, onde a calibração da laguna Manguaba não apresentou resultados satisfatórios, diferente da laguna Mundaú que foi calibrada com alta correlação entre os dados do sensor e modelo, representando diversos resultados, entre eles o tempo de residência descritos em dois métodos com o modelo IPH-ECO e com leituras dos sensores. Os resultados do modelo IPH-ECO mostraram tempos de renovação na ordem de 19 e 42 dias durante a estação seca para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente.

Lins et al, (2013) realizaram simulações da hidrodinâmica no complexo estuarino lagunar Mundaú – Manguaba através do modelo matemático com o objetivo de representar respostas a determinados eventos na região de estudo. Os autores utilizaram o modelo computacional IPH-ECO versão 2.0, descrito anteriormente, aplicado a uma discretização em grades não estruturadas triangulares no CELMM realizada pelo software JANET. As informações batimétricas no CELMM foram extraídas das cartas topohidrográficas produzidas pela PORTOBRÁS/INPH (1985), os autores utilizaram dados hidrológicos no mesmo período dos dados batimétricos. A calibração ocorreu no período de 7 dias com dados medidos de nível da água em 3 estações maregráficas.

De acordo com o estudo, os resultados apontaram que a hidrodinâmica do CELMM é fortemente influenciada pelo regime de maré, onde em termos de intensidade, existiu diferenças significativas nas características do escoamento entre as marés de sizígia e quadratura, apontando maiores valores em condições de maré de sizígia.

Cavalcante et al, (2012) verificou o tempo de residência e a sua relevância para a qualidade da água na Lagoa Palmeira Jumeirah - LPJ (Dubai, Emirados Árabes), foi utilizado o mesmo modelo usado no presente estudo o Mike 21 para o calcular o tempo médio de permanência nessa lagoa semifechada formada pela ilha artificial. A metodologia aplicada desenvolvendo um modelo de transporte hidrodinâmico e soluto mostrou ser ideal de acordo com os resultados expostos. O estudo concluiu que tempo de residência médio variou

especialmente ao longo da LPJ dependendo das marés de enchente e o lado leste mostrou tempos maiores que o lado oeste. Essa pesquisa forneceu informações importantes para a avaliação no impacto sobre as condições de qualidade das águas costeiras no Oriente Médio.

Estudo realizado por Patgaonkar et al, (2012) analisou o tempo de residência dos poluentes no Golfo de Kachchh no Noroeste do Mar da Arábia, o modelo hidrodinâmico Mike 21 2D verticalmente integrado foi aplicado ao estudo. O Golfo de Kachchh – GoK é conhecido por sua maré alta, a elevação das marés atinge cerca de 6,6 m em Kandla e 7,2 m próximo ao porto de Navlakhi, o domínio computacional do modelo se estende de uma ponta Okha para perto de Navlakhi. Geralmente o tempo de residência é relativamente curto para o Golfo de Kachchh, e, portanto, suas águas não são poluídas, o tempo de residência aumenta à medida que nos movemos da boca para a região mais interna. O lado leste do GoK mostrou um tempo de residência relativamente grande, da ordem de 2-4 dias, garantindo cautela ao liberar resíduos industriais no nordeste do Golfo. Nas regiões situadas muito próximas do limite aberto, onde as águas do GoK trocam livremente com o mar da Arábia, a diluição ocorre rapidamente com as águas que entram e, portanto, o tempo de residência é da ordem de 1 dia.

Roversi (2012) apresentou um estudo hidrodinâmico e de renovação das águas do sistema estuarino de Santos localizado na região metropolitana da baixada Santista, no Estado de São Paulo. Modelo utilizado para as simulações foi o SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). O SisBaHiA segue a linhagem de modelos FIST (Filtered in Space and Time), otimizado para corpos de água naturais. Neste tipo de modelo a turbulência é modelada em técnicas de filtragem. Segundo Rosman (2001) o sistema de discretização espacial é otimizado para corpos de água naturais, pois permite ótima representação de contornos recortados e batimetrias complexas como usual em tais corpos de água. A discretização espacial é preferencialmente feita via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, mas pode igualmente ser feita via elementos finitos triangulares quadráticos ou combinação de ambos.

A calibração foi feita com dados de elevação da superfície livre, de velocidades e salinidade da água e mostrou ser adequada referente aos dados observados. O autor simulou os tempos de residência e as taxas de renovação nos modelos de Transporte Lagrangeano e Euleriano. De acordo com o estudo os resultados apontaram que ao longo do Estuário do Canal do Porto de Santos os tempos de residência variam de 40 a 70 dias, entre a embocadura do canal (ao leste da Baía de Santos) e o final do Canal de Piaçaguera, a renovação das águas da Baía de Santos, ocasionada pelo aporte fluvial, não ultrapassa 2%. Após 15 dias quase todo o estuário

apresenta uma renovação maior que 10 %, causada pelo efeito da maré, após 30 dias todo o sistema apresenta uma renovação total maior que 95%.

Oliveira et al, (2011) apresentou a calibração de modelo hidrodinâmico bidimensional de alta resolução no CELMM com o objetivo de aperfeiçoar o conhecimento sobre o campo de correntes na região em benefício do desenvolvimento do Sururu. O principal recurso pesqueiro na região é o sururu, e vem sofrendo com a diminuição do seu desenvolvimento devido ao constante crescimento do assoreamento nas lagunas e em seus canais de ligação com o mar, o que reduz a renovação das águas (Silva et al., 2007).

As condições hidrodinâmicas foram simuladas com o módulo hidrodinâmico do sistema de modelagem MIKE 21 Flow Model FM, este modelo resolve a variação dos níveis d'água e os fluxos instantâneos a partir da solução das Equações de Navier-Stokes, integradas verticalmente (equação da conservação da quantidade de movimento nas duas dimensões horizontais e equação da continuidade), através do esquema de volumes finitos.

A calibração do modelo foi realizada com o coeficiente de rugosidade no fundo, coeficiente de viscosidade turbulenta e vazões constantes nos rios Mundaú, Sumaúma e Paraíba do Meio. Apesar de apresentar algumas alterações nos gráficos apresentados o modelo foi considerado calibrado. Foram simulados dois cenários, nesse âmbito mantiveram as profundidades de 1985 (batimetria produzida pela PORTOBRÁS/INPH), apenas alterando a linha de costa para o ambiente atual e a profundidade dos canais principais de ligação das lagunas com o mar. Os resultados indicaram um aumento de velocidades das correntes nos canais na simulação com a dragagem, aumentando a amplitude da maré no interior das lagunas, em relação a situação atual. Favorecendo a renovação das lagunas através das trocas de água com mar.

Rocha (2007) propôs a implementação e uso do modelo Mike 21 2DH na análise de cenários hidrodinâmicos na Laguna da Conceição localizada na ilha de Santa Catarina, sul do Brasil. O objetivo principal era avaliar padrões do escoamento da Lagoa através de modelação numérica realizada com dados ambientais adquiridos em campo.

Foram efetuadas coletas de campo de dados batimétricos e meteorológicos em alguns pontos da laguna. O processo de calibração, e subsequente validação, do modelo hidrodinâmico desenvolveu-se forçando o modelo em nível na desembocadura externa do canal e comparando os resultados com níveis d'água medidos dentro da laguna.

Devido à limitação espaço-temporal dos dados coletados, e a não calibração do coeficiente de dispersão utilizado no modelo de transporte, uma parte das análises foram

comparativas à situação atual. O estudo concluiu, com relação a hidrodinâmica, que a pequena passagem conectando o compartimento Sul com o restante da laguna não limita a circulação nessa região e o efeito da dragagem do canal principal na troca d'água da laguna. Os resultados do modelo estão em concordância com os dados de medições de campo.

Pereira et al, (2004) simularam o tempo de residência da Lagoa dos Patos localizado no Rio Grande do Sul, o objetivo principal proposto pelos autores é simular a circulação da Lagoa dos Patos e avaliar a influência do vento no tempo de residência. A simulação da dinâmica foi realizada usando o módulo hidrodinâmico FLOW do sistema de modelagem Delft3D desenvolvida pela WL-Delft Hydraulics, instituto de pesquisa da Holanda, esse modelo numérico é baseado em diferenças finitas e adota um sistema de grade chamado “staggered grid”.

O módulo Delft3D-FLOW é capaz de simular fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de maré, descargas de água e efeitos meteorológicos, incluindo o efeito de diferença de densidade devido a gradientes horizontais dos campos de temperatura e salinidade. A grade computacional foi feita suavizando as margens da lagoa, para obter o maior número de células ortogonais a fim de reduzir os erros numéricos durante as simulações, com resolução de grade 400x20 células. Segundo os autores a validação do modelo foi realizada utilizando a salinidade, procedimento bastante comum, representa muito bem os processos de transporte do sistema segundo Wang (1999).

De acordo com os resultados o modelo representou bem a circulação da lagoa, já que os resultados simulados foram próximos aos valores reais. A simulação do tempo de residência indica que este depende principalmente das descargas do rio Guaíba e da ação do vento. Os resultados do tempo de residência sem a ação do vento, variou de 20 dias para períodos de altas descargas a 35 dias para períodos de baixa descargas. Quando o vento é aplicado a modelo, o tempo de residência variou de 18 dias para períodos de altas descargas e ventos de quadrante norte e 28 dias para baixas descargas e ventos de quadrante sul.

O estudo concluiu que o modelo foi validado com uma boa representação da situação ao qual foi submetido, permitindo determinar o tempo de residência da Lagoa dos Patos, ficando entre 18 e 38 dias, dependendo da orientação e intensidade dos ventos predominantes no sistema.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

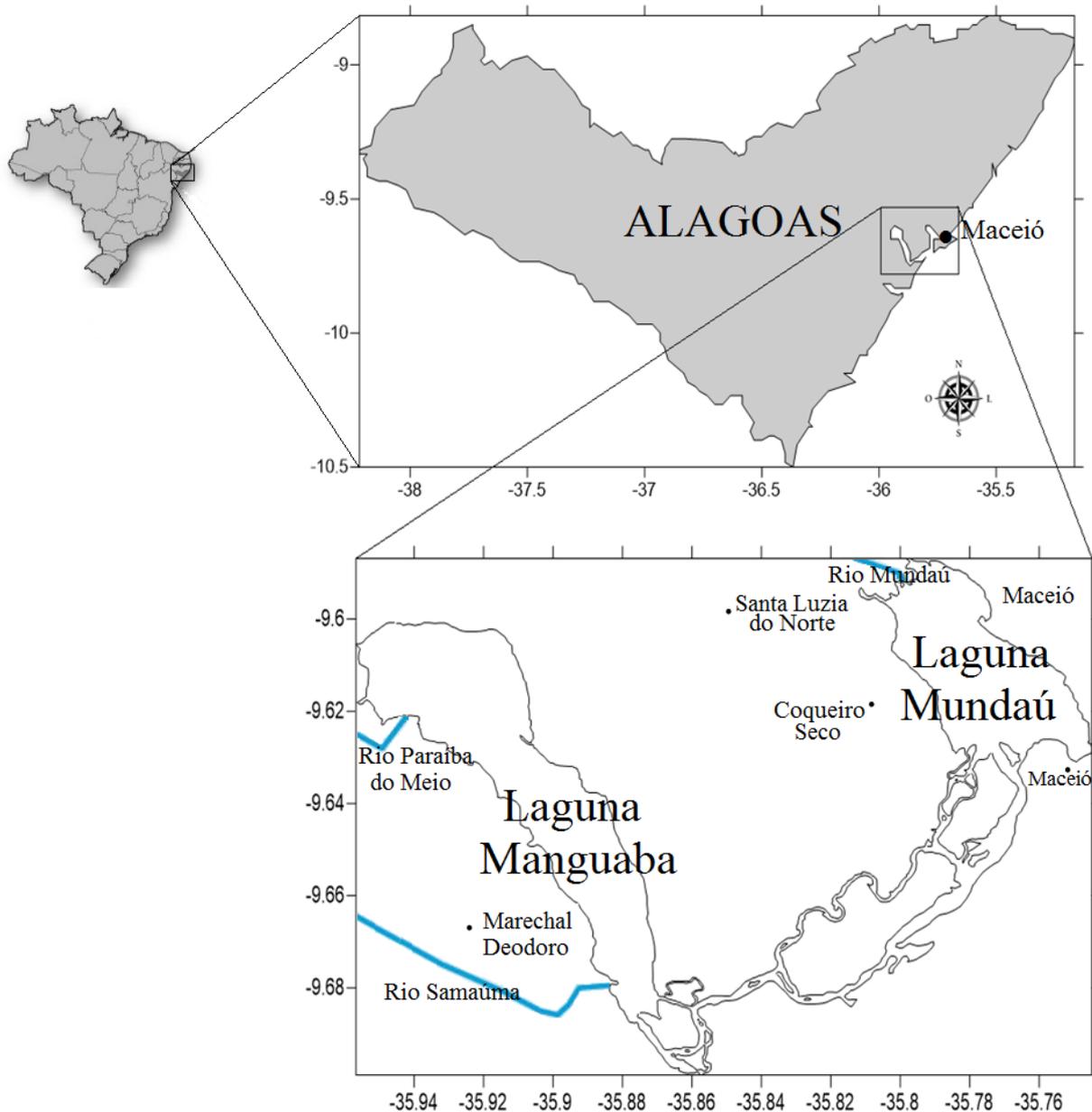
3.1 Localização e Descrição

O complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba está situado no litoral médio do estado de Alagoas, região Nordeste do Brasil (Figura 6) entre as latitudes de 9° 35' e 9° 46' Sul, e entre as longitudes de 35° 44' e 35° 58' Oeste (ANA, 2006). O sistema é constituído pelas lagunas costeiras Manguaba (a oeste) e Mundaú (a leste), canais de ligação entre as lagunas e diversas ilhas.

As duas lagunas foram constituídas pelo barramento da foz dos rios Mundaú e Paraíba do Meio por deposição dos sedimentos marinhos e conseqüentemente o afogamento de seus leitos (ANA, 2006), quando o nível do mar subiu no Holoceno (OLIVEIRA et al, 1993). A laguna Mundaú tem cerca de 27 Km² e sua principal fonte fluvial é o rio Mundaú, que drena uma área de 4.126 Km² e percorre 30 municípios, tendo 08 sedes municipais ribeirinhas (ANA, 2006).

A laguna Manguaba possui aproximadamente 42 Km², é alimentada pelos rios Paraíba do Meio e Sumaúma além do rio Remédios. O rio Paraíba do Meio apresenta uma bacia hidrográfica de 3.718 Km² e percorre 20 municípios, tendo 13 sedes municipais ribeirinhas, enquanto o Sumaúma drena uma área 406 Km² e percorre 06 municípios, tendo 01 sede municipal ribeirinha (ANA, 2006).

Figura 6: Localização do CELMM e dos principais rios afluentes.



3.2 Características morfológicas e hidrográficas

A principal bacia contribuinte da laguna Manguaba é a bacia do rio Paraíba do Meio, situada no extremo leste de Alagoas, e nesta porção é a que possui maior área superficial do território do Estado. Possui aproximadamente 3.718 km² de área como dito anteriormente. O rio Paraíba do Meio nasce no Estado de Pernambuco e deságua na laguna Manguaba, no município de Pilar, atravessando, catorze municípios em território alagoano, e seis em território pernambucano (ANA, 2006).

Localizada na região central do leste de Alagoas, a bacia do rio Mundaú que possui o mesmo nome da laguna, tem a cabeceira do rio situada no Estado de Pernambuco. A extensão do rio, que é perene, é de aproximadamente 141 km, recebendo como principais tributários em sua porção mais alta os rios Canhoto, Jibóia, Inhumas, Caruri e Ingazeira, aos quais se juntam os riachos do Brejo e Mundaú Mirim (ANA, 2006). Esta bacia passa por 30 municípios, sendo 15 no território alagoano, os outros 15 situam-se em território pernambucano. A tabela abaixo apresenta algumas características principais das bacias contribuintes à laguna Manguaba (rio Paraíba do Meio, Samaúma, Remédios) e Mundaú (rio Mundaú).

Tabela 3: Características principais das bacias hidrográficas contribuintes ao CELMM.

Características	Mundaú	Paraíba do Meio/Sumaúma/Remédio
Área (km ²)	4.126	3.718
Altitude máxima (m)	~1000	~1000
Trecho principal (km)	141	177
Declividade do rio principal (m/m)	0,0049	0,0045
Vazão média anual máxima (m ³ /s) ¹	493	325
Vazão média anual (m ³ /s) ¹	33,5	19,5
Vazão média anual mínima (m ³ /s) ¹	6,37	1,93
Clima predominante	Semiárido quente, com chuvas de inverno	Clima tropical chuvoso ou megatérmico úmido
Precipitação média anual (mm)	800	800
Temperatura média (°C)	Superior a 18 °C	Superior a 22 °C
Insolação média anual (h)	2308 - 2609	2490 - 2609
Evapotranspiração média anual (mm)	1077 - 1670	1217 - 1670

Fonte: ANA, (2006).

3.2.1 Batimetria e sedimentologia

O CELMM apresenta valores batimétricos variados, em função do local, período do ano e amplitude de marés. Coletas batimétricas realizadas na laguna Mundaú pela ANA em 2012 mostrou partes mais profundas situadas onde as correstes são mais intensas, na entrada do oceano, e na parte central da laguna. Na laguna Manguaba segundo Portobrás/INPH (1985) a profundidade média fica em torno de 2,10 metros.

Estudo sedimentológico realizado por Wanderley et al, (1993) *apud* Magalhães (2005) no CELMM, apresentou um predomínio da fração silte sobre argila, areia e cascalho por quase todo corpo lagunar. Na bacia das lagoas Mundaú e Manguaba os sedimentos de fundo mostraram entre 20% a 30% de matéria orgânica, já nas demais áreas este percentual diminui. As principais fontes de sedimentos no CELMM correspondem aos rios Mundaú e Paraíba do Meio, sendo estes os responsáveis pela deposição de material fino (silte/argila), a região costeira contribui para o transporte de areia e cascalho.

3.3 Climatologia

O CELMM está localizado no Nordeste do Brasil (NEB) onde os principais mecanismos de chuvas são de grande escala, responsáveis por cerca de 30 a 80% da precipitação observada dependendo do local, e o mecanismo de meso e microescala que completam os totais observados (MOLION e BERNARDO, 2002). Segundo os autores a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB está intimamente relacionada com as mudanças nas configurações de circulação atmosférica de grande escala e com a interação oceano-atmosfera nos Oceanos Pacífico e Atlântico.

O estudo aponta que o norte do NEB, os principais mecanismos de produção de chuva são a ZCIT – Zona de Convergência Intertropical, a convergência de umidade (brisas e perturbações oscilatórias no campo dos ventos Alísios- POAS) e a convecção local. O sul do NEB tem, como principal mecanismo de precipitação, os sistemas frontais estacionários alimentados pela umidade proveniente do Atlântico Sul, que definem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistemas pré-frontais, convecção local e brisas de mar e terra no litoral. O máximo de chuvas na faixa costeira do leste do NEB estaria ligado à maior atividade de circulação de brisa que advecta bandas de nebulosidade para o continente e à ação das frentes frias, ou seus remanescentes, que se propagam ao longo da costa (MOLION E BERNARDO, 2002). Abaixo são descritos mecanismos produtos de chuva no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba.

Perturbações Oscilatórias no Campo dos Ventos Alísios (POAS)

Esses sistemas são de extrema importância para o nordeste brasileiro, pois causam intensas precipitações sobre o continente, quando se deslocam sobre superfícies oceânicas superaquecidas. Segundo Molion e Bernardo (2000) as POAS se originam quando os sistemas frontais do hemisfério norte (HN) penetram profundamente em latitudes equatoriais durante o inverno-primavera do HN, dezembro a abril, e a ZCIT está em sua posição mais ao sul, tanto sobre o Atlântico quanto sobre a África Equatorial produzindo, na região da ZCIT, grandes complexos convectivos de escala subsinótica que, por sua vez, geram perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios.

Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN)

Os vórtices ciclônicos de altos níveis são sistemas fechados de baixa pressão, de escala sinótica, que se formam na alta troposfera, são também chamados na literatura de baixas frias, pois apresentam centro mais frio que a periferia (VAREJÃO-SILVA, 2006). O movimento vertical é subsidente no centro do vórtice e ascendente na periferia, ou seja, há formação de nuvens na sua periferia e no centro há movimentos de ar de cima para baixo, inibindo a formação de nuvens, torna-se bem visível nas imagens de satélite.

Os VCANs atuam sobre a costa leste no Nordeste, principalmente durante o verão do hemisfério sul (HS), e formam-se anualmente. Segundo Varejão-Silva (2001) os VCANs podem ter um tempo de atividade curto ou persistirem por vários dias consecutivos, ou mesmo semanas, mantendo-se quase estacionários ou movendo-se rápida e irregularmente.

Ondas de Leste

As ondas de leste são formadas sobre o oceano, é vista no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos ventos alísios, e se deslocam de leste para oeste, ou seja, desde a costa da África até o litoral leste do Brasil (VAREJÃO, 2006). Segundo Vianello e Alves (2000) essas ondas são capazes de causar precipitações acentuadas ao longo das suas trajetórias, na região de baixa pressão da onda, o tempo é característico chuvoso, associado frequentemente a tempestades, nuvens do tipo cumulus e cumulus nimbus.

Linhas de Instabilidade (LI)

São bandas de nuvens causadoras de chuva, normalmente do tipo cumulus, organizadas em forma de linhas alongadas, por isso são designados linhas de instabilidade. Se formam principalmente nos meses de verão no hemisfério sul (dezembro a março), encontram-se ao sul da Linha do Equador influenciando as chuvas no litoral norte do Nordeste e regiões adjacentes e ocorrem no período da tarde e início da noite (VAREJÃO-SILVA, 2001)

Brisas marítima e terrestre

As brisas são mecanismos que produzem chuvas leves e de curta duração. É um mecanismo sempre presente em todo litoral nordestino. Nobre e Molion (1988) *apud* Molion e Bernardo (2000) sugeriram que a confluência dos alísios com a brisa de terra (noturna) possa ser um dos mecanismos importantes na produção de chuva na região costeira.

Durante o dia, a superfície do continente se aquece mais rapidamente que o oceano, como consequência surge uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral, surgindo correntes ascendentes sobre continente nos quais geram nuvens convectivas. Enquanto no oceano, que armazena uma quantidade maior de calor, é transmitido para camadas mais profundas e transportado pelas correntes marinhas. Dessa forma, estabelece uma circulação fechada, onde ocorre movimentos ascendentes na costa e descendentes sobre o mar, caracterizando um escoamento de terra para o mar em níveis superiores e em superfície o vento sopra do oceano para o continente (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Durante a noite, em razão da maior taxa de resfriamento continental, em relação ao oceano, inicia-se a formação de um novo contraste térmico, permanecendo o mar mais aquecido que o continente. Nesse caso, as isóbaras irão afastar-se sobre o mar, estabelecendo aí uma baixa pressão, contrastando-se com a alta estabelecida sobre a terra mais fria. O mecanismo se inverte, ocorrendo a formação de uma célula de circulação em que o vento soprará da terra para o mar em baixos níveis e no sentido contrário nos níveis mais elevados (VIANELLO E ALVES, 2000).

Para um maior aprofundamento da região, foram elaborados gráficos com médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura do ar compreendendo o período de 1965 a 2016, os dados coletados são retirados da estação 82994 localizado no município de Maceió entre as coordenadas latitude -9.66; longitude -35.7, disponibilizado no Banco de Dados Meteorológicos de Ensino e Pesquisa - BDMEP fornecido pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

O regime pluviométrico (Figura 7) apresentou padrões característicos para o município de Maceió onde os meses que abrange a estação chuvosa de abril a agosto mostrou maiores índices pluviométricos alcançando 326 mm em junho. Os meses de novembro a fevereiro, que compreende a estação seca da região, mostraram menores índices pluviométricos com 45 mm em dezembro, todos os meses da estação seca apresentou uma média de 70 mm.

A temperatura do ar (Figura 8) na região de estudo não variou tanto, com máximas entre os meses de dezembro a março alcançando em torno de 30°C e mínimas entre os meses de junho a agosto com 20°C.

Figura 7: Dados históricos de precipitação da estação 82994 localizada no município de Maceió entre as coordenadas: latitude -9.66; longitude -35.7.

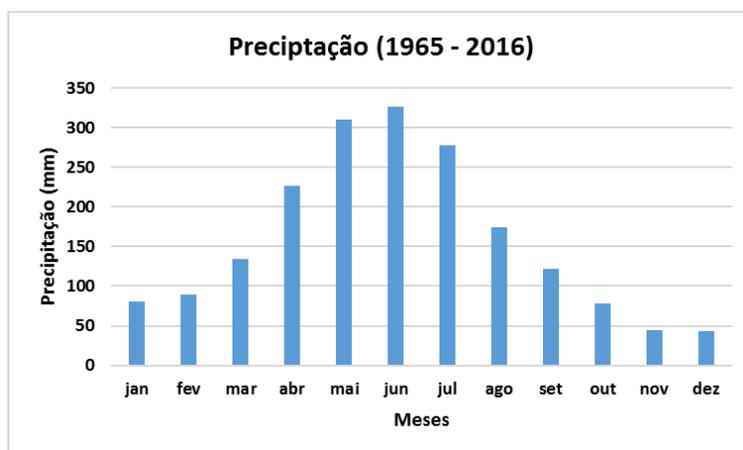
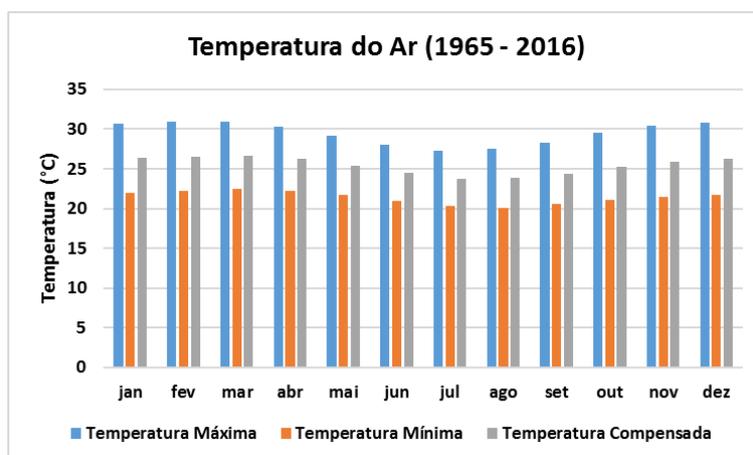


Figura 8: Dados históricos de temperatura da estação 82994 localizada no município de Maceió entre as coordenadas: latitude -9.66; longitude -35.7.



3.4 Aspectos Socioeconômicos

As principais atividades econômicas exercidas nas bacias dos rios contribuintes ao CELMM e seu entorno, destacam-se as atividades urbanas (comércio e serviços, indústria de transformação, com destaque para bens intermediários ligados à indústria química e às usinas sucroalcooleiras) e agricultura (cana-de-açúcar, e a pecuária bovina, com baixas taxas de lotação, combinada à presença de diversos matadouros) que contemplam a dinâmica da região (ANA, 2006).

A atividade econômica realizada no interior dessas lagunas são turismo e a pesca artesanal de espécies de camarão e peixes, bem como o sururu (*Mytella falcatta*) o qual possui grande importância para a população de baixa renda dessa região. Este molusco sururu, com habitat preferencial na região mesohalina, é encontrado apenas na laguna Mundaú e nos canais, porém essas atividades vêm sendo bastante prejudicadas com o aumento da poluição nas lagunas, ocasionando uma diminuição expressiva no estoque do pescado (ANA, 2006).

Algumas atividades merecem um maior destaque, como a produção intensiva de cana-de-açúcar, instalação de usinas sucroalcooleiras, instalação de uma indústria cloroquímica ao lado de Maceió, existência de uma fábrica de fertilizantes próximo ao Rio Mundaú. A monocultura de cana-de-açúcar é a principal atividade agrícola nas bacias de drenagem, que vem inclusive substituindo diversas culturas que existiam na região.

Segundo a Agência Nacional de Águas (2006) na região do CELMM especificamente, a participação da cana de açúcar entre as culturas temporárias aumentou em quase todos os municípios no final do séc. XX, com mais de 90% da área colhida dos municípios. Ao todo são 10 usinas sucroalcooleiras que exploram uma área de aproximadamente 179.200 hectares.

3.5 Poluição ambiental no CELMM

O Complexo estuarino lagunar Mundaú - Manguaba não difere dos demais ecossistemas estuarinos espalhados no mundo e vem sofrendo constantes mudanças na sua dinâmica, provocadas direta ou indiretamente por ações antrópicas ou naturais.

A área de estudo revela um intenso processo de urbanização, no qual sofreram uma sequência de crescimento desordenado com reflexos na infraestrutura urbano-social. Esse reflexo retrata uma série de atividades industriais com alto potencial poluidor nas margens do CELMM ou ao longo de suas bacias de contribuição (indústria canaveira, com unidades

produtoras de açúcar e/ou álcool; Polo Cloro-álcool-químico, fábricas de fertilizantes, laticínios, pedreiras e cerâmicas), além disso, bem como atividades de mineração e exploração agrícola, a pecuária, matadouros e a monocultura da cana-de-açúcar (ANA, 2006).

Tabela 4: Principais questões que contribuem para o acelerado processo de degradação ambiental nas bacias contribuintes e no entorno do CELMM.

Ações	Degradação
Lançamento de afluentes sanitários	Zonas com depleção de oxigênio; eutrofização; alteração no pH; aumento na turbidez.
Lançamento de afluentes da indústria	Comprometimento da balneabilidade; afugentamento de espécies (aumento do pH)
Exploração indiscriminada dos recursos hídricos	Floração de algas
Práticas agrícolas inadequadas	Redução de parcelas do ecossistema várzeas, mangues e corpos d'águas;
Deficiência na coleta e disposição inadequada do resíduo sólido/chorume	lixiviação dos agrotóxicos alcançando copos hídricos
Desmatamento e urbanização	Redução dos estoques pesqueiros
Práticas inadequadas de pesca	
Aterros e ocupação de áreas de risco (encosta e áreas sujeitas a enchentes)	Assoreamento acelerado
Implementação ineficaz dos projetos e desperdício de recursos públicos	

Fonte: (ANA/MMA, 2006).

Eventualmente ao longo do tempo, por fatores físicos, químicos e biológicos, os estuários passam por processos lentos de degradação que são geralmente por eles absorvidos (Lins et al, 2013). Porém, quando a estes processos naturais são agregados impactos contínuos resultantes de atividades humanas (despejo de esgoto doméstico e industrial, contribuição difusa de agrotóxicos e fertilizantes, desmatamento, entre outros descritos acima) ou eventos naturais críticos, os estuários perdem a capacidade de absorção e passam a apresentar problemas sérios de eutrofização, perda da diversidade biológica, aumento da turbidez, da sedimentação e da toxicidade, alterações no ciclo hidrológico (Tundisi, 2008).

Dependendo da intensidade dos impactos a que foram submetidos e do estágio de degradação alcançado, estes corpos d'água podem sofrer uma mudança drástica no seu estado

de estabilidade (Scheffer e Jeppesen, 2007 *apud* Lins et al, 2013) de maneira que só seja possível o retorno ao estado original através de alternativas de planejamento estratégico.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho adotou o modelo computacional Mike 21 para executar as equações que regem os processos físicos e hidrodinâmicos à serem caracterizados. Para a elaboração do modelo computacional foi necessária a composição de dados de entrada do modelo, como a definição da área de estudo, de domínio de modelagem, a batimetria do sistema, as condições de contorno e as condições iniciais.

A seguir são apresentados a metodologia seguida para a execução do modelo hidrodinâmico proposto.

4.1 Definição do modelo computacional

O modelo hidrodinâmico utilizado no trabalho foi o software MIKE 21 desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute Water & Environment – DHI, este sistema de modelagem hidrodinâmica é baseado em uma abordagem de malha flexível, fornecendo simulações de variáveis do nível e fluxo d'água em estuários, baías e áreas costeiras em geral.

A utilização deste modelo foi disponibilizada por meio de uma licença direcionada a pesquisas para o Laboratório de Oceanográfica Física do Instituto de Ciências Atmosféricas (LOCF-ICAT) da Universidade Federal de Alagoas, fornecida pelo Danish Hydraulic Institute – DHI WATER & ENVIRONMENT.

O modelo utilizado no presente estudo é 2DH, referente à modelos bidimensionais na horizontal, os quais descrevem variáveis integradas na vertical (dimensões x,y,t), logo, devem ser usadas em ambientes verticalmente homogêneos ou onde as estratificações ao longo da coluna d'água possam ser desconsideradas.

O modelo emprega na sua formação as equações de conservação da massa (1) (continuidade) e de conservação da quantidade de movimento (2 e 3) . As equações assumem que o fluido é incompressível e que a distribuição de pressão é hidrostática. As equações apresentadas nesse sistema estão disponíveis em DHI Scientific Documentation (2007).

Continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

Conservação da Quantidade de Momento em X:

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hU_s S$$

Conservação da Quantidade de Momento em Y:

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial x} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_o} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hV_s S$$

Tabela 5: símbolos utilizados nas formulações do modelo HD do MIKE 21.

t	Tempo (s)
x,y,z	Coordenadas cartesianas (m)
η	Elevação da superfície
d	Profundidade (m)
$h = d + \eta$	Profundidade total (m)
$f = 2\Omega \sin\varphi$	Parâmetro de Coriolis
φ	Latitude geográfica
$\Omega (x,y)$	Taxa de revolução angular (rad/s)
τ_{sx} e τ_{sy}	Tensão de superfície de vento (N/m ²)
τ_{bx} e τ_{by}	Tensão de fundo (N/m ²)
$T_{xx}T_{xy}T_{yy}$	Tensões laterais (N/m ²)
u	Velocidades médias na profundidade (m/s)
S	Magnitude da descarga devida as fontes pontuais (N/m ²)
$S_{xx}S_{yx}S_{yy}$	Tensor de radiação (N/m ²)
p_a	Pressão atmosférica (N/m ²)

g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
ρ	Densidade da água
ρ_o	Densidade da água (g/m ³)

As Tensões superficiais e de fundo no MIKE 21 são descritas a partir do número de Chezy ou o Coeficiente de Manning, a viscosidade tem parametrização do tipo Smagorinsky.

Estimativa do tempo de residência: modulo de transporte:

Foi utilizado um lançamento de traçador no compartimento do modelo MIKE 21 para estimar o tempo de residência dentro do CELMM, tempo necessário para reduzir a concentração do traçador na área modelada, onde observa a eficiência do tempo de descarga do sistema (Monsen et al, 2002). Admitiu-se que o traçador continha 1 kg/m³ no interior do CELMM e 0 kg/m³ na área de fora onde demarca o limite do modelo, logo o tempo de residência (T_f) foi calculado como o volume de água definido no sistema (V) dividido pela vazão (Q) no sistema, representado na equação 4:

$$T_f = \frac{V}{Q} \quad (4)$$

Se assumirmos que uma carga de massa conhecida é colocada no CELMM em um dado tempo ($t = 0$) resultando em uma concentração inicial (C_o), nenhuma outra massa foi adicionada após o $t = 0$, o fluxo e o volume permanecem constante ao longo do tempo. A concentração dentro do CELMM foi calculada com a equação:

$$C(t) = C_o \cdot e^{-t/T_f} \quad (5)$$

4.2 Cenários simulados

Com o intuito de atender aos objetivos deste estudo foram delineados os cenários de modelagem caracterizando cada situação a ser avaliada.

Foram simulados dois cenários:

I – Tempo de residência com dados reais de vazão;

II – Tempo de residência com dados de média histórica de vazão (período 1978 – 2016).

As situações são relacionadas em paralelo com os dados de correntes usando as vazões reais e históricos 1978 - 2016 simulados para os meses de julho e agosto.

4.3 Definição da área de estudo e do mapa base

Para a elaboração do mapa base da área de estudo foi necessária a delimitação dos contornos dos corpos d'água do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú - Manguaba. Tais como os contornos de terra que representam ilhas, margens de rios, os canais, e o contorno que demarca o limite externo do domínio do modelo na região oceânica.

Os contornos utilizados foram obtidos por imagem de satélite Landsat-5 sensor TM datada de 17 de março de 2011 com órbita e ponto 214/67. A imagem foi manuseada através do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, disponibilizada na página da internet do INPE.

Por meio de processamento utilizando o software Erdas Imagine 9.2, delimitou-se a área de estudo e resultou com as coordenadas:

- Superior esquerdo: Lat. 9° 33' 23.89" S; Long. 35° 58' 18.04" W.
- Inferior esquerdo: Lat. 9° 48' 30.34" S; Long. 35° 58' 03.32" W.
- Superior direito: Lat. 9° 33' 34.36" S; Long. 35° 40' 41.22" W.
- Inferior direito: Lat. 9° 48' 35.24" S; Long. 35° 40' 44.58" W.

O mapa base foi então redesenhado no software Surfer na versão 9 (www.goldensoftware.com), em seguida para criar a malha utilizou-se o *Mesh Generator* do MIKE ZERO onde foi possível importar as linhas de costa digitalizadas, dados de batimetria e os demais contornos da região.

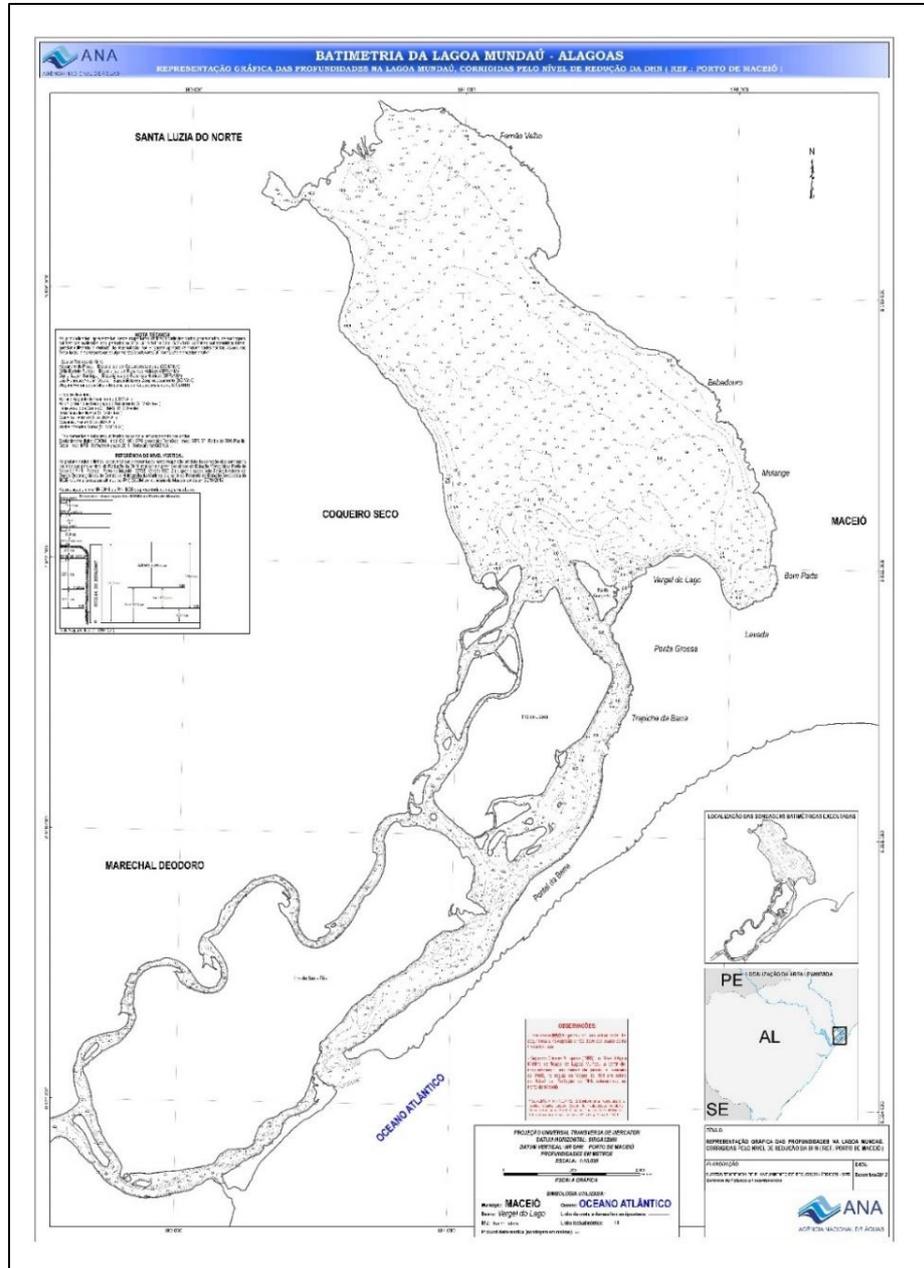
A delimitação do contorno de mar foi obtida por meio do Google Earth, a partir da digitalização de imagem de satélite do CELMM, acessadas durante o mês de dezembro de 2016, o contorno foi elaborado de forma que a região de interesse estivesse suficientemente afastada para explorar o comportamento da forçante de maré dentro do CELMM.

4.4 Batimetria

As profundidades da laguna Mundaú foram obtidas a partir de dados processados de sondagens batimétricas em campanhas realizadas nos períodos de 04 a 18/12/2011 e 08 a 15/04/2012 pela Agencia Nacional de Águas – ANA. As profundidades foram obtidas através de um ecobatímetro e corrigidas pelo nível de redução mensuradas para a referência altimétrica

do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil.

Figura 9: Batimetria da Laguna Mundaú.



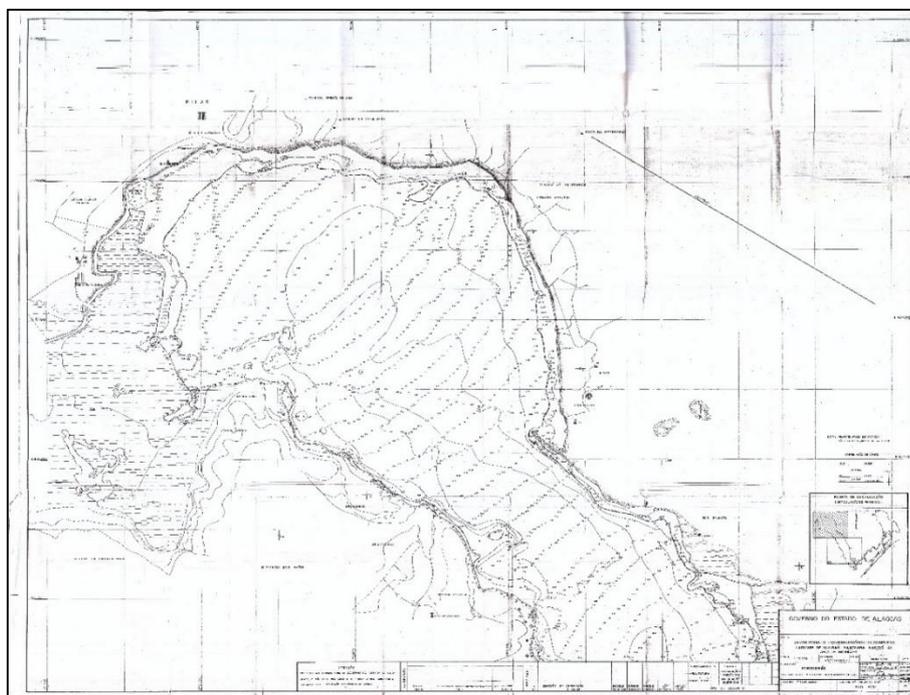
Fonte: ANA (2012)

Devida a ausência de dados atuais na região da laguna Manguaba por questões logísticas, recursos humanos e equipamentos, as informações batimétricas da laguna Manguaba foram obtidas através dos levantamentos topohidrográficos do complexo lagunar de Mundaú-Manguaba – Maceió/AL elaborada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias – INPH/

PORTOBRÁS realizadas em 1985 (Figuras 10 e 11), com números de desenhos 255 – 3/01 e 255- 3/02 (escala 1:10.000).

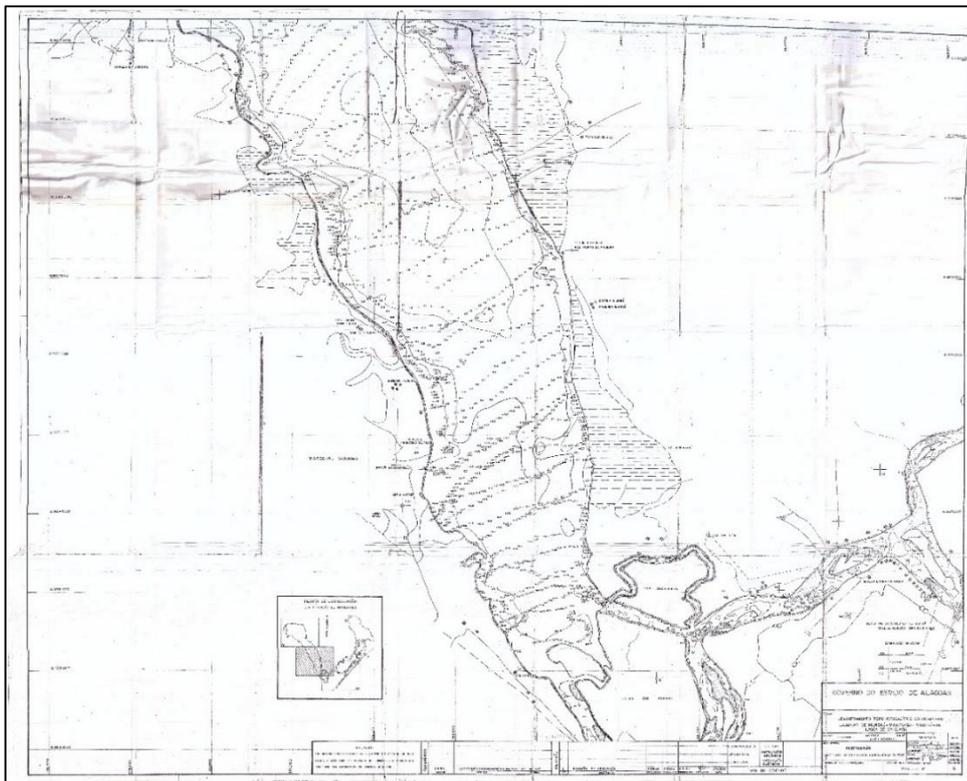
As cartas foram digitalizadas, georreferenciadas no Arcgis e vetorizadas para extração os dados batimétricos. A extração dos dados ocorreu manualmente ponto a ponto estabelecidos no levantamento topohidrográfico como mostra a figura 12. Apesar dos dados de batimetria estarem relativamente antigos em relação à circunstância atual de um ecossistema assoreado anualmente pela taxa de sedimentação dos rios afluentes, não tínhamos outra forma senão utilizar a batimetria de 1985.

Figura 10: Batimetria da Laguna Manguaba produzidas pela PORTOBRÁS/INPH.



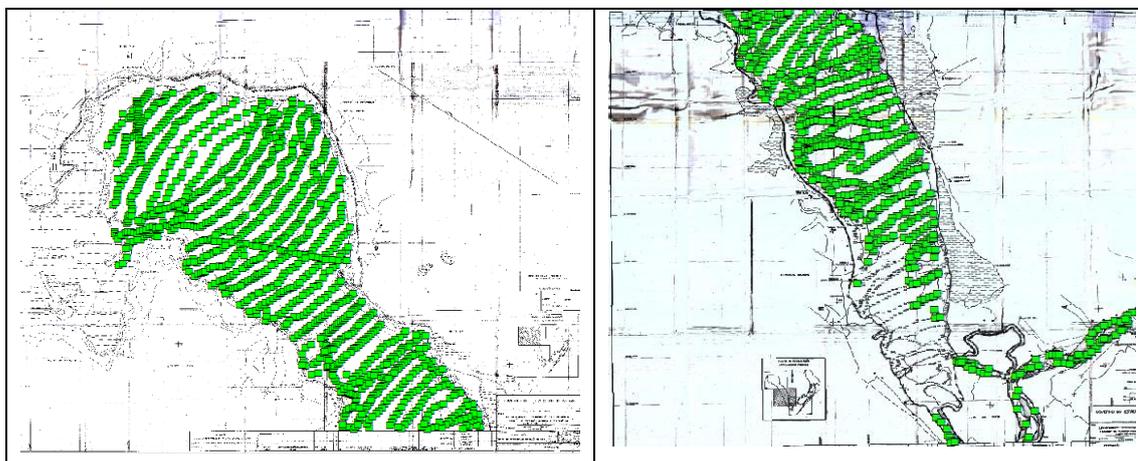
Fonte: INPH/PORTOBRÁS (1985).

Figura 11: Batimetria da Laguna Manguaba produzidas pela PORTOBRÁS/INPH.



Fonte: INPH/PORTOBRÁS (1985).

Figura 12: Extração dos dados batimétricos durante a execução no Arcgis.

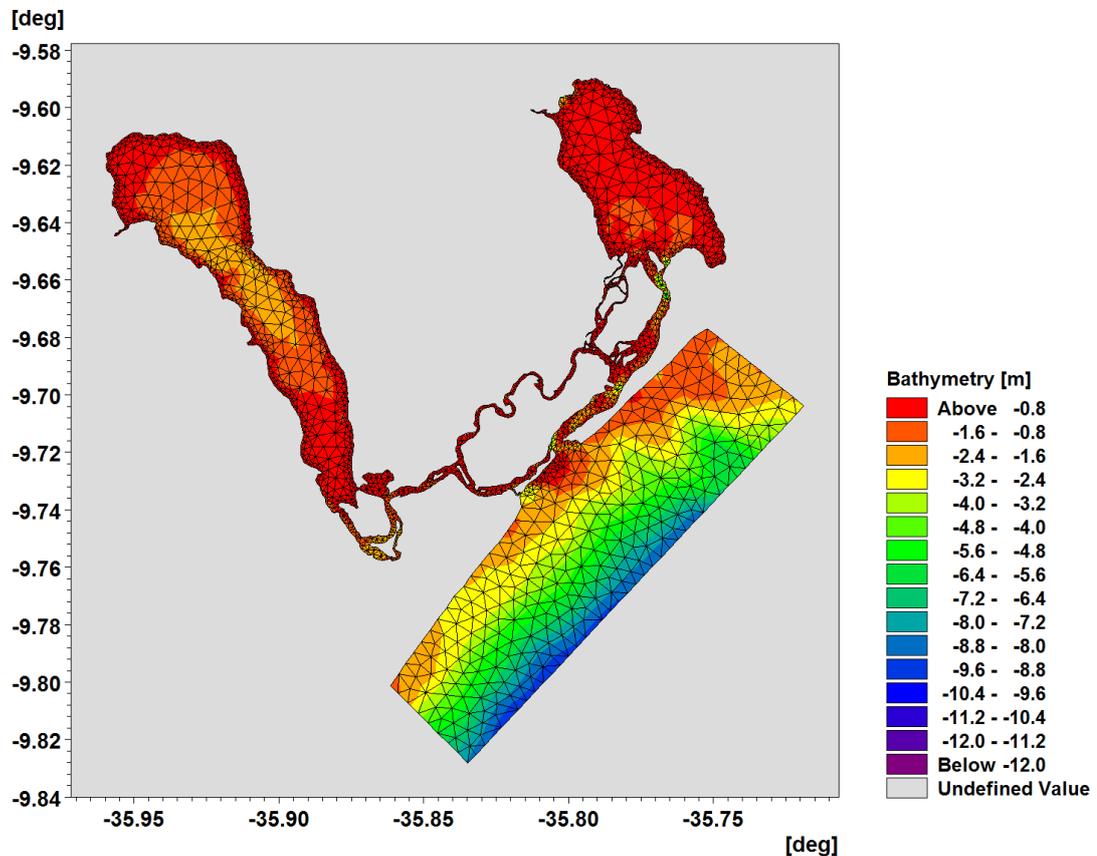


A aquisição dos dados batimétricos na região da costa foi utilizada através da base de dados digitais do Nacional Geophysical Data Center/ Geodas Databases – NGDAS – NOAA. Esses dados são do Modelo Digital de Elevação com Batimetria - ETOPO-2 disponibilizada na página da internet da NOAA, para livre acesso e utilização (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>) (AMANTE & EAKINS, 2009).

4.5 Domínio do modelo hidrodinâmico

A discretização espacial foi elaborada no modelo Mike 21, gerando uma malha de elementos finitos triangulares, o desenho da malha foi realizado com detalhamento nos canais de ligação entre as lagoas e nos canais de desembocadura, além de um refinamento menor próximos às margens visando garantir uma maior precisão, pois esses locais sejam bem estreitos e rasos. O domínio foi discretizado utilizando um total de 4279 elementos e 3055 nós. A figura a seguir apresenta a discretização de todo o sistema lagunar e a batimetria.

Figura 13: Detalhe da malha de discretização em elementos finitos e batimetria do CELMM



4.6 Forçantes do modelo hidrodinâmico

Para utilização dos dados ambientais como forçante do modelo numérico, é necessário que todos os dados estejam disponíveis para o mesmo período. Após uma avaliação das informações ambientais relevantes ao estudo, buscou-se sincronizar todos os dados existentes para o mesmo período, de acordo com a disponibilidade dos mesmos. Desta forma, apesar da não existência de dados de vazão para o mês de julho de 2016, para o rio Mundaú, foi utilizado este mês como referência para a calibração do modelo, e o mês de agosto de 2016, foi o mês

em que as variáveis ambientais estavam disponíveis, e, portanto, tornando possível a simulação através do modelo, e sua validação.

A seguir são apresentadas as condições hidrodinâmicas empregadas nas simulações computacionais.

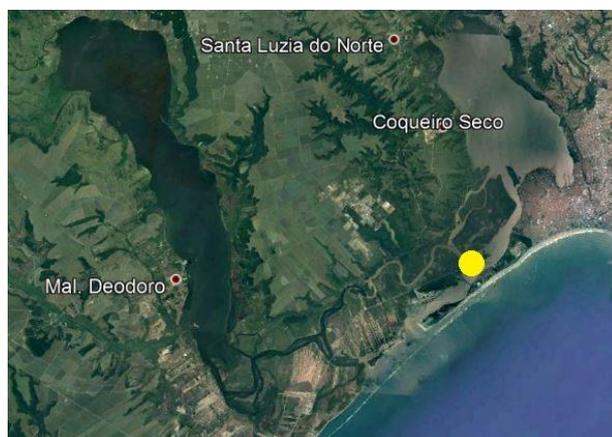
4.6.1 Maré

Os dados de maré foram cedidos pelo Instituto do Meio Ambiente – IMA, onde foram coletados através de sistema de dados hidrometeorológica da Vaisala com transmissão GPRS, com pluviômetro de balança e sensor de nível da OTT que utiliza tecnologia de radar sem contato com a água, essa estação fica localizado próximo a base do IMA dentro do CELMM entre as coordenadas lat. 9°41'41.46"; long. 35°47'10.34" (Figura 14).

As medições adquiridas através do IMA foram medidas a cada 15 minutos no período 11/04/2016 à 12/12/2016. Tais dados foram organizados no Matlab, e agrupados para serem inseridos no modelo.

Dentro das condições de contorno do modelo, se faz necessário fornecer o nível de maré atuando na região externa do domínio do modelo (Figura 13). Para tanto, foi utilizado a ferramenta “Mike21 Toolbox” para gerar a variação do nível da maré das fronteiras externas do modelo, através de dados do modelo global de elevação do nível do mar. Esta ferramenta permite que seja definido os limites de cada fronteira no domínio do modelo, e a partir das localizações estabelecidas, é gerado uma série temporal ao longo do tempo e de cada fronteira específica. Desta forma, foi gerado três séries de elevação do nível do mar para o período de 1 de agosto à 31 de setembro de 2016, compreendendo todo o período de simulação.

Figura 14: Localização da estação de coleta de dados de maré.



4.6.2 Vazão dos rios afluentes

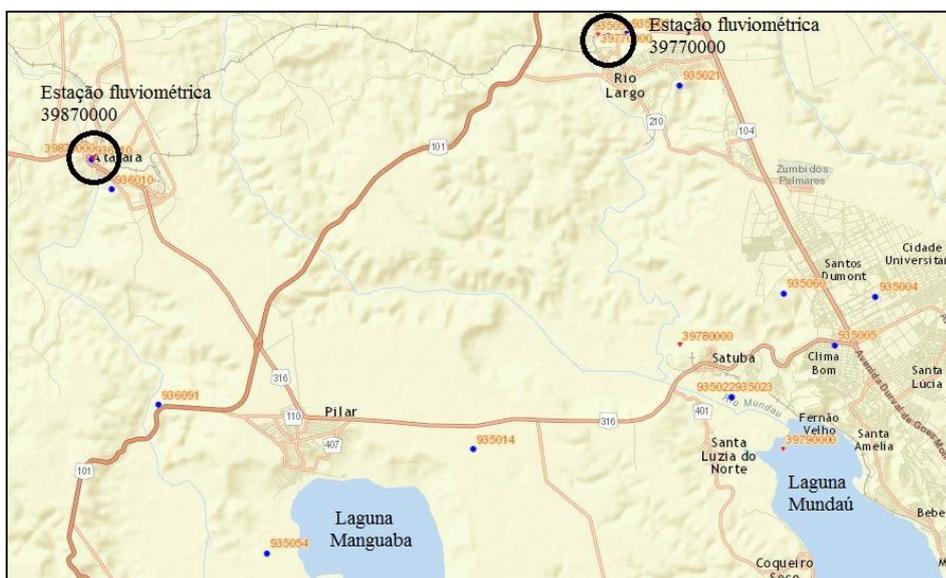
Os dados de vazões reais e históricos foram retirados das estações automáticas mais próximas dos exutórios dos rios contribuintes, a estação fluviométrica 39870000 no município de Atalaia localizado entre as coordenadas latitude -9.46; longitude -35.85 (laguna Manguaba) e a estação fluviométrica 39770000 no município de Rio largo entre as coordenadas latitude -9.46°; longitude -35.85° (laguna Mundaú) (Figura 15). Os dados são disponibilizados no HidroWeb fornecido pela Agencia Nacional de Águas – ANA. (<http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Tabela 2: Estações utilizadas como condição de contorno do modelo.

Código da estação	Rios afluentes	Município	Área de drenagem
39870000	Paraíba do Meio	Atalaia	3.560 km ²
39770000	Mundaú	Rio Largo	1.970 km ²

Fonte: ANA (2016)

Figura 15: Localização das estações utilizadas como condição de contorno do modelo.



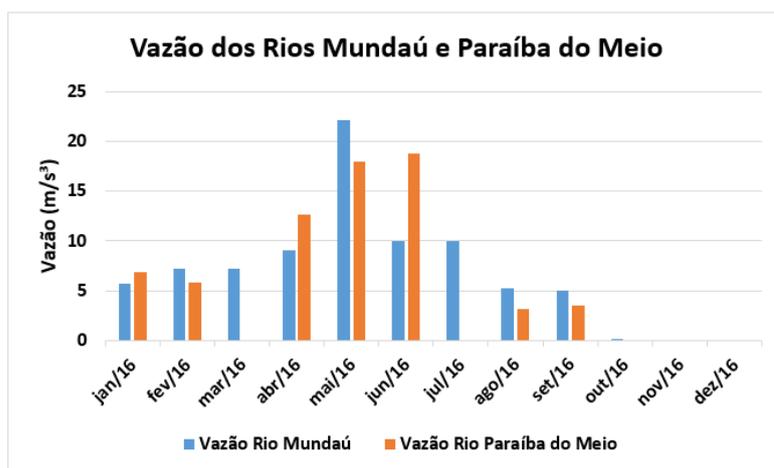
Foram utilizados dados históricos de médias mensais para as vazões históricas 1978 - 2016 dos afluentes principais (rios Mundaú e Paraíba do Meio) do CELMM compreendendo o período de 1978 a 2016, as vazões inseridas no modelo foram constantes de acordo com as condições históricas simuladas para os meses de julho e agosto. Para a simulação com as condições reais, as vazões observadas foram diárias nos meses de julho e agosto de 2016 para

os rios Mundaú e Paraíba do Meio (Figura 16), na estação localizado em Atalaia mostrou a inexistência de dados para o período de julho, por conta da ausência dos dados assumimos nenhuma vazão para o rio Paraíba do Meio nesse período, enquanto que na estação de medição para o rio Mundaú a média do fluxo foi de 10 m/s³, no mês de agosto as médias foram abaixo de 5 m/s³ para ambos os afluentes.

Anualmente a bacia do rio Mundaú tem uma precipitação de 900 mm, e a concentração dessas chuvas ficam no período entre fevereiro e julho cerca de 72,6% do volume total (SILVA et al, 2007). As precipitações centralizam próximos a região litorânea por consequências de brisas que transportam bandas de nebulosidade, provocando maior concentração de chuvas nessa área, é verificada a diminuição na precipitação à medida que se adentra no continente (GAMA, 2006; SILVA et al 2007). Segundo PDRH (2001) a distribuição da precipitação pluviométrica na área da bacia do rio Paraíba do Meio está concentrada no período de abril a agosto, onde neste intervalo se concentra 69,8% da precipitação anual.

Os principais afluentes do CELMM vêm sofrendo com baixa vazão, poluição, ocupação desordenada em seu leito e ao longo de toda sua bacia, lançamento de efluentes domésticos, descarte inapropriado de resíduos e ausência de políticas públicas (SILVA et al 2007).

Figura 16: Dados reais de vazão dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio para o ano de 2016.



De acordo com os gráficos históricos (Figuras 17 e 18), os valores encontrados são característicos para as estações secas e chuvosas, durante a estação chuvosa para cada bacia o fluxo alcançou 73 m³/s e 48 m³/s dos rios Mundaú e Paraíba Meio, respectivamente, ambos valores encontrados no mês julho. No período seco que compreende os meses de novembro a

fevereiro onde os afluentes tendem a fornecer pouca contribuição, os fluxos dos Rios Mundaú e Paraíba do Meio mostraram uma média de 12 e 7 m³/s.

Segundo OLIVEIRA et al (1993) a vazão média anual do rio Mundaú era de 35 m³/s e do rio Paraíba do Meio 23 m³/s, esses valores caíram para 31 e 20 m³/s de acordo com as médias anuais históricas 1978 - 2016.

Figura 17: Dados históricos de vazão do Rio Mundaú da estação 39770000 localizada no município de Rio Largo entre as coordenadas: latitude -9.46°; longitude -35.85°.

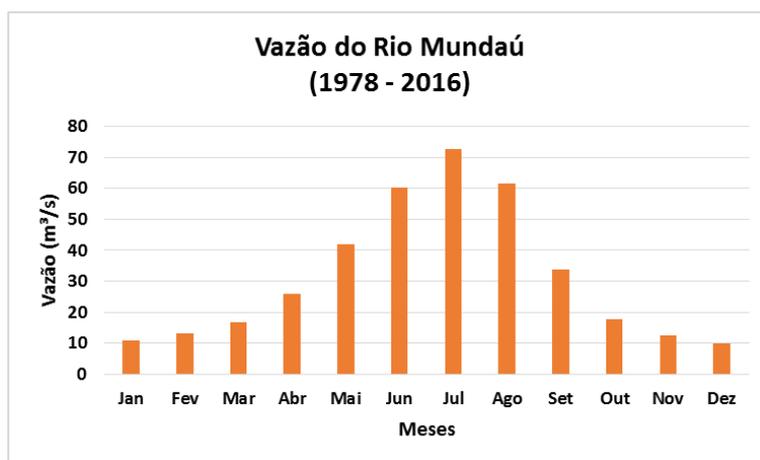
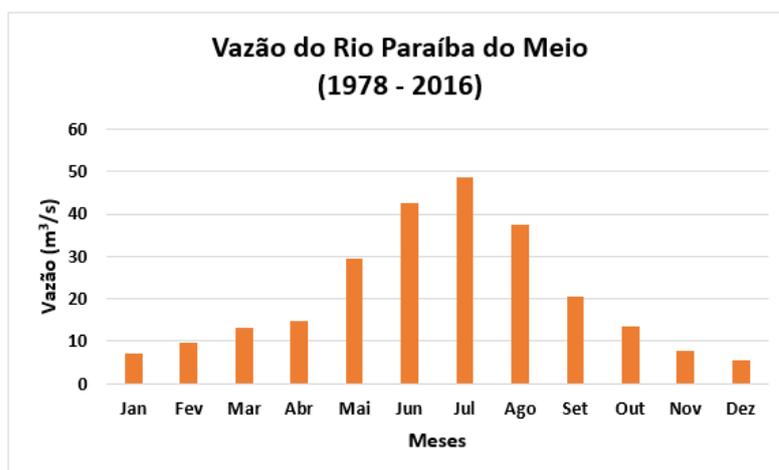


Figura 18: Dados históricos de vazão do Rio Paraíba do Meio da estação 39870000 localizada no município de Atalaia entre as coordenadas: latitude -9.50°; longitude -36.02°.



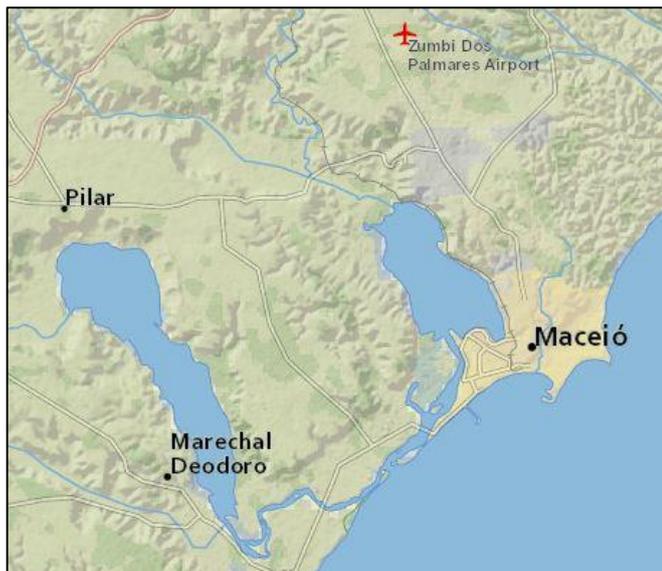
4.6.3 Vento

A distribuição dos ventos na área de domínio do modelo numérico foi obtida através da estação 4239 do aeroporto Zumbi dos Palmares localizada no município de Maceió com as coordenadas Lat. 9°30'37" S; Long. 35°47'36" W (Figura 19). Os dados horários, fornecidos

pela Rede de Meteorologia Aeronáutica (RedeMet), são referentes ao período de julho à agosto 2016.

Considerando a proximidade da estação de coleta dos ventos para a área de estudo, foi admitido que os ventos dentro do domínio poderiam ser representados por tais dados, e portanto, foi adotado um vento variável ao longo do tempo, mas constante em todo o domínio do modelo.

Figura 19: Localização do Aeroporto Zumbi dos Palmares.



4.6.4 Pressão

As informações correspondentes a pressão seguiu a mesma ordem dos dados diários de vento, retirados da estação 4239 do aeroporto Zumbi dos Palmares no período de julho à agosto de 2016. O mesmo procedimento estabelecido anteriormente para a distribuição dos ventos dentro do domínio do modelo, foi aplicado para os dados de pressão, onde o campo de pressão variou ao longo do tempo e constante dentro do domínio.

4.7 Validação e calibração do modelo hidrodinâmico

Segundo Rosman (2001) a calibração é um processo de ajuste de parâmetros do modelo, de modo a garantir a melhor concordância possível entre os resultados apresentados pelo modelo e pelas medições ambientais. Em modelos hidrodinâmicos a calibração pode ser elaborada utilizando primeiramente a rugosidade de fundo e em um segundo a batimetria e as condições de contorno (Gerritsen et al., 1995). Para a calibração do modelo no CELMM foram

realizadas através do coeficiente de rugosidade por meio do número de Manning (M), a viscosidade turbulenta e os dados de contornos descritos no item anterior.

- Coeficiente de rugosidade no fundo a partir do número de Manning = $26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, constante para toda área;
- Coeficiente de viscosidade turbulenta a partir da formulação de Smagorinsky = $0.29 \text{ m}^2/\text{s}$, constante para toda área.

Como exposto anteriormente, foi adotado o mês de julho de 2016 para o processo de calibração do modelo hidrodinâmico. Para tal, além das forçantes físicas utilizadas como condições de contorno do modelo, e explicitadas nos itens anteriores, a calibração ficou a cargo da variação da rugosidade do fundo, onde procedeu-se a entrada de valores para definir o melhor número de Manning. Após vários testes chegou-se ao valor de $26 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para Manning, e $0.29 \text{ m}^2/\text{s}$ para Smagorinsky, como sendo os parâmetros com melhor resposta na calibração do modelo.

A figura 20 e 21, representam os resultados da validação e apresenta a verificação do modelo calibrado, respectivamente. A calibração indicou uma boa representatividade do modelo em gerar padrões de elevação do nível do mar, similar aos dados da estação maregráfica (Figura 20), tendo como coeficiente de correção valores em torno de 0,97. Com base nos parâmetros da calibração foi feita rodada do modelo para o mês de agosto, indicado como o período para a validação do modelo hidrodinâmico (Figura 21). Os dados observados foram similares aos simulados no decorrer da série, com valor de 0,95 para coeficiente de correlação, evidenciando a eficiência de representar de maneira adequada aos fenômenos de interesse.

Figura 20: Calibração do modelo Mike 21 através de dados observados de maré na estação do IMA, para o mês de julho de 2016.

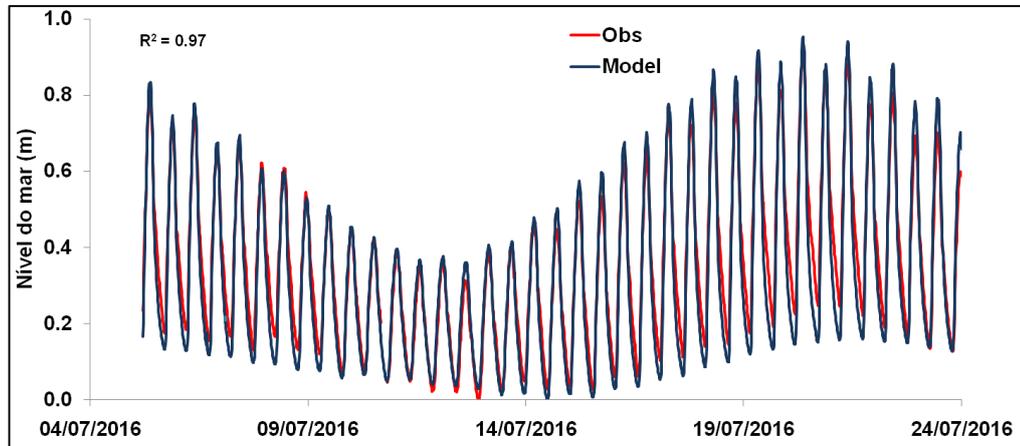
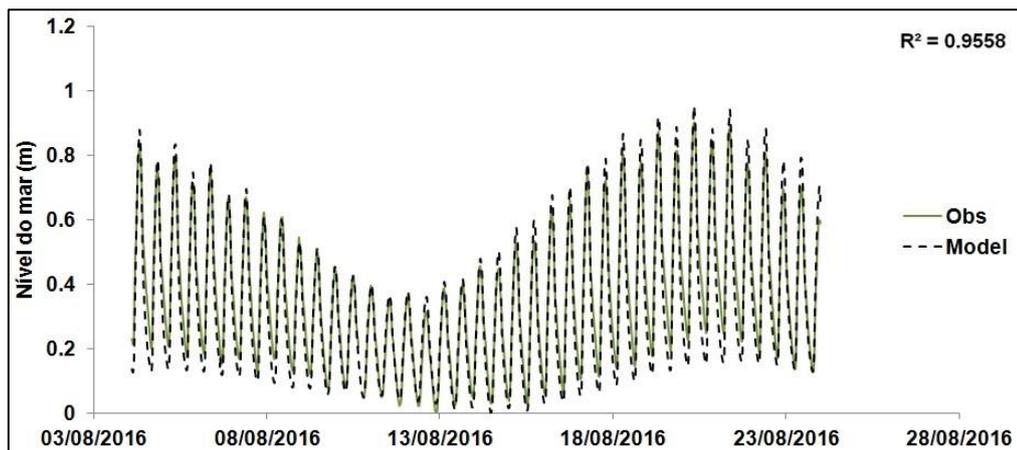


Figura 21: Validação do modelo Mike 21 através de dados observados de maré na estação do IMA, para o mês de agosto de 2016.



5. METODOLOGIA ADOTADA PARA O ESTUDO DAS CORRENTES E SALINIDADE

Além da modelagem presente nesse trabalho, houve coletas para a avaliação da salinidade e condições hidrodinâmicas próximas a desembocadura do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba, a análise compreendeu os dias 14 e 17 de outubro de 2016 onde foi acompanhado o comportamento do ambiente em coletas contínuas de 13 horas a cada 15 minutos. Os dados dessa pesquisa em campo não foram utilizados para o processo de calibração do modelo, já que eram necessárias mais coletas.

5.1 Localização das estações de medição

As medições, como foi dito anteriormente, ocorreram nos canais que interligam com o ambiente marinho, as setas destacadas em vermelho na figura 22 (referente a laguna Manguaba) e 23 (referente a laguna Mundaú) mostram o caminho percorrido pelo barco de uma margem para a outra, com medições na margem esquerda, meio e margem direita em coletas cotínuas de 13 horas, as medições foram em parceria com IBAMA onde foi utilizado o barco do mesmo.

Figura 22: Localização da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Manguaba. (MD) (ME)



Figura 23: Localização da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Mundaú.



Por se tratar de um ambiente raso, a dificuldade para encontrar um local de melhor acesso para amostragem foi significativa pois com as oscilações da maré os instrumentos poderiam ser arrastados por banco de areias e dificultar as medições ou até prejudicar os equipamentos, a figura abaixo mostra a visão da estação no momento das medições no canal principal de entrada da laguna Mundaú.

Figura 24: Visão da estação de coleta no canal principal de entrada da laguna Mundaú.



5.2 Medições de salinidade

Foram realizadas medições das propriedades hidrográficas (profundidade, salinidade e temperatura) através da sonda CTD – sigla em inglês para Condutividade, Temperatura e Profundidade YSI 6600 (Figura 25), utilizando-se guincho hidrométrico, com lastro de 25 Kg, em virtude da velocidade da correnteza.

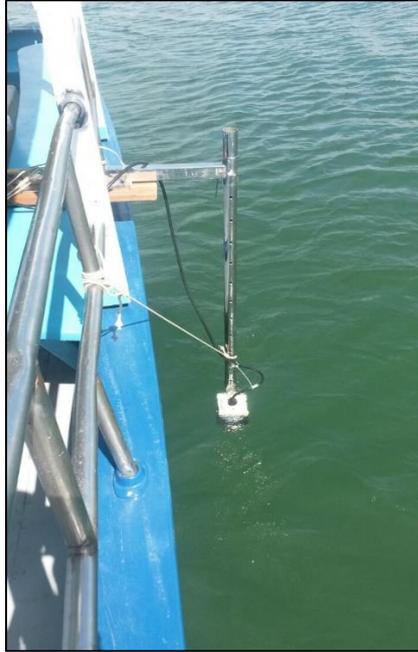
Figura 25: Sonda CTD para amostragem da salinidade e temperatura da água.



5.3 Medições de correntes

Os perfis verticais de corrente foram medidos através do ADCP Sontek River Surveyor de 1500 MHz (Figura 26), os Perfiladores Acústicos Doppler de Correntes (ADCP) são sonares ativos que utilizam a energia acústica e o efeito doppler para determinar a velocidade de correntes marinhas em diversas camadas. São compostos basicamente de transdutores, circuitos eletrônicos de transmissão e recepção do sinal acústico, que geram, transmitem, recebem e processam o sinal. Estes componentes são alojados em um invólucro de material resistente de forma cilíndrica, podendo ou não comportarem baterias para o funcionamento autônomo.

Figura 26: ADCP utilizado para medição da velocidade e direção da corrente.



Os ADCPs funcionam com três ou quatro feixes com separação angular de 120° ou 90° respectivamente. Em cada feixe, obtém-se um perfil de velocidade e, com pelo menos três feixes, pode-se determinar o vetor de velocidade em três dimensões. Através de seus transdutores o instrumento transmite e recebe pulsos sonoros de frequência, duração a intervalos predeterminados (GORDON, 1996). Partículas em suspensão na coluna d'água refletem e espalham o pulso sonoro em diversas direções a diferentes profundidades. Devido a diferença das frequências dos pulsos refletidos, o instrumento determina as diferentes posições onde ocorreu a reflexão de tais pulsos. Se a fonte do eco (partículas em suspensão) tem movimento relativo ao receptor (ADCP), a frequência do som no receptor é modificada em relação à frequência da fonte pela seguinte igualdade (SONTEK, 1996):

$$F_{doppler} = F_{fonte} \cdot \left(\frac{V}{C} \right) \quad (13)$$

onde:

$F_{doppler}$ = mudança na frequência recebida (efeito Doppler)

F_{fonte} = frequência transmitida pela fonte

V = velocidade da fonte em relação ao receptor

C = velocidade do som

Esta característica permite que o ADCP forneça perfis verticais de velocidade e direção de correntes em diferentes profundidades. O instrumento pode fornecer a velocidade da corrente de até 130 níveis de profundidade distintos, cada nível de profundidade também recebe o nome de Bin (RD INSTRUMENTS, 1992). A separação dos perfis em células de profundidade é obtida com a segmentação no tempo do eco recebido, conhecendo-se a velocidade de propagação do som na água do mar.

Para o manuseio do instrumento é necessário configura-lo de acordo com as características físicas do local de fundeio e do objetivo do estudo. A tabela abaixo apresenta as configurações estabelecidas enfatizando o desvio padrão, calculado pelo software de configuração, que relaciona as características do local de fundeio, o objetivo do experimento e as especificações físicas do instrumento, assim minimizando-o ao máximo.

Para cada laguna foram necessárias configurações diferentes, as medições realizadas na laguna Manguaba se fez necessária apenas a declinação magnética adotada do instrumento ($-22,62^\circ$) enquanto a laguna Mundaú, além da configuração do instrumento, precisou-se do ajuste de 55° ($32,38^\circ$).

Tabela 7: Descrição das configurações utilizadas no ADCP.

Número de células de profundidade (Bins)	20/12 válidos
Tamanho da célula	0,25 m
Intervalo de amostragem	5 seg
Declinação magnética	$-22,62^\circ$
Distância ao primeiro Bin	0,65

5.4 Medidas de vento

A distribuição dos ventos (direção, velocidade) foi medida a cada 30 min, seguindo a mesma frequência dos dados hidrográficos, determinadas através do anemômetro portátil acoplado a uma bússola analógica (Figura 27).

Figura 27: Anemômetro portátil acoplado a uma bússola analógica utilizado para medição da velocidade e direção dos ventos.



5.5 Processamento de dados

A partir dos dados coletados, posteriormente tabulados, retirados os erros decorrentes dos instrumentos no momento da coleta e organizados no programa Microsoft Excel, utilizou-se o software Surfer, na versão 9, desenvolvido pela Golden Software Inc., que pode ser utilizado para cálculo e a confecção de mapas, na plataforma Windows, de variáveis a partir de dados regularmente distribuídos. Foi definido a malha de interpolação, os limites máximos e mínimos e o espaçamento dos números de linhas e colunas, aplicou-se o método Kriging, método geoestatístico que leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de elementos regionalizadas, a partir deste, foram gerados mapas de distribuição da salinidade e temperatura dos eventos estudados.

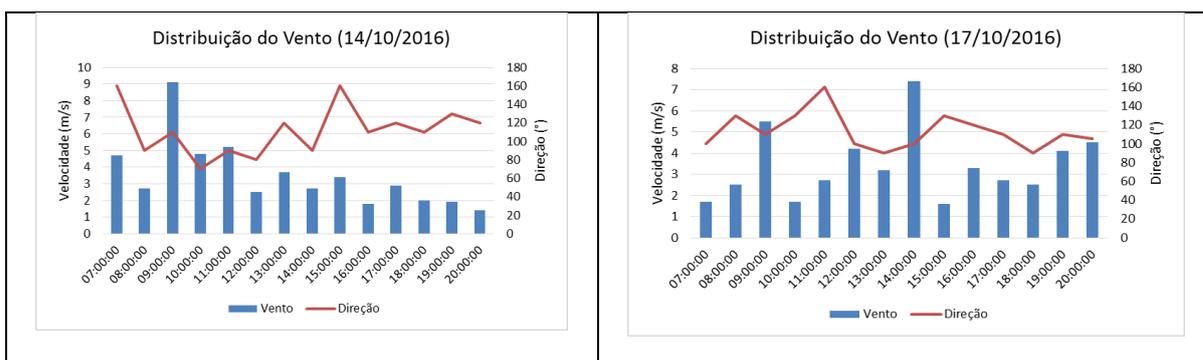
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados no item 6.1 são referentes as coletas efetuadas nos canais de desembocadura das lagoas Mundaú e Manguaba a fim de caracterizar a circulação hidrodinâmica dos mesmos durante 1 ciclo de maré em coletas contínuas de 13 horas. No item 6.2 em diante são descritos os resultados das condições hidrodinâmicas e do tempo de residência com o modelo Mike 21.

6.1 Coletas realizadas nos dias 14/10/2016 e 17/10/2016

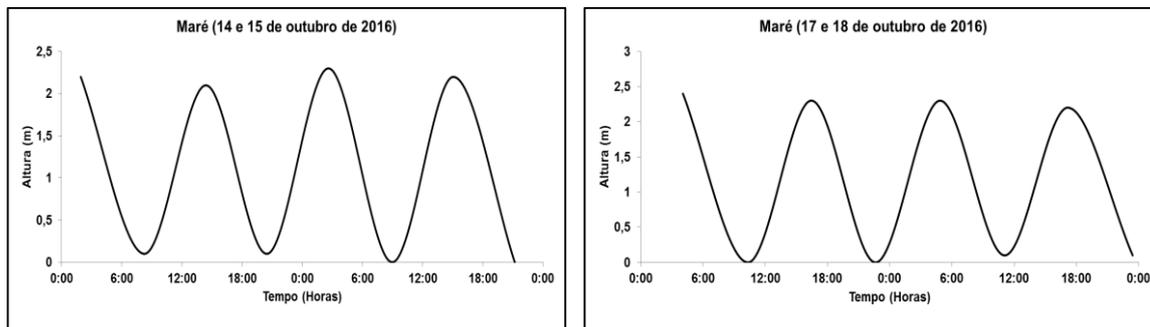
Em um sistema estuarino raso, como é o caso das lagunas Mundaú e Manguaba, o vento é uma das principais causas da dinâmica das lagunas, uma variável que provoca a mistura das massas de água e geram ondas e correntes no estuário intensificando a mistura vertical. Os dados de vento coletados na desembocadura da laguna Mundaú (Figura 28) no dia 14/10 apresentaram baixa intensidade com valores oscilando entre 1,4 a 9,1 m/s, o pico de maior energia ocorreu às 09:00 horas, os dados mostraram uma média de 3,4 m/s e direção predominante no quadrante Leste/Lés-Sueste. No canal de desembocadura da Manguaba (Figura 28) os ventos também apresentaram baixa intensidade com valores oscilando entre 1,6 a 7,4 m/s, os picos de maior energia ocorreram às 09:00 e 14:00 horas, com a mesma média apresentada na coleta anterior (3,4 m/s) e direção predominante Leste/Lés-Sueste.

Figura 28: Distribuição dos ventos durante a campanha dos dias 14/10/2016 e 17/10/2016.



Os dados de maré utilizados na confecção deste trabalho (Figura 29), são provenientes do Porto de Maceió localizado a cerca de 8 km e 12 km dos locais de medições das lagunas. Para a elaboração dos gráficos fez-se necessário a interpolação dos dados por conta das medições estarem limitadas apenas em picos de maré de vazante e enchente. A figura 29 mostra as variações das marés para o período de estudo, os dados apresentaram amplitudes máximas de 2,2 e 2,4 metros nos dias 14 e 17/10/2016, respectivamente.

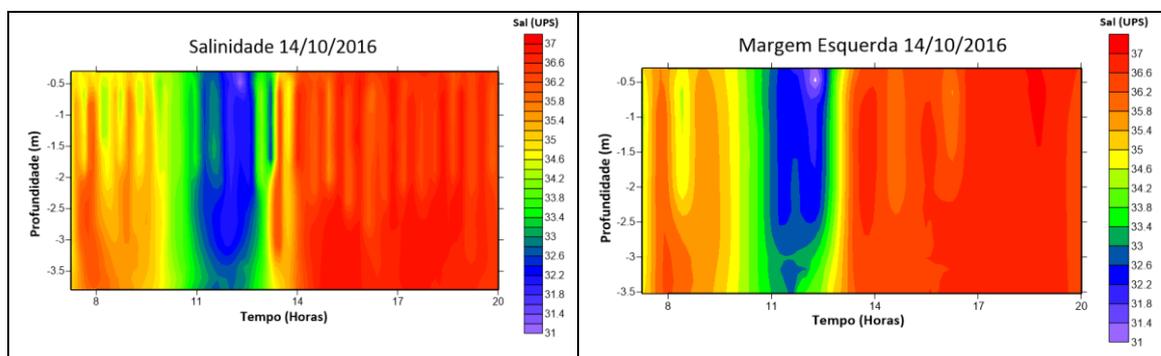
Figura 29: Variações da maré para o período analisado. (Gerado a partir da maré prevista para o porto de Maceió, DHN da Marinha do Brasil).



As coletas realizadas nos canais próximo a foz nos dias 14 e 17 de outubro iniciaram ambas as 7 horas em 1 ciclo de maré, constando 13 horas contínuas. As figuras abaixo apresentam os resultados de salinidades referente aos canais da laguna Mundaú (Figura 30) e a laguna Manguaba (Figura 31). A variabilidade de salinidade mostrou ser bem alta na região desde as primeiras horas de coletas, destacando a forte estratificação proveniente do oceano.

O gradiente de salinidade próximo de onde foi executado as medições, necessariamente esperávamos resultados acentuados por haver condições de interação muito próximas ao mar. De acordo com Magalhães (2005) há uma ampla variação da salinidade nas lagunas, com locais próximos à entrada de águas fluviais de 0 UPS e superiores a 37 UPS nas proximidades da boca da barra, estando esses valores sujeitos a mudanças de acordo com o período do ano, à amplitude de maré, vazão dos rios e as possíveis mudanças morfológicas causadas por assoreamento no estuário.

Figuras 30: Distribuição espaço/temporal da salinidade no canal principal próximo à desembocadura da laguna Mundaú (Lat. 9° 42'30.58 S; Long. 35°47'47.35''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 14/10/2016.



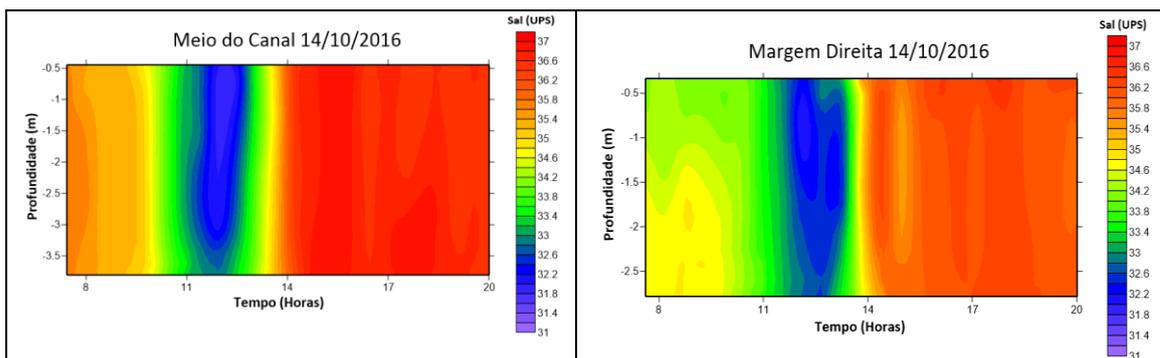
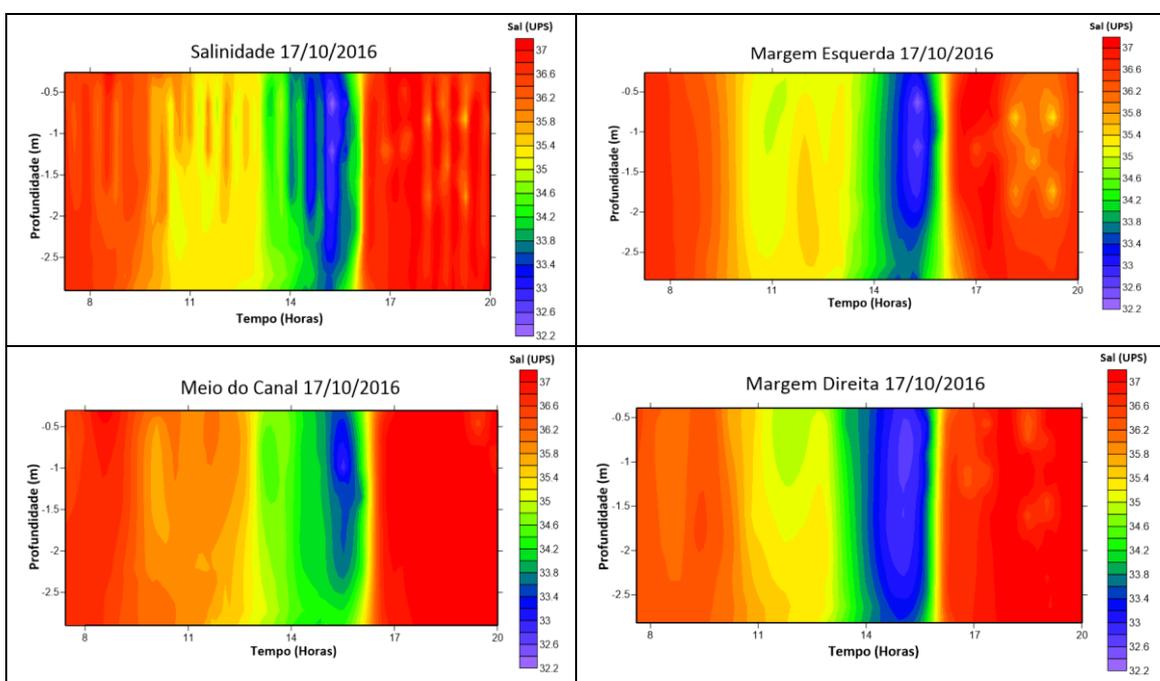


Figura 31: Distribuição espaço/temporal da salinidade no canal principal próximo à desembocadura da laguna Manguaba (Lat. 9° 43'57.27''S; Long. 35°49'20.47''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 17/10/2016.



O canal da Mundaú apresentou uma profundidade maior que o canal da Manguaba e a salinidade variou entre 31 a 37 UPS em todo o período de amostragem. Por sua estrutura e formação a Mundaú sofre mais impacto quanto a penetração de salinidade dentro do seu ambiente o que influencia no aumento da produtividade na distribuição de espécies de peixes e de sururu (SILVA et al, 2007). De acordo com Portobrás/INPH (1984;1985) a laguna Mundaú mostrou valores de salinidade 36,2 UPS próximo a boca da barra em período secos, valor bem próximo encontrado nos resultados das coletas, em períodos chuvosos a salinidade cai para 33,5 UPS.

A laguna Manguaba mostrou uma variação de salinidade entre 32,2 a 37 UPS próximo da sua desembocadura, bem próximo dos dados observados na laguna Mundaú, segundo

Machado (1989) a salinidade no interior da laguna Manguaba variam entre 0 e 5 UPS devido a penetração das águas marinhas ser bastante reduzida e por se tratar de um ecossistema alongado associado a distância entre a desembocadura e o seu corpo d'água.

A variação de salinidade em ambientes estuarinos é um dos principais mecanismos auxiliares no movimento e na mistura de massas de água devido ao seu efeito na densidade, além de ter uma enorme relação com a distribuição das espécies vegetais e, portanto, na estruturação de comunidades.

Resultados referente as medições da temperatura da água para a o canal de desembocadura da laguna Mundaú (Figura 32) mostrou valores oscilando entre 26,7 a 28,4 °C com amplitude térmica de 1,7 °C, o período em que mostrou valores mais acentuados ocorreu entre as 11:00 e 14:00 horas. Na laguna Manguaba (Figura 33) os dados variaram entre 26,6 a 29,8 °C com amplitude térmica de 3,2 °C, valores próximos aos encontrados no estudo realizado por Magalhães (2005) onde os dados de temperatura da água apresentaram valores oscilando entre 25 e 31°C na laguna Manguaba e 26 a 31,5 °C na laguna Mundaú, os dados com maior temperatura da água foram encontrados nas medições realizadas no período seco da região. Apesar das medições do presente estudo também ter sido no período característico seco da região que vai nos meses de setembro a fevereiro, os dados observados para ambas as lagunas foram inferiores a 30°C.

Figura 32: Distribuição espaço/temporal da temperatura no canal principal próximo à desembocadura da laguna Mundaú (Lat. 9° 42'30.58 S; Long. 35°47'47.35''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 14/10/2016.

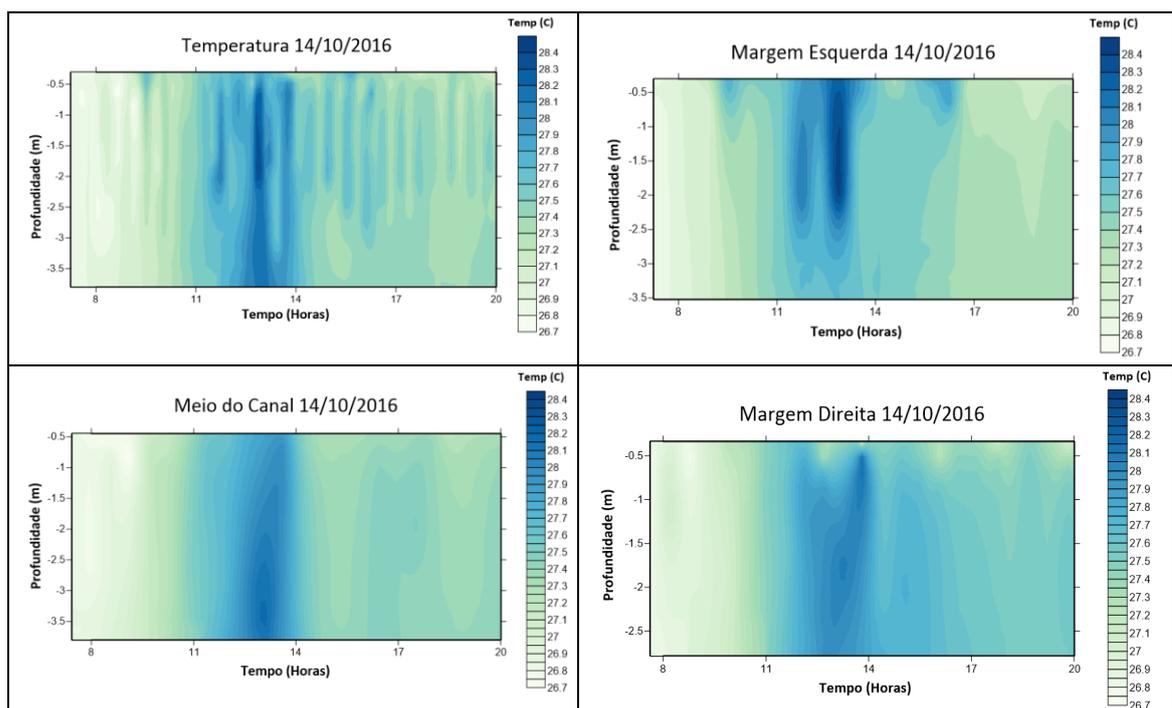
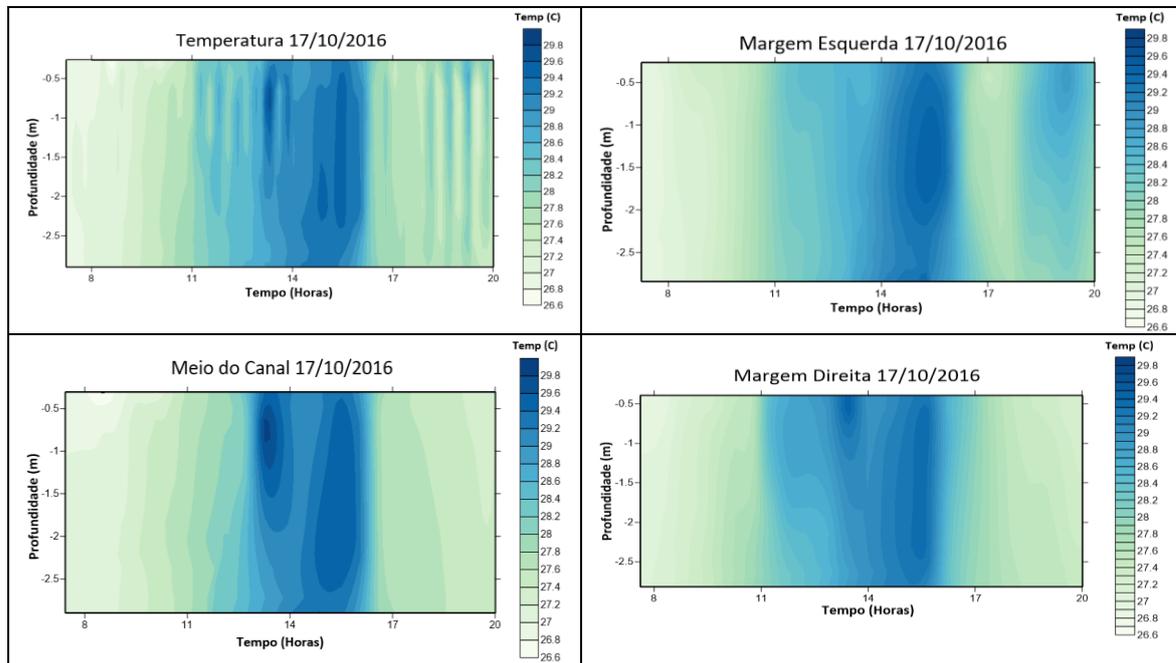


Figura 33: Distribuição espaço/temporal da temperatura no canal principal próximo à desembocadura da laguna Manguaba (Lat. 9° 43'57.27''S; Long. 35°49'20.47''W), durante 1 ciclo de maré, entre às 7:00 e 20:00 horas do dia 17/10/2016.



Os resultados a seguir são referentes as coletas realizadas com o instrumento ADCP nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba, as coletas iniciaram as 7 horas nos dias 14 e 17/10, embora as medições na laguna Manguaba tiveram início as 9 horas por questões logísticas do instrumento. As componentes longitudinais (u) e transversais (v) das correntes na laguna Mundaú mostraram contribuições adversas nas velocidades das correntes, influenciando sentidos opostos no decorrer dos perfis (Figura 34), observa-se que a componente longitudinal auxiliou em maior intensidade as correntes de enchente alcançando valores de $-1,3$ m/s, enquanto a componente transversal mostrou maior predominância com correntes de vazante com intensidade máxima de $1,2$ m/s (Figura 35). A direção das correntes durante a coleta do dia 14/10 apresentou nas primeiras e ultimas horas de medição predominância no sentido sudeste (120°), enquanto que entre 12:00 e 17:00 horas o quadrante noroeste (300°) mostrou maior influência (Figura 36). Diferente da laguna Mundaú, as componentes ao longo do canal (u) e a componente transversal ao canal (v) mostraram uma simetria em que ambas auxiliaram em menor ou maior intensidade as correntes de enchente e vazante como mostra os perfis na figura 34. Os resultados na laguna Manguaba revelaram que a componente longitudinal (u) apresentou maior relevância com intensidade variando de 2 a -2 m/s, a direção das correntes (Figura 35) nas primeiras horas de coleta não indicou nenhuma predominância nos quadrantes, embora a partir das 14:00 horas o quadrante Sudoeste (210°) indicou maior influência. Por se

tratar de um ambiente raso, as velocidades das correntes não variaram com o aumento da profundidade, apresentando um comportamento semelhante da superfície ao fundo em ambas as lagoas (Figura 36).

Figura 34: Componentes longitudinais (u) e transversais (v) nas desembocaduras das lagoas Mundaú e Manguaba.

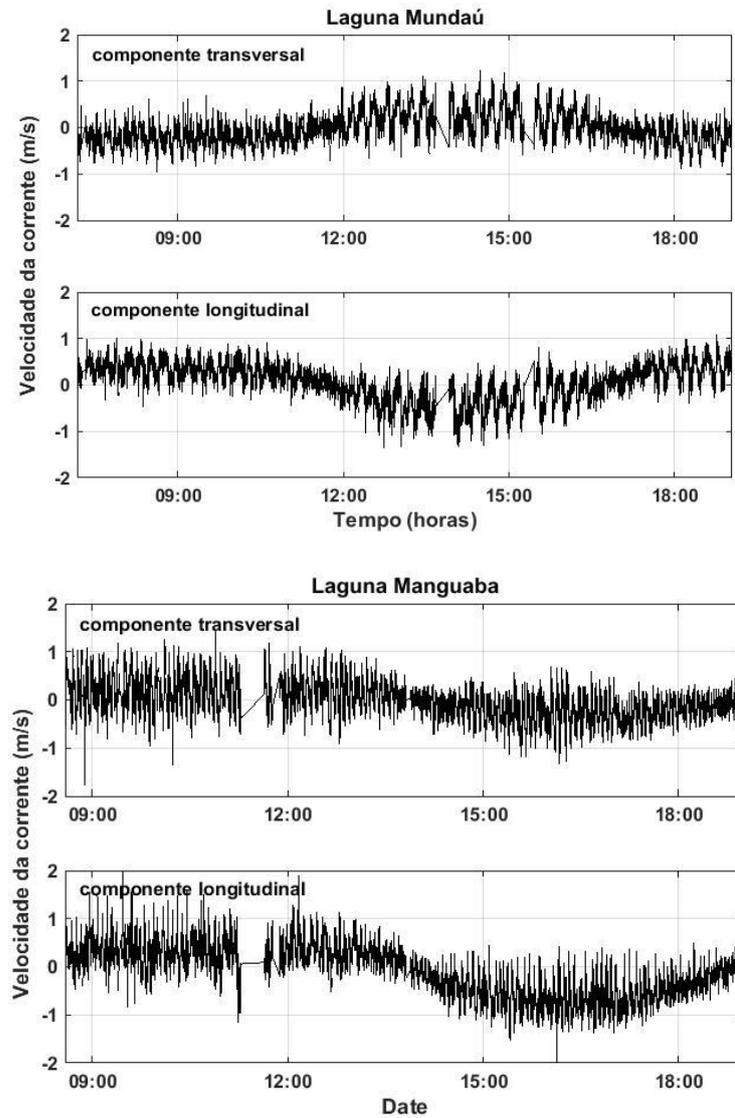


Figura 35: Velocidades das Componentes longitudinais (u) e transversais (v) em coletas realizadas no dia 14 e 17/10 nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba.

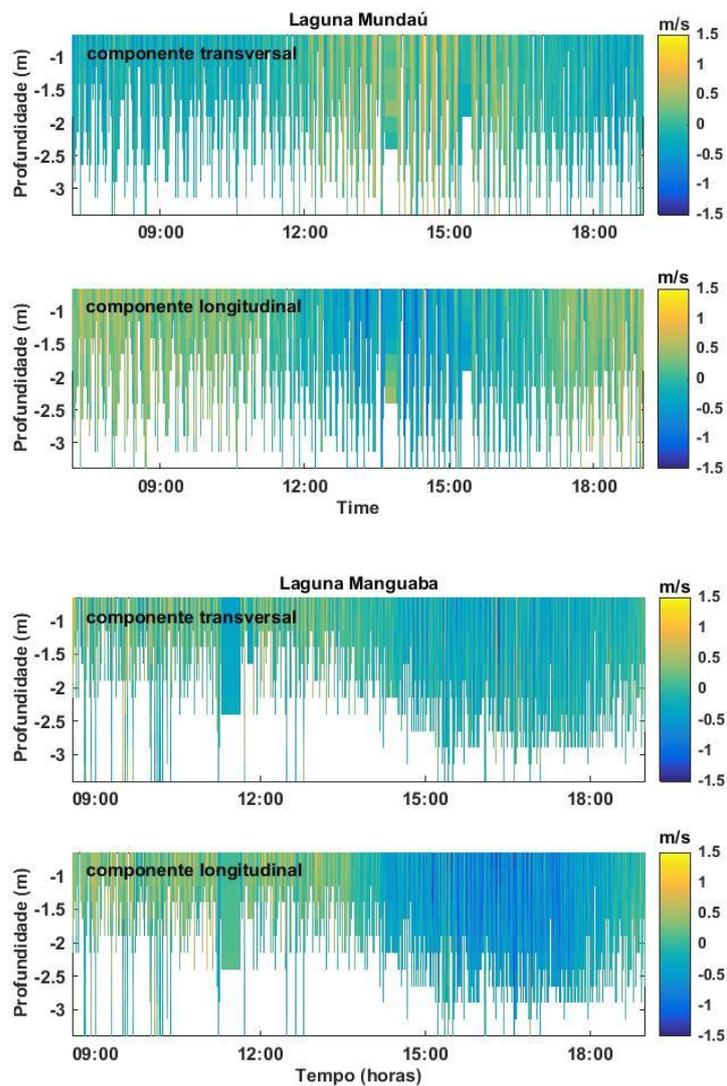
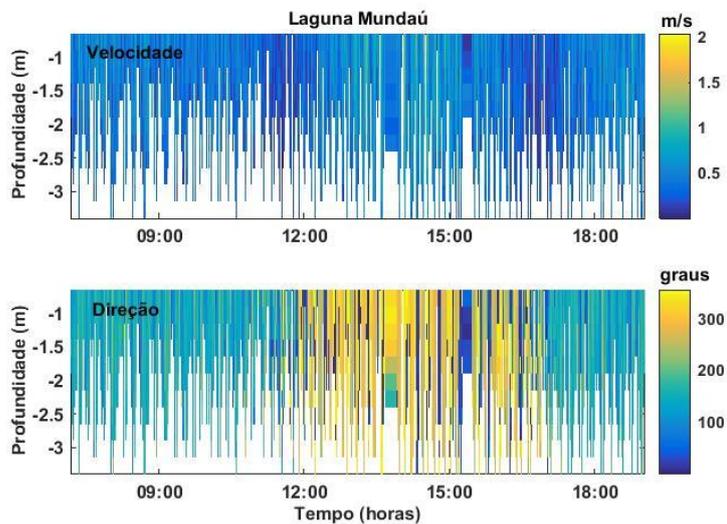
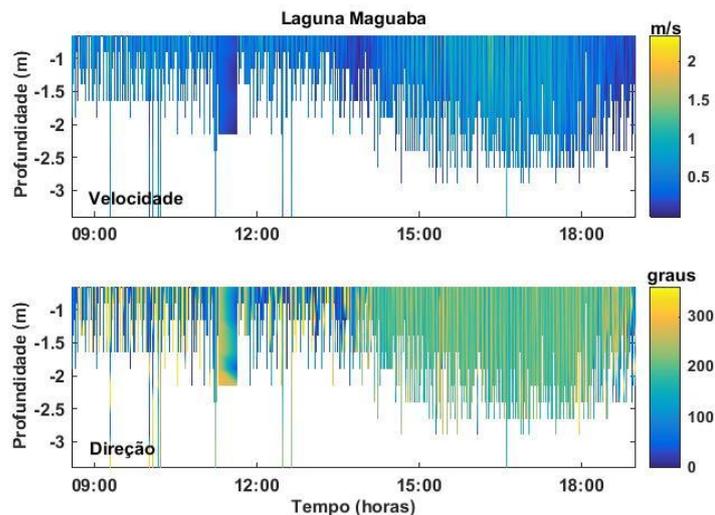


Figura 36: Distribuição das velocidades e direções das correntes em coletas realizadas no dia 14 e 17/10 nas desembocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba.





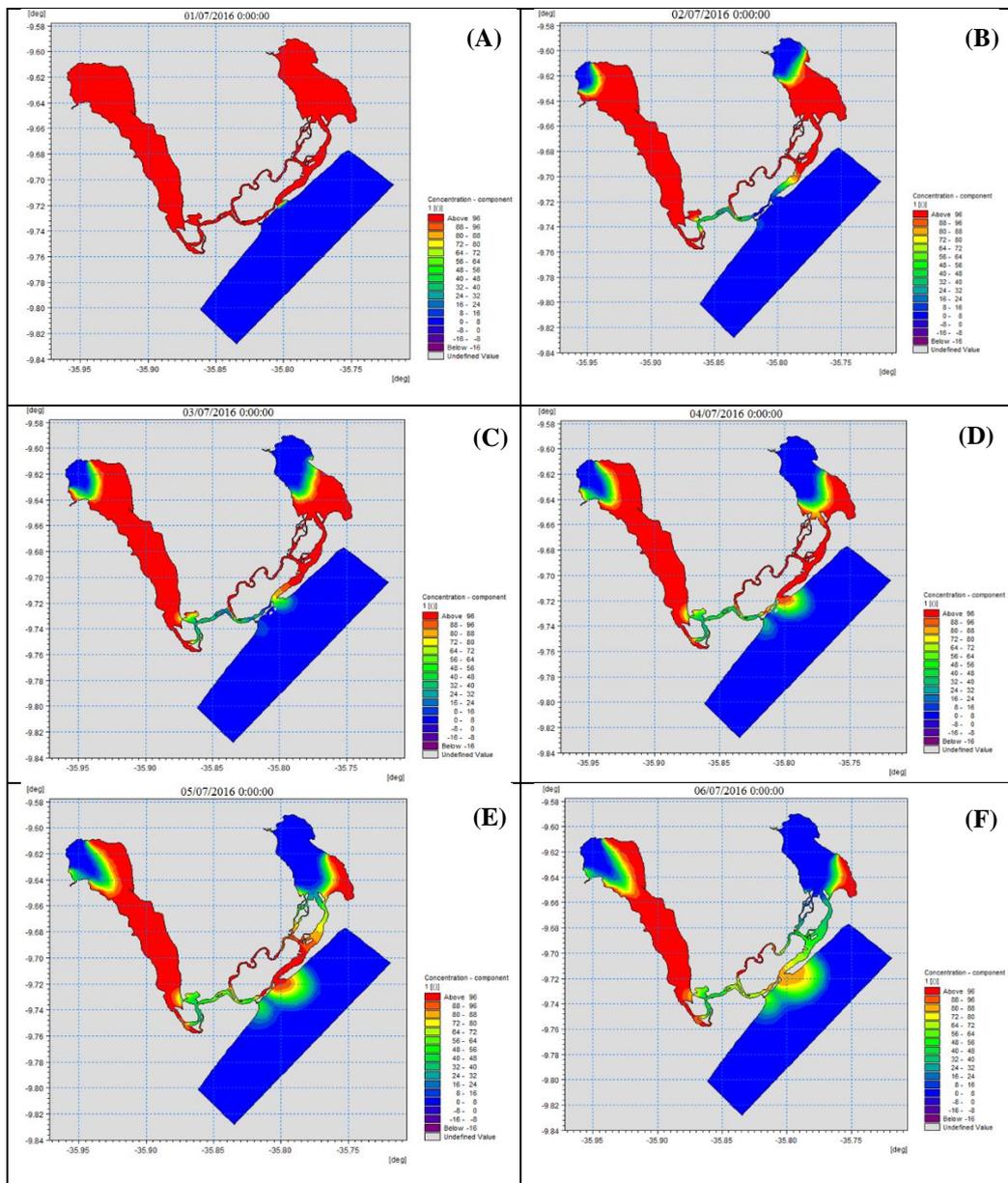
6.2 Tempo de residência com dados históricos (1978 – 2016)

Baseado no princípio do traçador conservativo como condição inicial, preenchemos as áreas internas do sistema estuarino (CELMM) com uma concentração inicial de 100%, representado pela área em vermelho, e fora do sistema, região costeira, foi inserido uma concentração contendo 0%, representado na cor azul como mostra o mapa (Figura 37A). A utilização desta metodologia, mesma adotada em Cavalcante et al, (2012), visa identificar a dispersão de uma substância hipotética lançada dentro do ambiente, tendo como limite padrão para qualidade da água, o tempo para que tal substância atinja a concentração de 37% (CAVALCANTE et al, 2012). Dependendo do tempo necessário para que a concentração da substância hipotética atinja 37%, este ambiente estuarino pode estar susceptível à problemas ambientais ligados a qualidade da água (PILOTTI et al, 2014).

Os resultados dos cenários utilizando dados históricos mostraram que nos primeiros dias (Figura 37A-F) de simulação, as lagoas Mundaú e Manguaba apresentaram concentrações na ordem de 0% próximo das desembocaduras dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. A partir do quarto dia de simulação (Figura 37-D), a laguna Mundaú registrou uma concentração de 0% em praticamente 53% de área total, resultado semelhante ao encontrado por Larsson e Nilsson (2014) onde de acordo a metodologia usando o prisma de maré como componente principal no modelo IPH-ECO e os dados de batimetria dos levantamentos realizados pela ANA em 2012, a laguna Mundaú necessitou de 3 dias para atingir 50% da sua renovação, enquanto que a Manguaba apresentou uma concentração de 37% em 20% da área total.

Devido o maior fluxo de descarga fluvial na laguna Mundaú, o tempo para redução das concentrações foi mais rápido nesta laguna, sendo necessário 6 dias (Figura 37-F) para atingir 37% em 72% da área total, sugerindo uma renovação eficiente da água em quase toda área desta laguna em poucos dias de simulação. Por outro lado, a baixa descarga fluvial dentro da laguna Manguaba resultou em redução da intensidade das correntes e aumento no tempo para a dispersão do traçador, sendo necessário mais de 6 dias para alcançar 37% na primeira metade da laguna.

Figura 37: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados históricos durante os primeiros dias.



A figura 38 apresenta os mapas da distribuição de concentração do traçador com dados históricos a cada 5 dias, tendo como base este cenário, observa-se que após 14 dias (Figura 38-C) a laguna Mundaú alcançou 94% da concentração inicial, o que sugere uma completa renovação da água dentro desse ambiente. De acordo com o trabalho de Larsson e Nilsson (2014) mostrou que a laguna Mundaú necessitou de aproximadamente 19 dias para renovação da água da laguna, embora esse estudo foi realizado no período seco da região no mês de fevereiro.

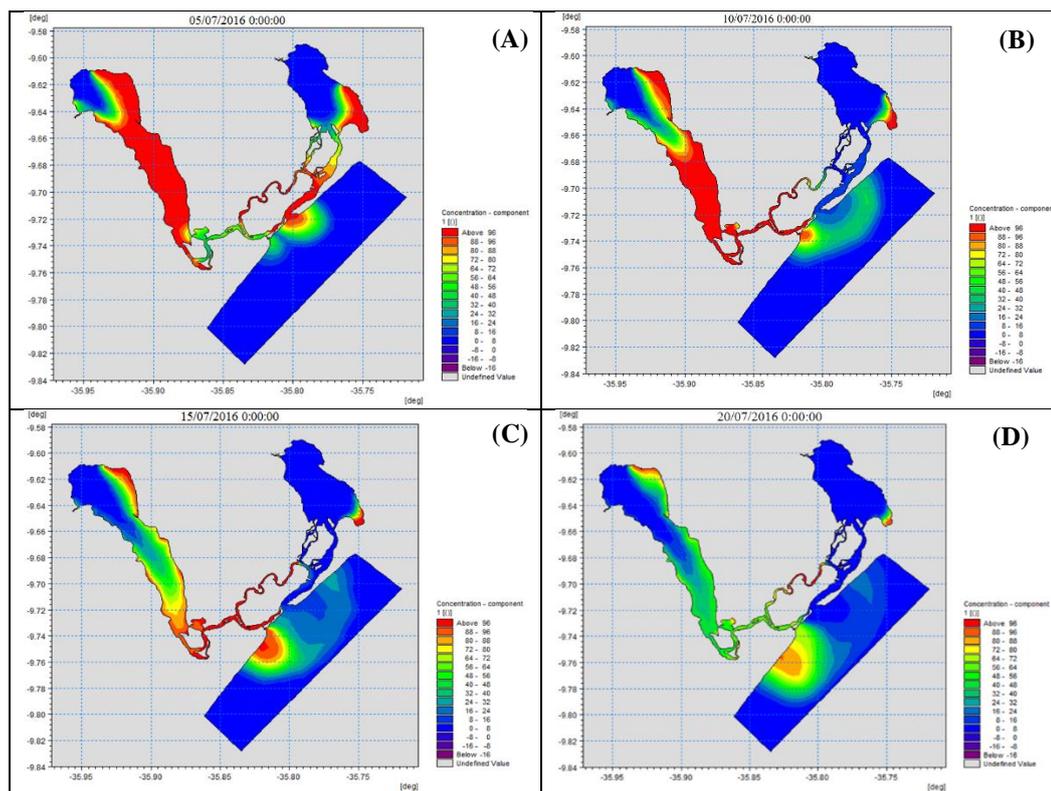
Da mesma forma, os autores Oliveira & Kjerfve (1993) afirmam que o tempo de renovação na laguna Mundaú foi de 16 dias, este estudo é regido de acordo com o prisma de maré, quanto de água é trocada por ciclo de maré e a descarga de água doce em relação ao volume total das lagoas, além de utilizar os dados de batimetria de 1985. Analisando-se as concentrações próximo da área de desembocadura do rio Paraíba do Meio, a redução da concentração da substância hipotética dentro da laguna Manguaba atingiu valores em torno de 0% após 10 dias de simulação em 38% da sua área (Figura 38-B), revelando uma renovação relativamente rápida da água na área onde existe uma maior influência da descarga do rio Paraíba do Meio. Devido a sua extensão e seu estreito canal de ligação com o mar, a laguna Manguaba necessitou de 30 dias para atingir o valor de 37% em 94% da sua área total, revelando um elevado tempo de residência principalmente nas áreas onde existem trocas com o mar, nas margens e na parte norte da laguna.

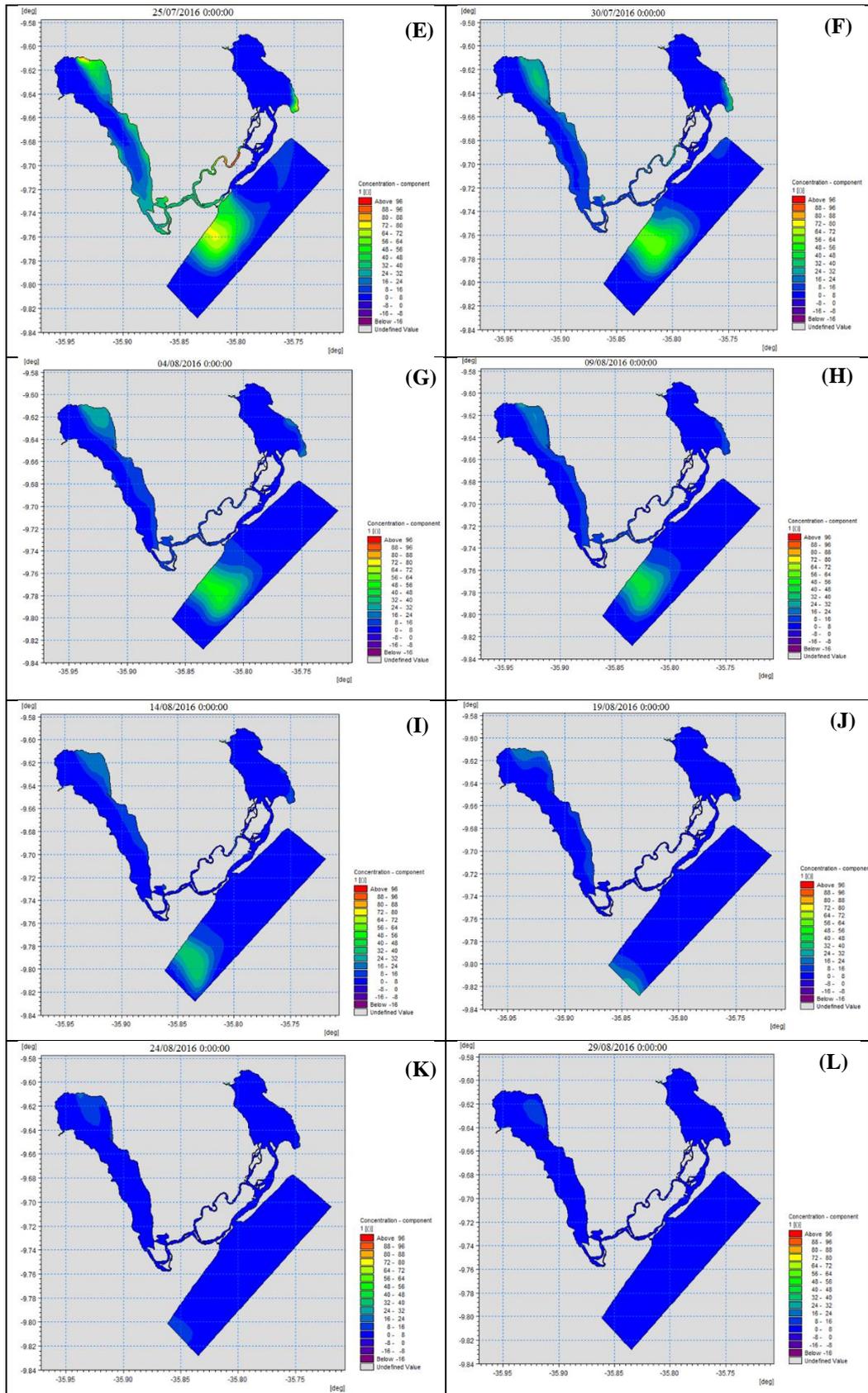
Tendo como base o trabalho de Oliveira & Kjerfve (1993), os autores estimaram o tempo de residência para a laguna Manguaba de 36 dias, é notório que a Manguaba possui um tempo de renovação maior por haver necessariamente uma descarga de água, prisma de maré menor em comparação com a laguna Mundaú, além de possuir o dobro de volume de água. As variações das estimativas do tempo de residência refletem padrões de vazão e geomorfologia diferentes, porém nossos valores se assemelham aos encontrados em Oliveira & Kjerfve (1993); Larsson e Nilsson (2014). É importante mencionar que a geomorfologia das lagoas sofreu alterações significativas nos últimos anos (Silva et al., 2008) modificando o fluxo no interior das lagoas. Estudo realizado por Souza (2017) mostra o avanço do delta na parte norte da laguna Mundaú com imagens de satélite entre os anos de 2002 a 2010, evidenciando o processo de assoreamento causados pela erosão dos rios afluentes que favorece na perda de profundidade. Ainda nesse estudo, comparou-se os levantamentos batimétricos de 1985 e 2012, em 1985 as profundidades médias eram 1,50 m e 2,10 m para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente, e para o ano de 2012 as lagoas mostraram uma profundidade média de 1,19

e 1,67 m indicando um problema crítico em relação a taxa de sedimentação no CELMM e consequentemente favorecendo para um ambiente degradado em função de uma hidrodinâmica não favorável pra renovação das suas águas.

Considerando os sistemas lagunares Mundaú e Manguaba, os tempos de residência da água simulados com dados históricos revelaram comportamentos diferenciados para cada ambiente. O sistema da laguna Mundaú apresentou níveis de concentração em torno de 37% logo após 6 dias de simulação (Figura 37-F) em quase toda sua extensão, o que sugere que há pouco potencial para problemas de qualidade da água dentro desta área. Por outro lado, a laguna Manguaba registrou valores em torno de 37% na em uma área relevante só após 20 dias de simulação (Figura 38-D), indicando um potencial maior para possíveis problemas ligados a qualidade da água.

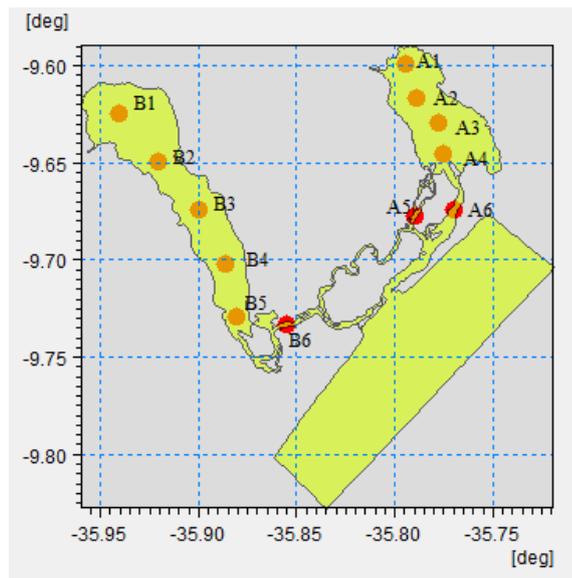
Figura 38: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados históricos a cada 5 dias.





Considerando as alterações hidrodinâmicas em área específicas do CELMM causadas pela oscilação da batimétrica ao longo das lagunas, foram selecionados alguns locais específicos representados por 12 estações dentro do complexo estuarino lagunar Mundaú Manguaba. Estes locais servirão como base para identificarmos as concentrações correspondentes ao período estudado e os padrões de correntes (componentes longitudinais u e transversais v) descritas no item 6.3 em variabilidade das correntes com dados históricos de vazão. As localizações das estações para a extração de dados históricos de concentração e velocidades das componentes u e v estão representados por A1, A2, A3, A4, A5, A6 (Mundaú); B1, B2, B3, B4, B5 e B6 (Manguaba) de acordo com a figura 39.

Figura 39: Localização da extração dos dados históricos de concentração e de velocidades das componentes u e v no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação A2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação A3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação A4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação A5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A6: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação B2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação B3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação B4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação B5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação B6: Lat. -9.733; Long. -35.855.

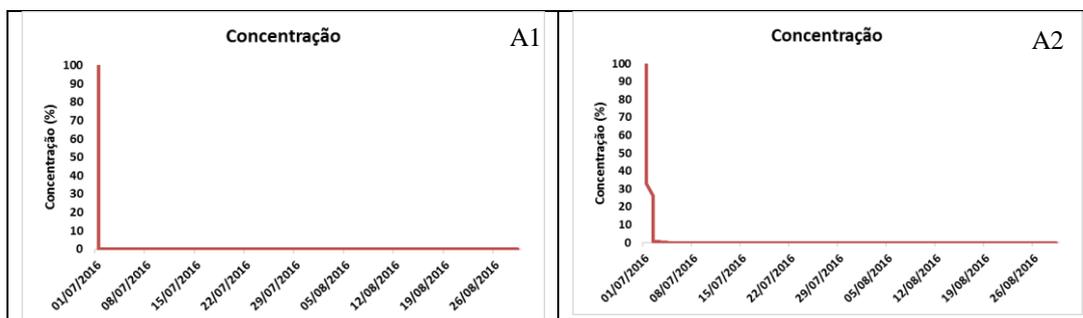


A representação dos dados de concentração distribuídos em estações na área da laguna mundaú são mostradas na figura 40. Devido à proximidade com a desembocadura do rio Mundaú, a estação A1 é diretamente influenciado pela descarga fluvial deste rio para a laguna Mundaú, refletindo no curto espaço de tempo de apenas 2 horas para que a concentração atingisse níveis próximos a 37% (Figura 40-A1). Analisando as áreas mais afastadas da desembocadura do rio Mundaú, representada pelas estações A2, A3 e A4, observa-se um aumento gradual no tempo necessário para atingir o nível de concentração de 0%, sendo encontrado um tempo de 2, 3 e 5 dias, respectivamente. Já para as áreas dentro dos canais de

conexão com a região costeira, pontos A5 e A6, que estão sujeitos a variações na concentração do traçador devido a influência das marés, foram encontrados valores em torno dos 37% da concentração inicial após 7 dias de simulação. Como esperado, à medida que vai distanciando da região de desembocadura do rio Mundaú, observa-se um aumento no tempo necessário para que ocorra redução da concentração do traçador, como mencionado anteriormente.

A distribuição da concentração do traçador ao longo dos locais selecionados para a laguna Manguaba (Figura 41), mostrou que a taxa de redução da concentração do traçador conservativo foi mais lenta, confirmando os resultados exibidos na sessão anterior (Figura 38A-L). De acordo com os dados extraídos para a laguna Manguaba, a área mais próxima da desembocadura do rio Paraíba do Meio (PM), representada pela estação B1, levou apenas 2 dias para atingir uma concentração de 37%, significando uma rápida renovação da água nesse local. Para a estação B2, mais afastada da região de descarga do rio PM, houve um aumento para redução da concentração, necessitando de 9 dias para alcançar a concentração de 37%. Em seguinte, na estação B5, o tempo para redução da concentração do traçador foi elevado, onde só após 3 semanas (~21 dias) observou-se níveis em torno de 37%. Por outro lado, um padrão de alta variabilidade foi encontrado para a estação B6 mais à jusante da desembocadura, onde os valores em torno de 30% e 100% foram registrados nos primeiros 8 dias de simulação, o que pode ser resultado da oscilação das correntes durante os ciclos de maré, auxiliando a entrada e saída de água entre o sistema estuarino e a região costeira.

Figura 40: Dados históricos de concentração da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.



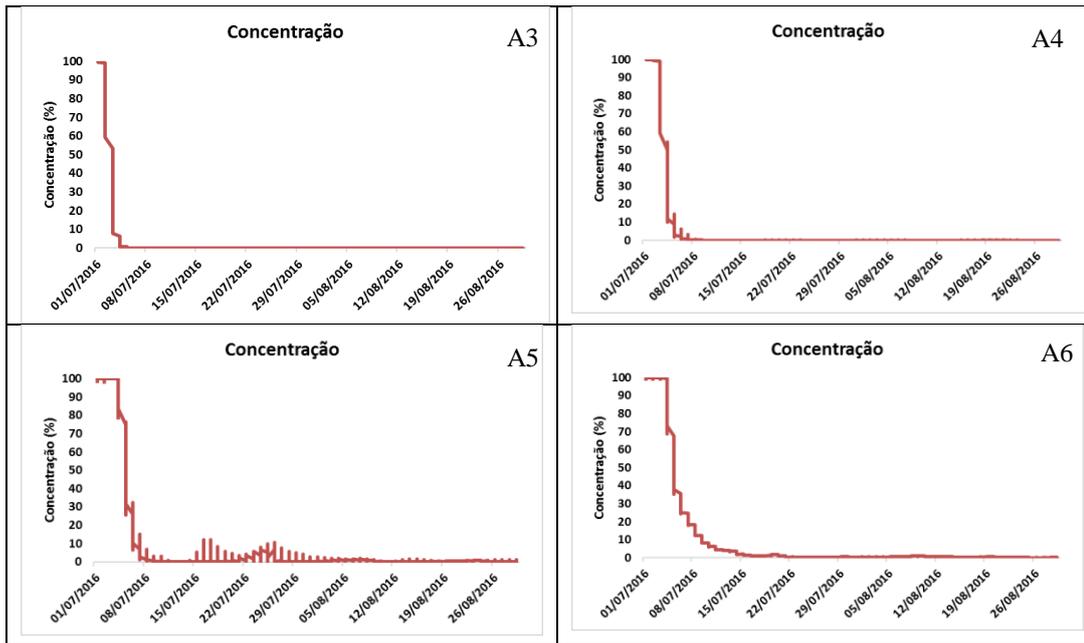
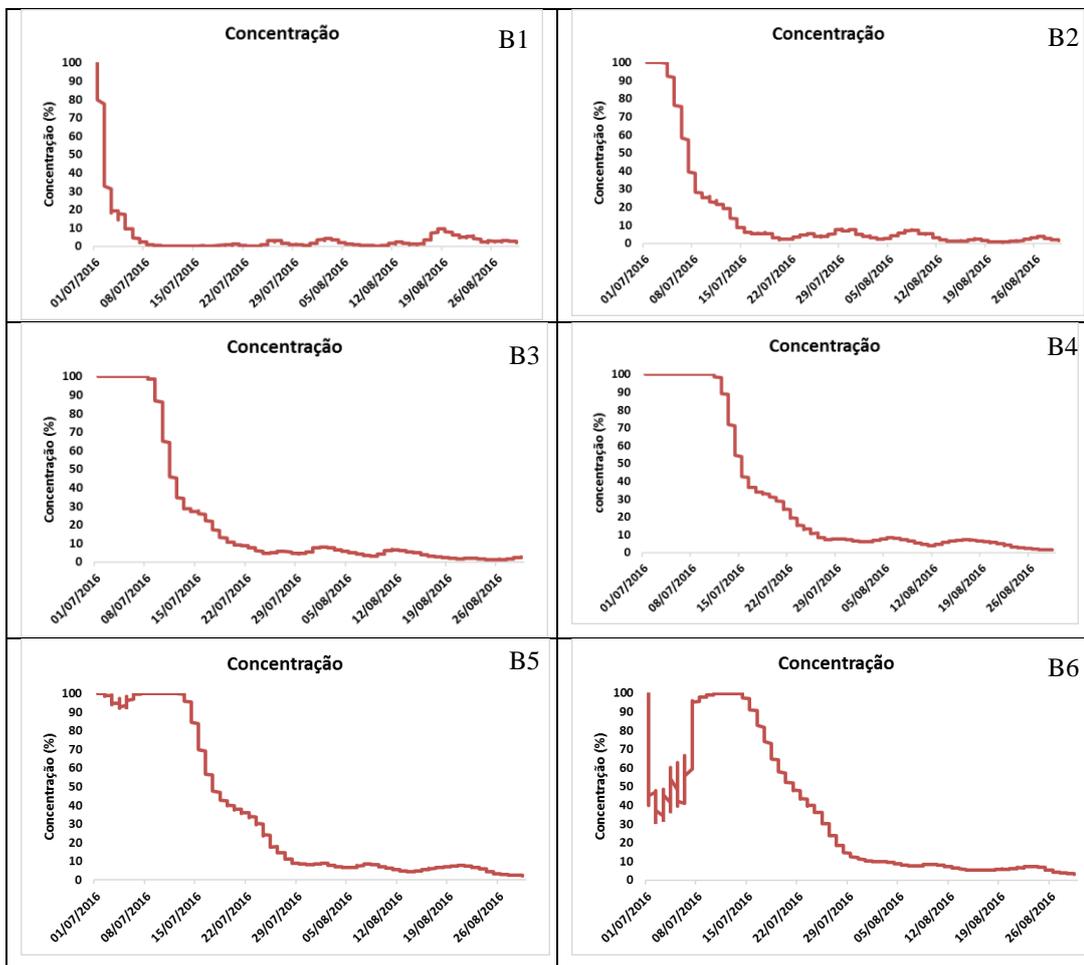


Figura 41: Dados históricos de concentração da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.



6.3 Variabilidade das correntes com dados históricos de vazão

Os dados de velocidade das componentes u (ao longo do canal) e v (transversal ao canal) das lagunas Mundaú e Manguaba são descritas nas figuras 42 e 43 de acordo com as estações distribuídas no CELMM na figura 39. De acordo com os locais de extração dos dados de corrente dentro da laguna Mundaú (Figura 42 A1-A6), observa-se que a componente transversal ao canal (v) apresentou maiores flutuações na velocidade da corrente variando entre 0,25 a -0,2 m/s, e com valor máximo de 0,25 m/s na estação próxima ao canal de ligação com o mar A6. Da mesma forma, a laguna Manguaba revelou a componente transversal (v) como a mais intensa ao longo das estações de extração dos dados (Figura 43 B1-B5), onde os valores variaram entre 0,05 a -0,03 m/s, e com máximos de 0,05 m/s registrado na estação B5. Ainda de acordo com os dados de corrente, a estação B6 foi a única que apresentou maiores valores de corrente para a componente ao longo do canal (u) com intensidade entre 0,25 a -0,3 m/s.

Figura 42: Dados históricos de velocidade das componentes u e v da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.

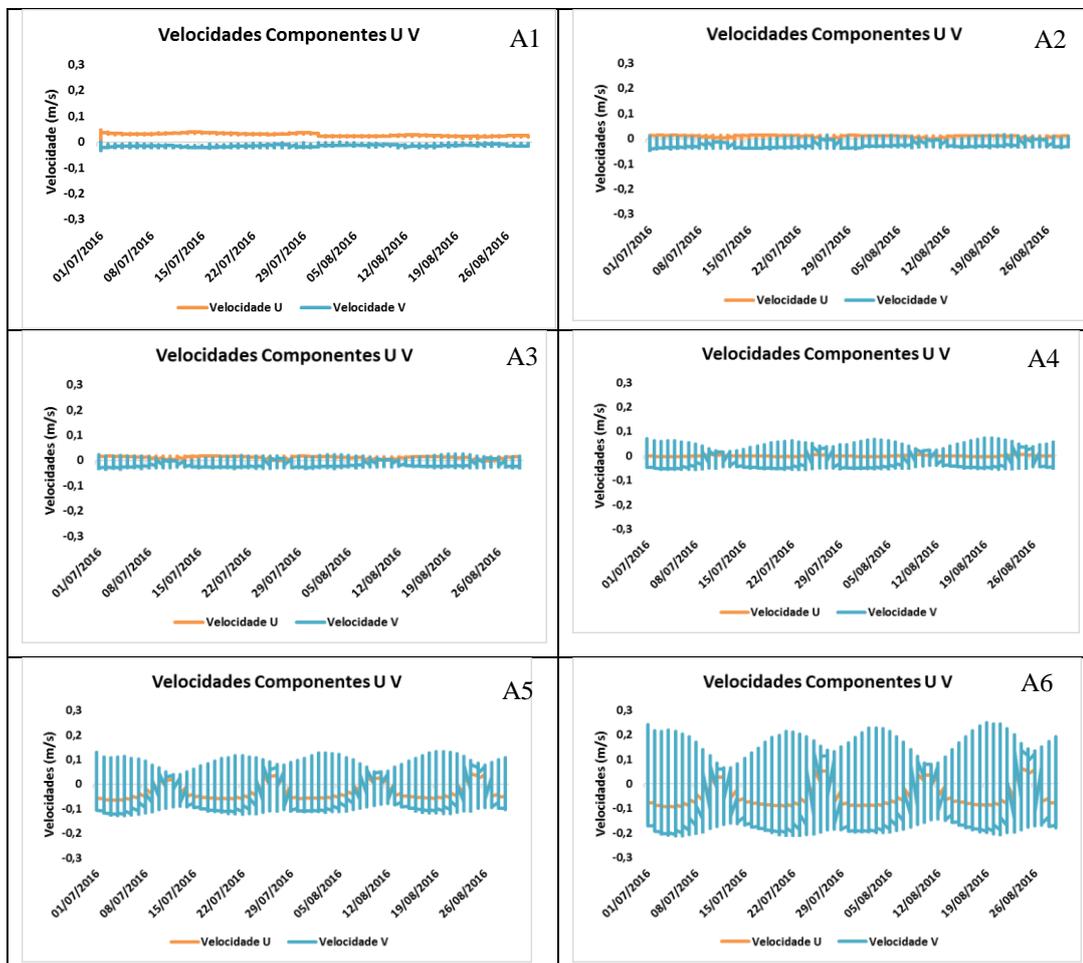
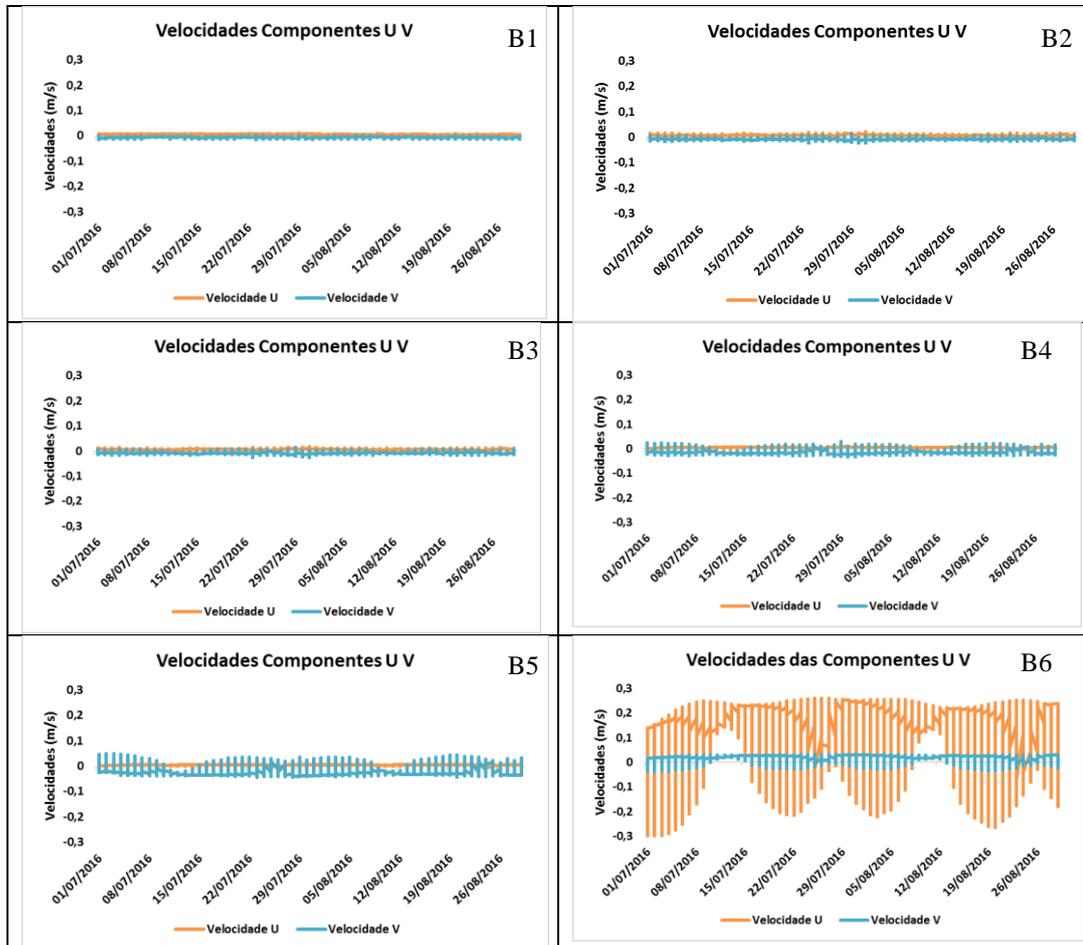
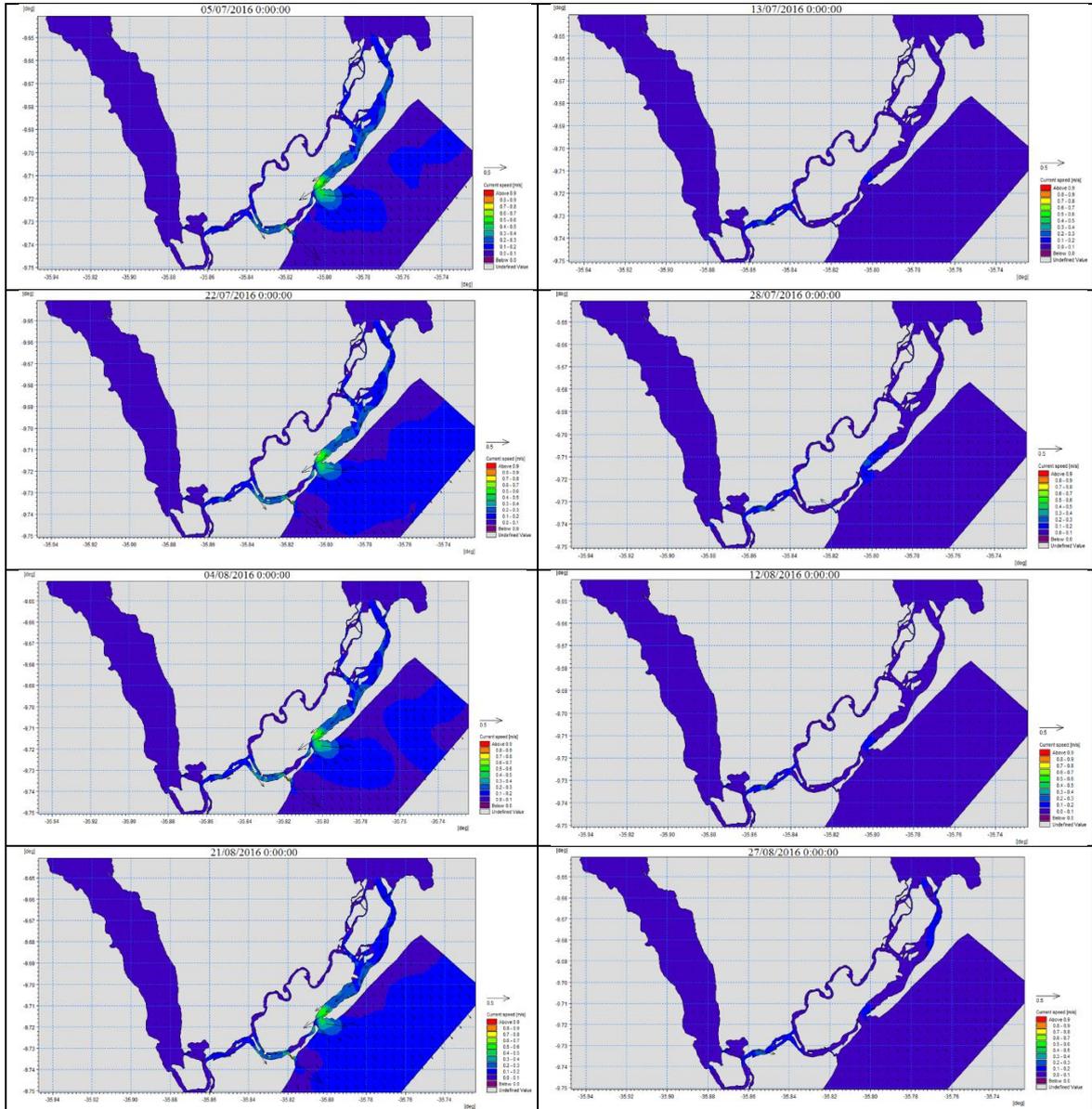


Figura 43: Dados históricos de velocidade das componentes u e v da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.



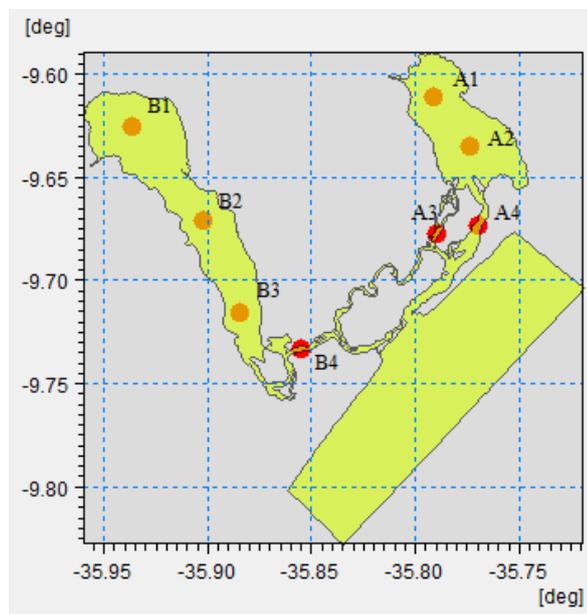
Os mapas de velocidade das correntes simulados com os dados históricos são apresentados para os períodos de maré de sizígia (parte esquerda) e quadratura (parte direita) durante os meses de junho e agosto de 2016 (Figura 44). Observa-se que a circulação no interior das lagunas é muito limitada, devido principalmente, ao atrito gerado pelos contornos dos canais durante a passagem das correntes, confirmado pelos baixos valores de velocidade máximas em torno de 0,02 m/s nas regiões mais ao Sul e nos canais mais internos das lagunas, enquanto que dentro dos canais onde ocorre o intercâmbio de massa de água com a região costeira, há uma maior intensidade das correntes com valores alcançando 0,5 m/s, durante principalmente a maré de vazante.

Figura 44: Mapas de velocidade e direção das correntes com dados históricos no complexo estuarino lagunar Mundaú Manguaba.



Para melhor análise, selecionamos 8 estações (Figura 45) localizados no CELMM para a extração de dados de elevação e velocidade das correntes equivalente aos locais representados por A1, A2, A3 e A4 (Mundaú); B1, B2, B3 e B4 (Manguaba).

Figura 45: Localização da extração dos dados históricos das correntes distribuídos espacialmente em 8 pontos no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



Nas figuras 46 e 47 são apresentadas as elevações de maré equivalentes as estações representadas por A1, A2, A3, A4 (Mundaú); B1, B2, B3, B4 (Manguaba). Nos locais da região interna da laguna Mundaú (Figura 46 A1-A2), a altura máxima das oscilações da maré atingiram 0,65 m com amplitudes de 0,37 m, enquanto que nas estações localizadas nos canais de interação com o mar (Figura 46 A3-A4) esse valor aumenta 0,05 m alcançando 0,7 m em marés de sizígia com amplitude de 0,5 m. Segundo Oliveira e Kjerfve (1993) a amplitude média das marés oceânicas fica reduzida a 36% quando entra nos canais, decaindo para 14% dentro da laguna Mundaú e 2% dentro da laguna Manguaba. Os canais de ligação com a região costeira são irregulares, possuindo áreas mais estreitas e em sua formação possuem baixa eficiência na comunicação entre as lagoas e o mar, demonstrado pela redução da amplitude da maré no interior das lagoas (PAES-LEME et al, 2011).

Para a laguna Manguaba, as estações B1, B2 e B3 localizadas no interior do ambiente lagunar apresentaram uma distância entre as preamares e baixa-mares com fracas oscilações indicando uma amplitude de maré 0,1 m, alcançando uma altura máxima de 0,7 m, na estação B4 houve maiores flutuações com altura de 0,72 m e amplitude máxima de maré 0,4 m.

Figura 46: Dados históricos de elevação das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.

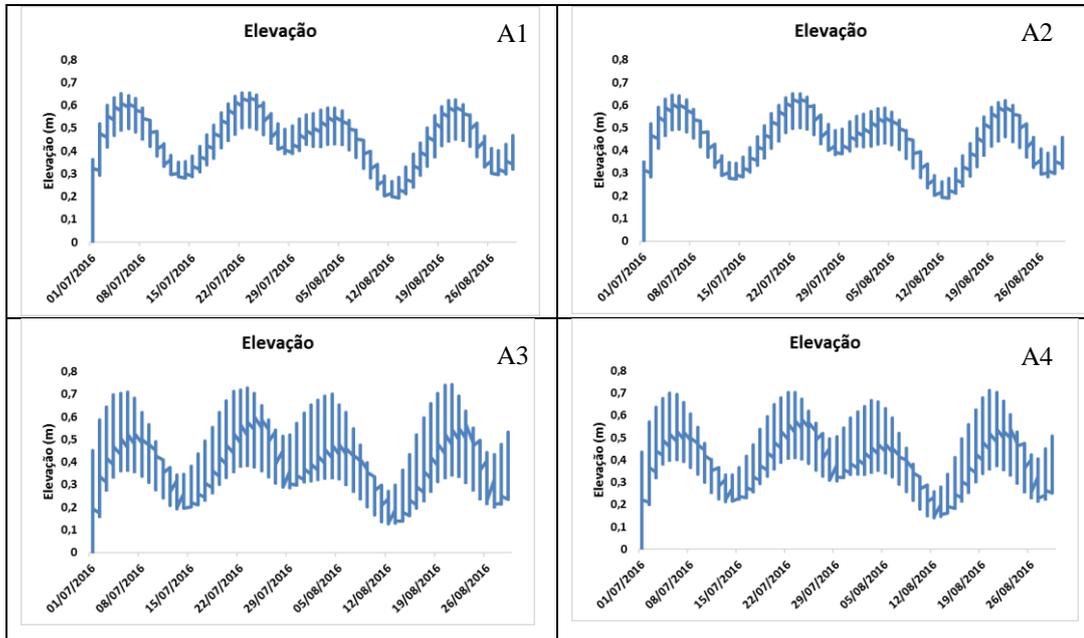
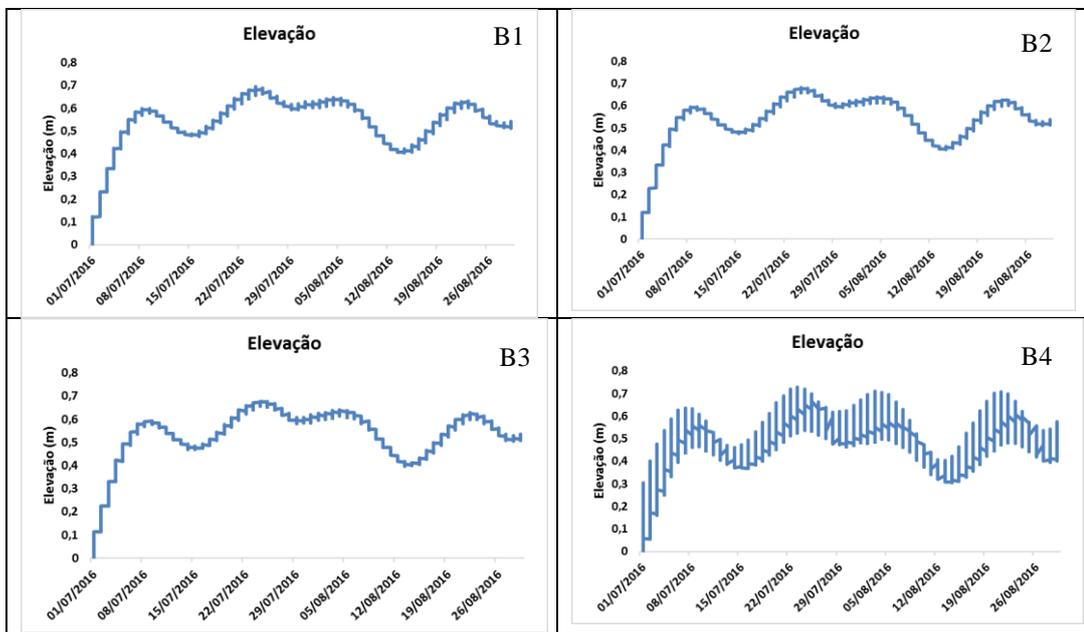


Figura 47: Dados históricos de elevação das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



De acordo com os padrões de velocidades das correntes para locais selecionados das lagunas Mundaú (Figura 48) e Manguaba (Figura 49) observa-se que nas porções internas das duas lagunas existem baixas oscilações das correntes, exibindo variações em torno de 0 a 0,05 m/s para Mundaú (Figura 48 A1-A2), e 0 a 0,04 m/s para Manguaba (Figura 49 B1-B3). Dentro

das lagunas, os valores máximos ocorreram nas estações A1 com 0,05 m/s, resultado do intenso aporte da descarga fluvial, e nas proximidades do canal de ligação com o mar a estação B3, registou 0,04 m/s. Para as estações localizadas nos canais internos, a intensidade das correntes alcançaram valores de 0,31 m/s na laguna Manguaba localizado na estação B4 e 0,28 m/s na estação A4 na laguna Mundaú. Paes-Leme et al, (2011) utilizando o modelo Mike 21, a partir de dados de 1984 no CELMM, identificou correntes em torno de 0,4 m/s no interior dos canais. Tais resultados estão em concordância com os valores obtidos no presente estudo, e mostra que, de acordo com os cenários adotados por Paes-Leme R. B. (2011), assumindo-se -2 m de dragagem nos canais principais, é possível aumentar cerca 0,20 m/s as velocidades das correntes nos canais, as amplitudes de maré ocasionando uma maior contribuição nas trocas de água entre as lagunas e o mar.

Figura 48: Dados históricos de velocidades das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.

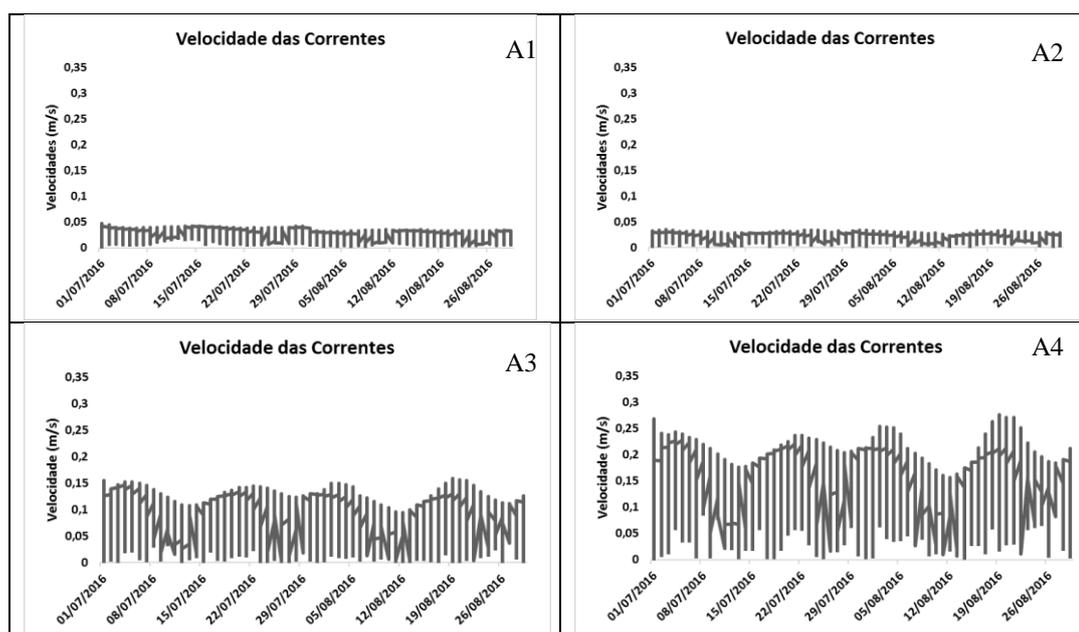
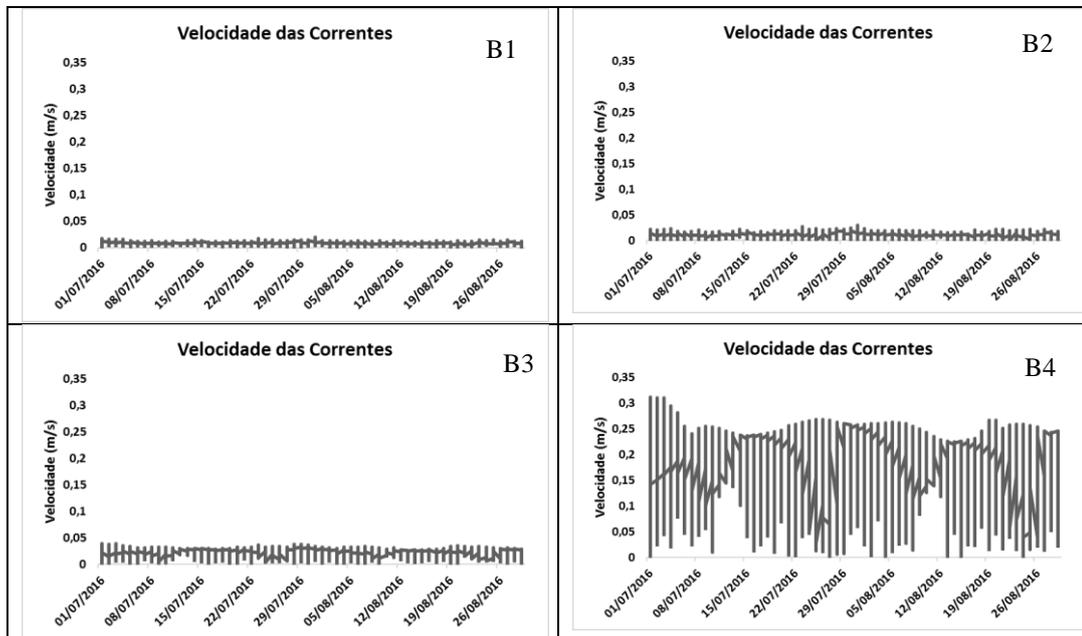


Figura 49: Dados históricos de velocidades das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



6.4 Tempo de residência com dados observados de vazão

O resultado da modelagem com dados reais (Figura 50) mostrou que nos primeiros dias as lagunas Mundaú e Manguaba não tiveram o mesmo desempenho comparado com os dados históricos, apresentando, de forma geral, um maior tempo de residência em todos os setores das lagunas. Os resultados revelaram que os padrões de vazões reais para os meses de julho e agosto de 2016, abaixo do normal climatológica, são fatores importantes para a eficiência da renovação das águas dentro das lagunas Mundaú e Manguaba. A laguna Mundaú iniciou uma rápida redução da concentração inicial do traçador próximo da área onde atua a descarga fluvial, atingindo valores em torno de 0% a partir de 4 dias de simulação (Figura 50 D-F) diferente da Manguaba onde necessitou de 4 semanas para atingir concentrações na mesma ordem apresentando níveis altos e pequenas oscilações na parte inferior da sua extensão.

A análise dos mapas da distribuição de concentração do traçador com intervalo de 5 dias (Figura 51), mostrou que após 20 dias de simulação (Figura 51 D), a laguna Mundaú alcançou concentrações em torno de 37% em 52% da área total, foram necessárias 6 semanas para a renovação completa na Mundaú (Figura 51 H), apresentando níveis no qual não ultrapassa os limites máximos permissíveis para a qualidade da água, devido aos dias excessivos para alcançar valores equivalentes ao padrão da qualidade da água, sugere que a laguna Mundaú

apresentou potencial para problemas futuros no seu ambiente, principalmente nas áreas a leste da região costeira da laguna e ao sul da sua extensão. Por outro lado, a laguna Manguaba mostrou-se mais ineficiente para renovar suas águas, indicando valores de concentração em torno de 100% mesmo após 40 dias de simulação (Figura 51 H). Este padrão de tempo de renovação de água, revela a dificuldade para eliminar substâncias inseridas neste sistema, o que sugere que há potencial para problemas na qualidade de água dentro desse ambiente.

Figura 50: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados reais durante os primeiros dias.

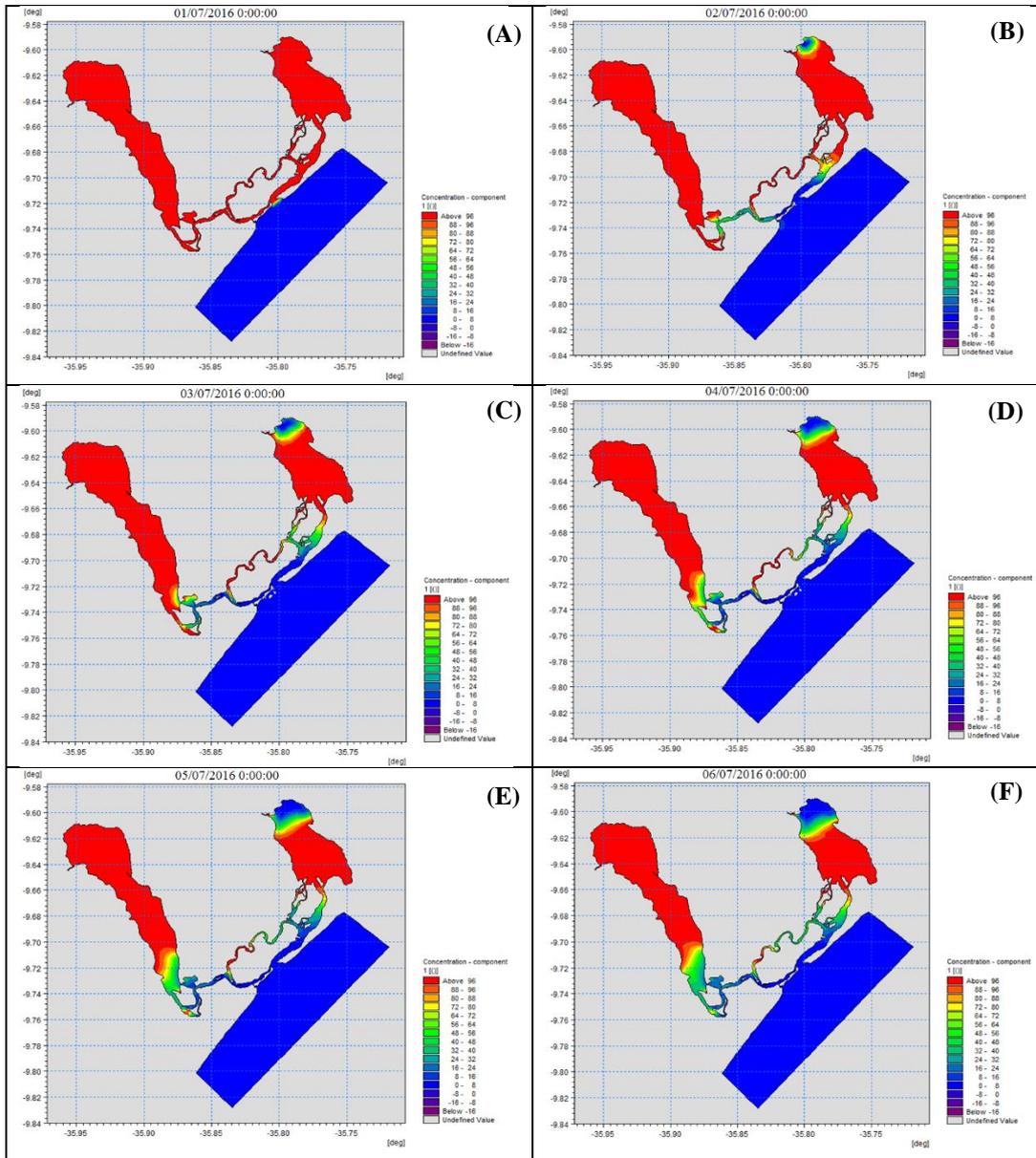
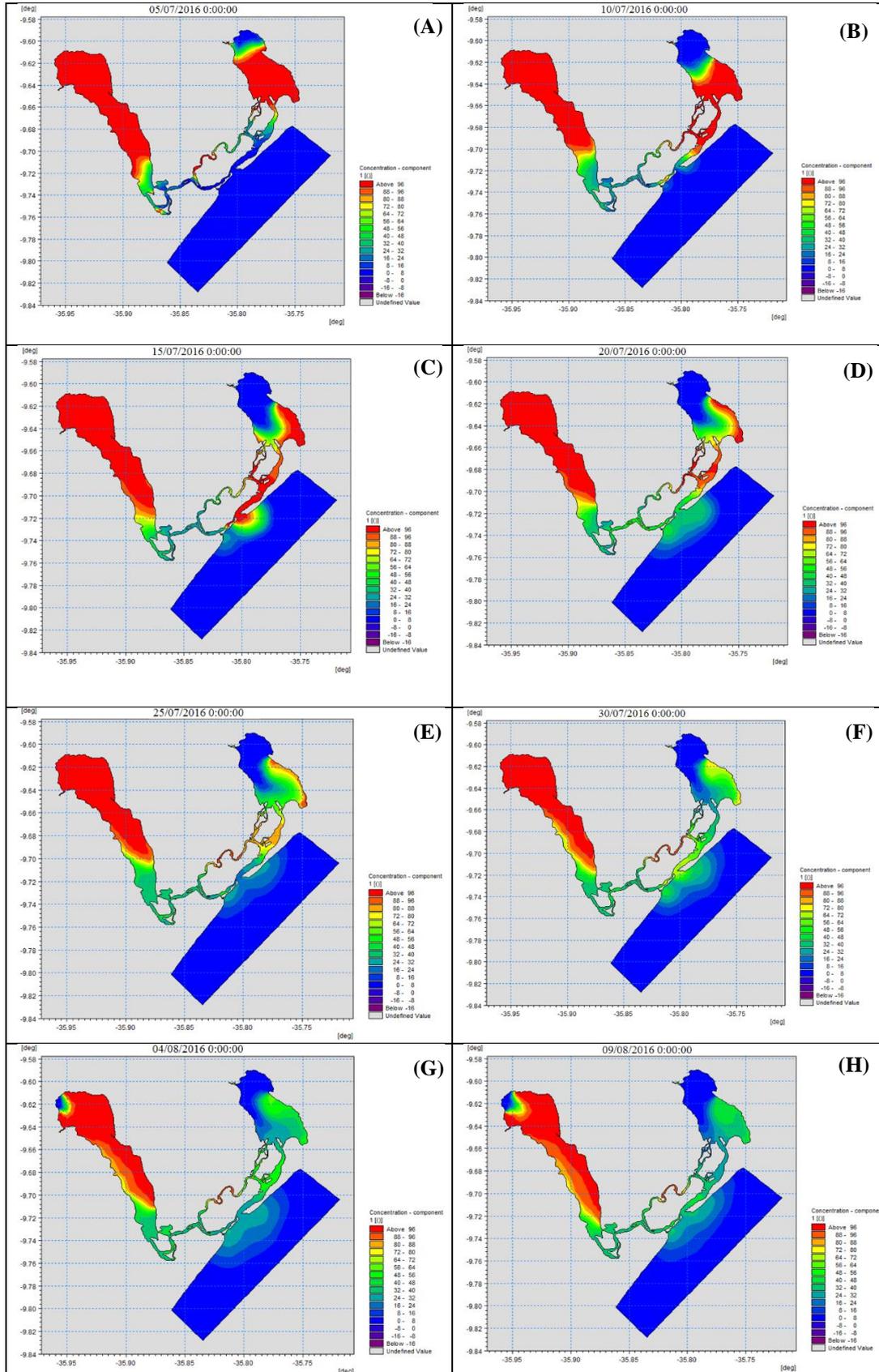
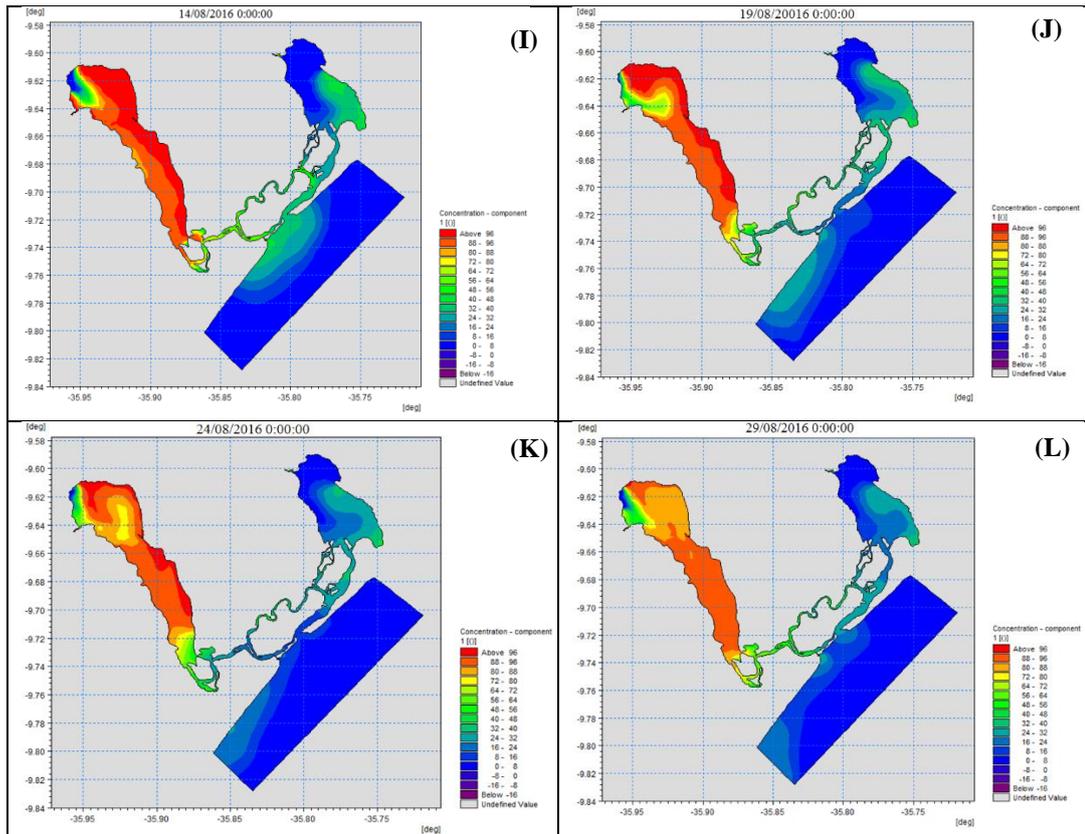


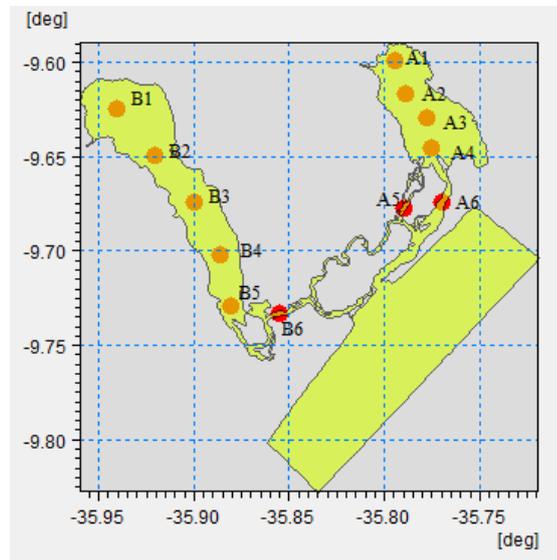
Figura 51: Mapas da distribuição de concentração do traçador calculado para o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú Manguaba com dados reais a cada 5 dias.





A seguir é mostrado as localizações de 12 estações selecionados no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (Figura 52) para a extração de dados de concentração e de velocidades das componentes u e v , simulados a partir do modelo Mike 21, e representadas pelas letras A1, A2, A3, A4, A5, A6 (Mundaú); B1, B2, B3, B4, B5 e B6 (Manguaba). Os mapas das velocidades das componentes u e v são descritas no item 6.5 em variabilidade das correntes com dados observados de vazão.

Figura 52: Localização da extração dos dados reais de concentração e de velocidades das componentes u e v no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação A2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação A3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação A4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação A5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A6: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação B2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação B3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação B4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação B5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação B6: Lat. -9.733; Long. -35.855.



De acordo com os dados extraídos no interior da laguna Mundaú, é possível identificar uma maior eficiência na taxa de concentração da água, nas estações próximas das desembocaduras do rio Mundaú (Figura 53 A1-A3). Para a estação A1 observou-se que o tempo para a concentração do traçador alcançar 37% foi de apenas 2 dias, aumentando gradativamente nas estações a jusante do ponto de descarga. Nas estações A2, A3 e A4 obtivemos tempos entre 7, 12 e 24 dias, respectivamente para concentrações de níveis 37%. Nas regiões dentro dos canais internos, o intercâmbio entre as massas de água estuarinas indicou um comportamento de forte oscilação nas concentrações do traçador, variando entre 100 e 22 %, sendo necessário 36 dias para atingir valores em torno de 37%. Tais variações podem ser atribuídas a baixa intensidade das correntes internas, devido ao afunilamento dos canais e do processo de assoreamento nas regiões (SOUZA, 2017).

No interior da laguna Manguaba, representada pelas estações B1, B2, B3 e B4 (Figura 54), é evidente a baixa eficiência desta laguna para renovar as massas de água do seu interior. Em geral, as concentrações do traçador em torno de 90% permaneceram presentes no sistema por mais de 40 dias, sugerindo um alto potencial para problemas ligados à qualidade da água. Nos 2 meses de simulação, as concentrações não alcançaram o mínimo possível de 37%, padrão estabelecido para avaliar o grau de eficiência para o tempo de renovação (PILOTTI et al, 2014). Os demais locais, B5 e B6, próximos ao canal interno e dentro do canal de ligação com a região

costeira, apresentara, maiores flutuações, principalmente na estação B6, variando entre 45% a 10% em quase todo período de simulação.

Figura 53: Dados reais de concentração da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789; estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.

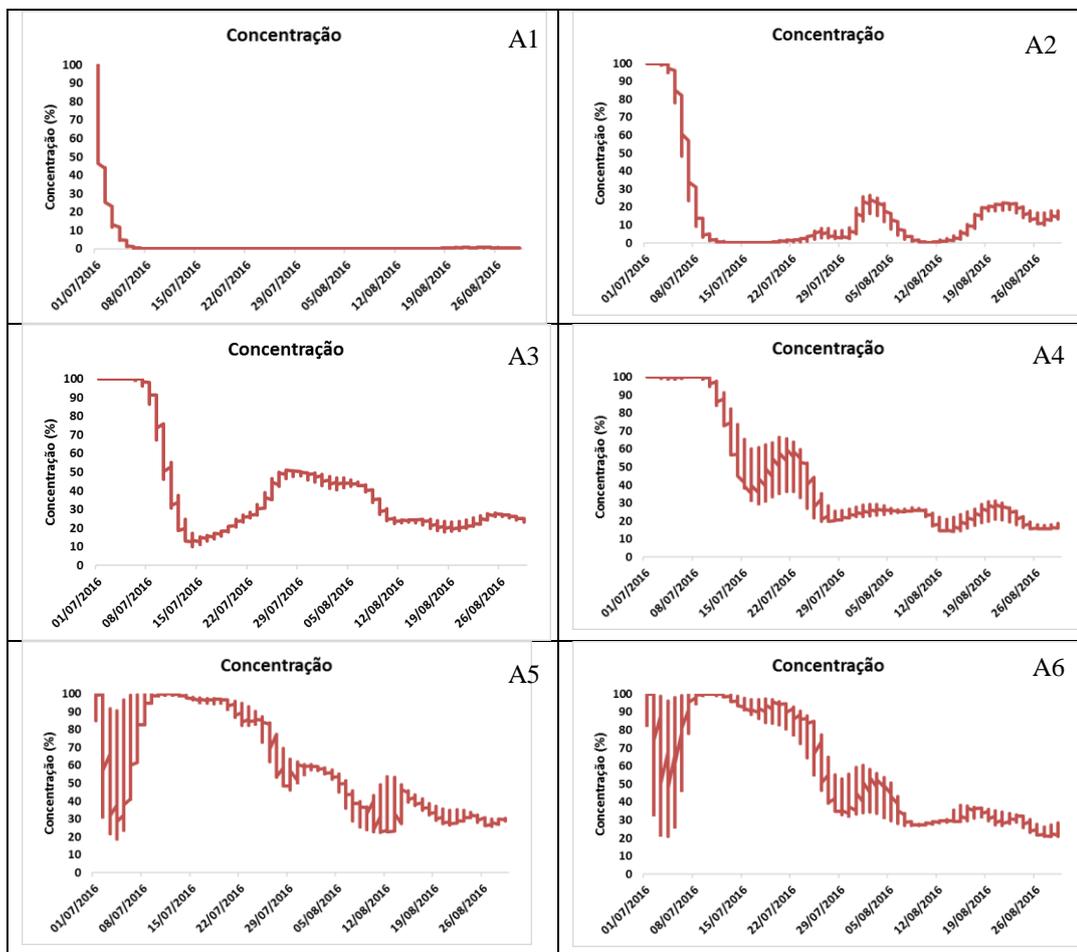
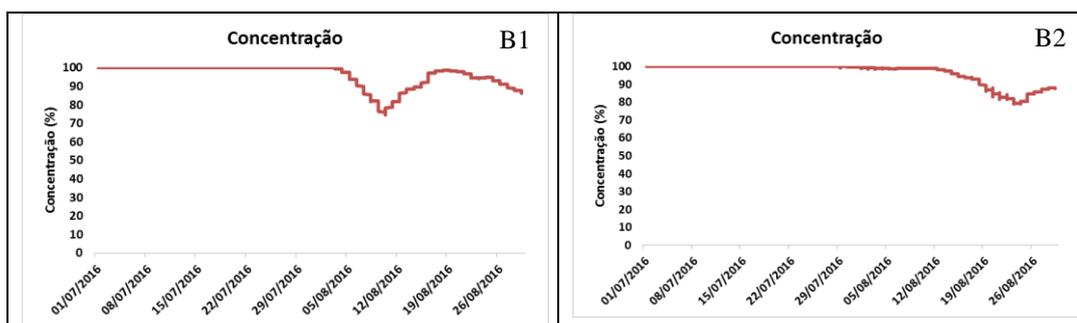
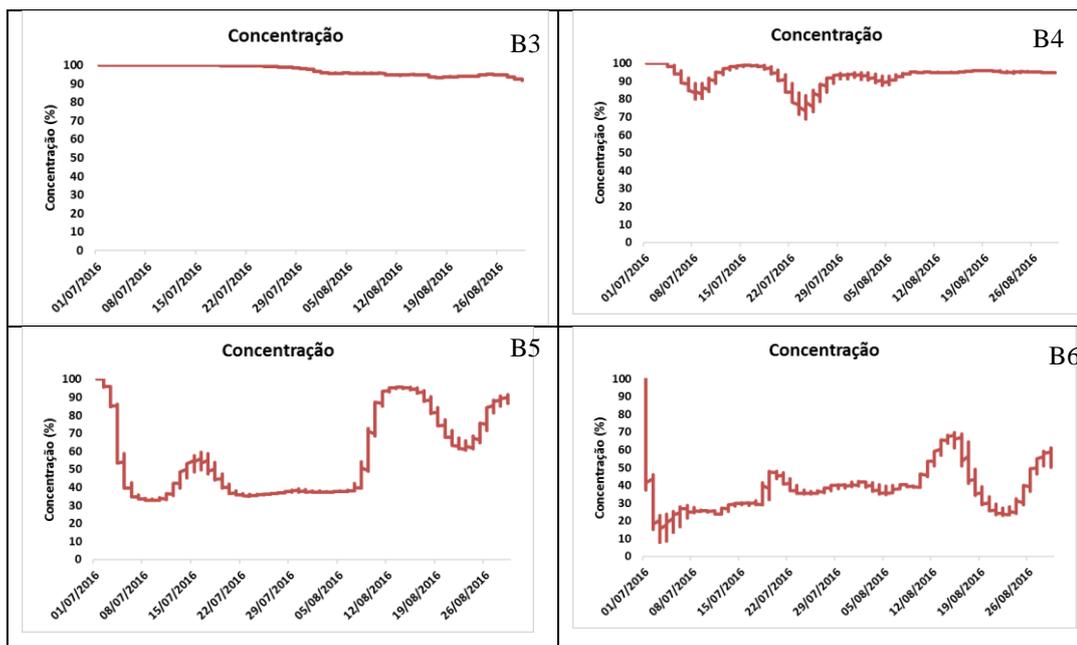


Figura 54: Dados reais de concentração da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.





6.5 Correntes com dados observados de vazão

De acordo com as series temporais das componentes u e v de velocidade na laguna Mundaú descritas na figura 55 em estações distribuídas de acordo com o item 6.4, observa-se padrões similares na intensidade das correntes em todas as estações, onde a componente transversal (v), desempenha papel mais importante para o transporte de material dentro desta laguna, similar ao encontrado através das simulações numérica com os dados históricos . Os valores da componente v indicou maiores oscilações nas estações localizadas nos canais de acesso ao ambiente marinho, com valores de -0,1 a 0,16 e -0,18 a 0,29 m/s nas estações A5 e A6, respectivamente. Na laguna Manguaba (Figura 56), as estações B1, B2, B3 foram bem semelhantes e apresentaram valores praticamente nulos indicando nenhuma predominância das componentes u e v . As estações B4 e B5 mostraram maiores flutuações da componente transversal (v) diferente do último local de coleta da laguna Manguaba onde a principal componente foi ao longo do canal (u) com valores de -0,32 a 0,2 m/s.

Figura 55: Dados reais de velocidade das componentes u e v da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.599; Long. -35.794; estação 2: Lat. -9.616; Long. -35.789;

estação 3: Lat. -9.629; Long. -35.778; estação 4: Lat. -9.645; Long. -35.775; estação 5: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação 6: Lat. -9.674; Long. -35.770.

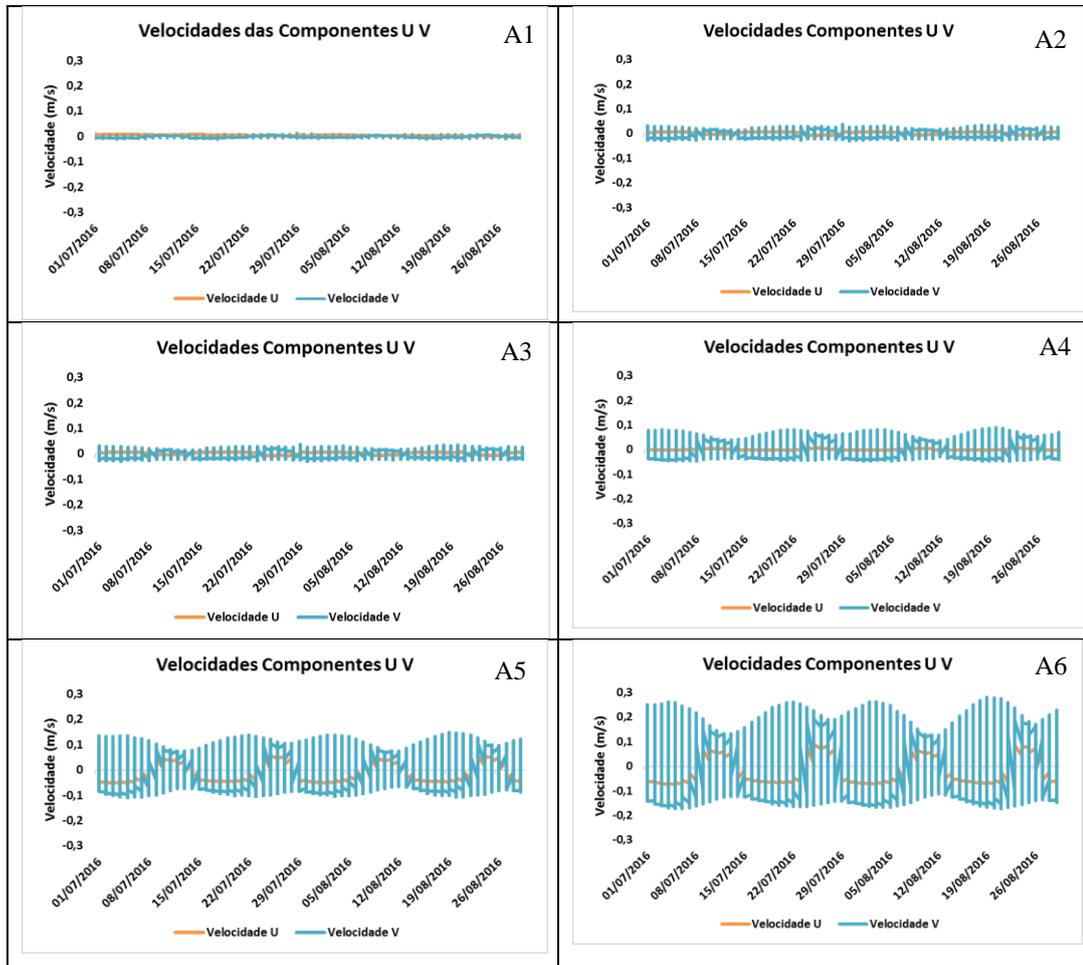
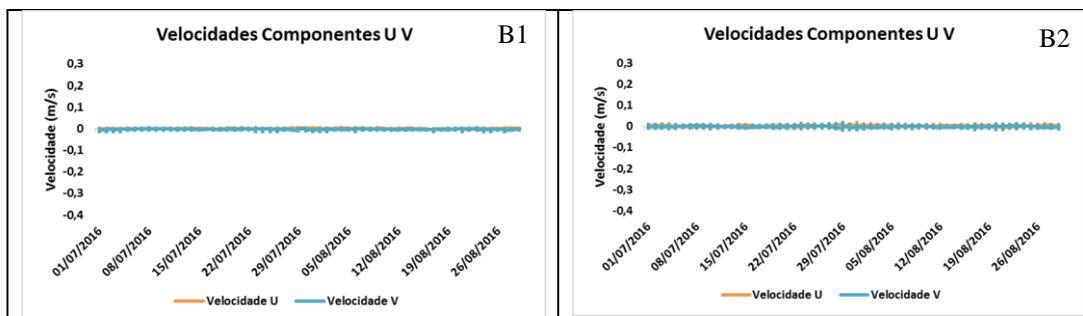
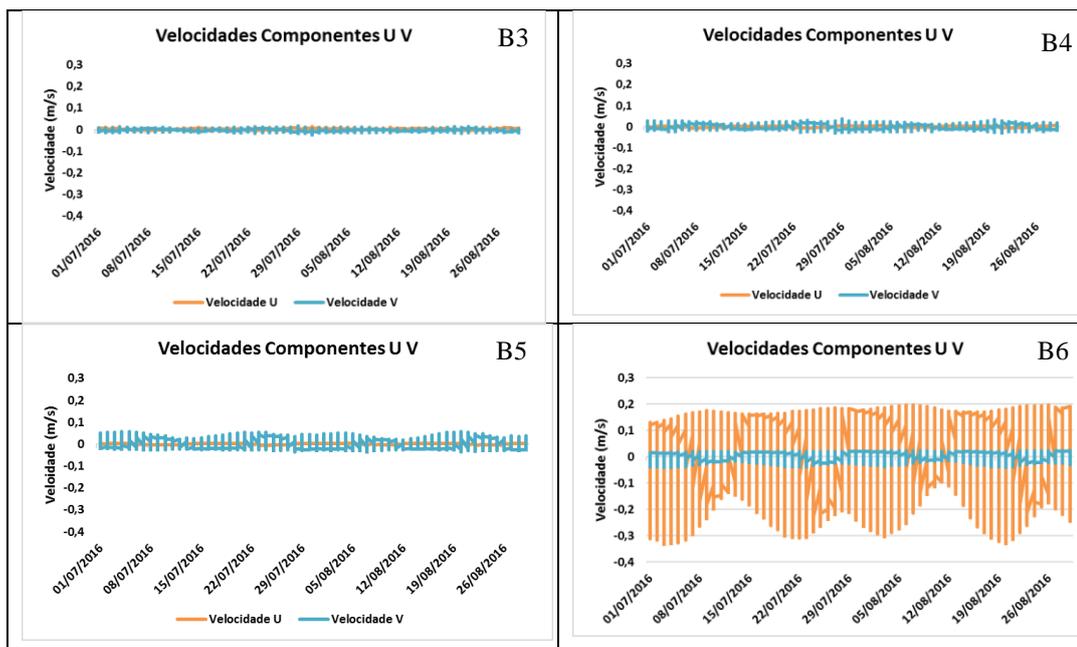


Figura 56: Dados reais de velocidade das componentes U e V da laguna Manguaba e canal de ligação distribuídos espacialmente em 6 estações. Estação 1: Lat. -9.624; Long. -35.940; estação 2: Lat. -9.649; Long. -35.921; estação 3: Lat. -9.675; Long. -35.900; estação 4: Lat. -9.702; Long. -35.886; estação 5: Lat. -9.730; Long. -35.880; estação 6: Lat. -9.733; Long. -35.855.

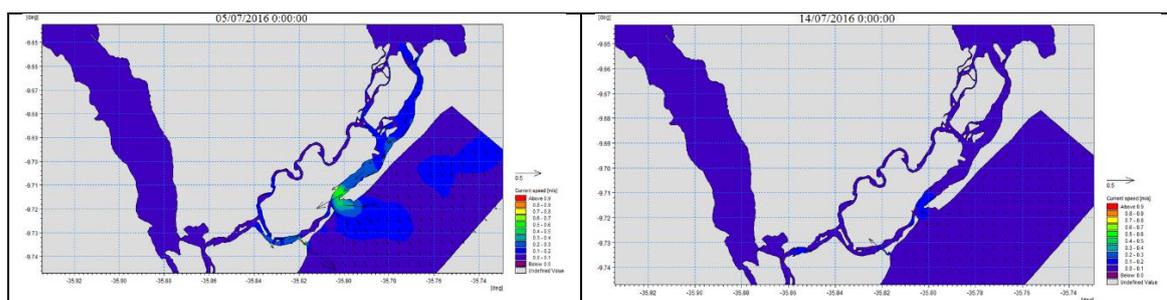




Os mapas de velocidade das correntes simulados com os dados observados de vazão são descritos para os períodos de maré de sizígia (parte esquerda) e quadratura (parte direita), de acordo com os meses de julho e agosto (Figura 57). Para a laguna Mundaú, os valores máximos de corrente foram observados nos períodos de maré de vazante, nas áreas próximas a desembocadura da laguna com máximos de 0,3 m/s assim como nos dados históricos . A circulação no interior das lagunas é quase nula em ambas as campanhas de maré de sizígia e quadratura, o fluxo das correntes foi mais intenso acerca da boca de entrada com as águas marinhas, variando entre 0,2 a 0,7 m/s, e principalmente no estreito canal próximo a laguna Manguaba atingindo cerca de 0,8 m/s.

Para uma análise detalhada, selecionamos 8 estações localizados no CELMM (Figura 58), para a extração de dados de elevação e velocidade das correntes, representadas pelas estações A1, A2, A3 e A4 (Mundaú); B1, B2, B3 e B4 (Manguaba).

Figura 57: Mapas de velocidade e direção das correntes com dados reais no complexo estuarino lagunar Mundaú Manguaba.



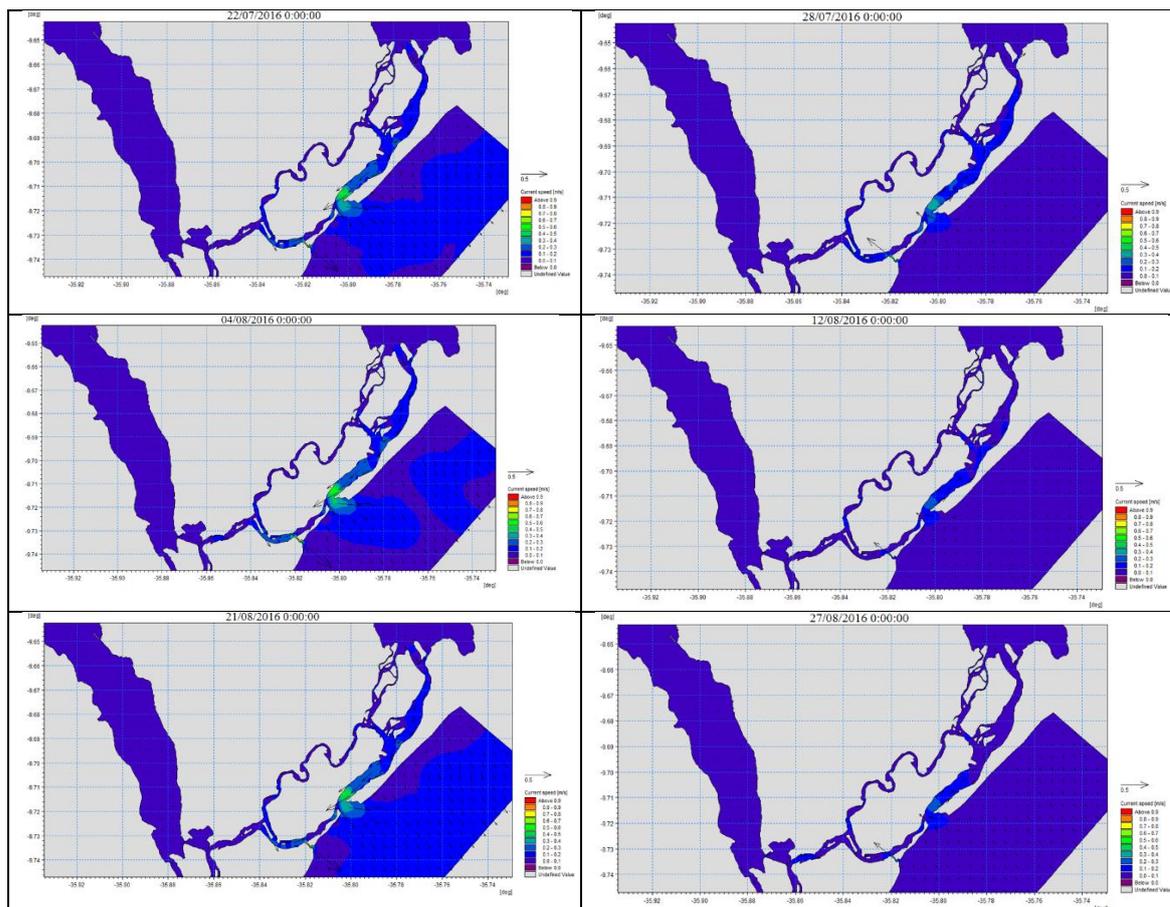
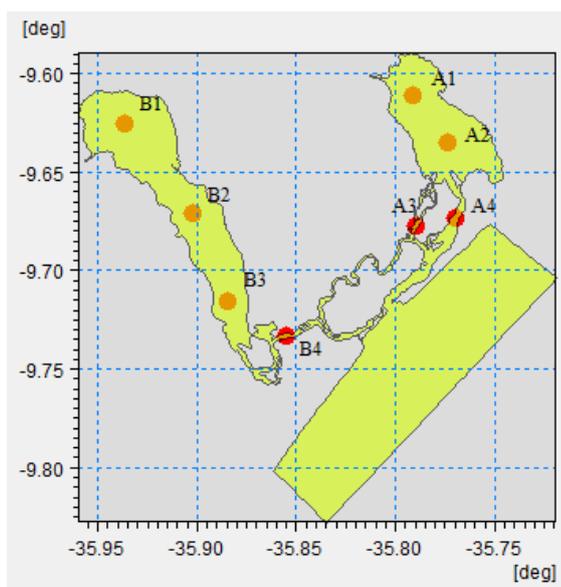


Figura 58: Localização da extração dos dados reais das correntes distribuídos espacialmente em 8 estações no CELMM. Laguna Mundaú: estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770. Laguna Manguaba: estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



Nas figuras 59 e 60 são apresentadas as elevações de maré equivalentes as estações A1, A2, A3, A4 (Mundaú); B1, B2, B3, B4 (Manguaba). Dentro da laguna Mundaú (Figura 59 A1-

A2) as elevações da maré atingiram 0,42 m durante o período de maré de sizígia com amplitude máxima de 0,34 m e nos canais de ligação com o mar, representado pelas estações A3 e A4, observou-se valores máximos em torno de 0,60 m durante a maré de sizígia. Em comparação com as simulações realizadas, tendo como forçantes os dados históricos de vazão, os valores das elevações das marés com dados observados de vazão foram inferiores. Assim como os dados históricos de elevação da maré, as estações localizadas no interior da laguna Manguaba (Figura 60) B1, B2 e B3 não apresentaram grandes oscilações de acordo com as preamares e baixa-mares, as amplitudes máximas atingiram valores acerca de 0,17 m. A estação B4 localizado próximo ao canal de ligação com o mar mostrou uma altura máxima de 0,51 m com amplitude máxima de 0,42 m.

Figura 59: Dados reais de elevação das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estações A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.

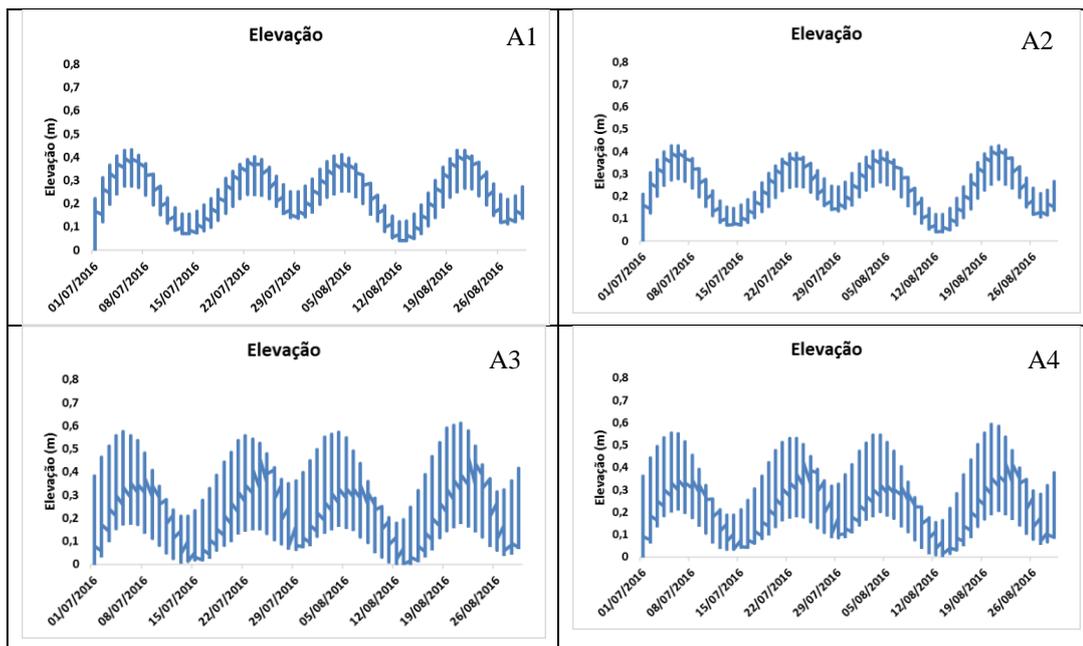
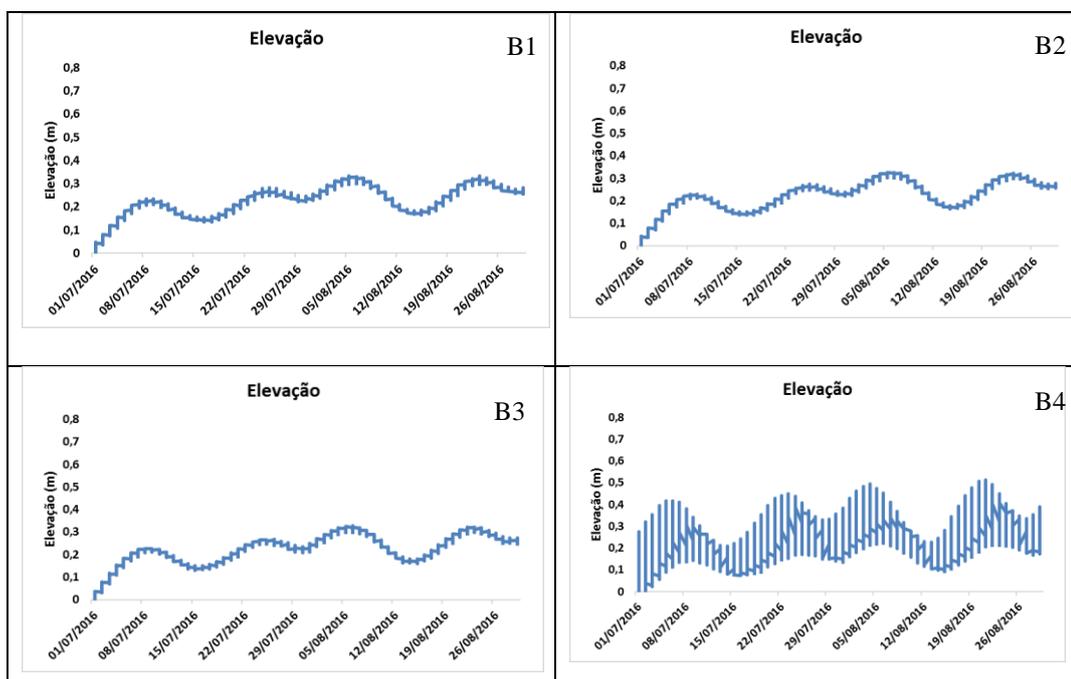


Figura 60: Dados reais de elevação das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. - 9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



As velocidades das correntes para os locais de extração dos dados dentro das lagunas Mundaú (Figura 61) e Manguaba (Figura 62), mostraram que no interior de ambas as lagunas, as correntes variam com pouca intensidade, apenas atingindo valores abaixo de 0,05 m/s nas regiões A1, A2, B1, B2 e B3 (Figuras 61, 62). De acordo com as regiões internas, os valores máximos ocorreram na estação A2 com 0,04 m/s, diretamente ligada à proximidade com a descarga fluvial, e no extremo final da laguna Manguaba, estação B3, por estar no canal de ligação com as águas costeiras, tendo o valor máximo de 0,05 m/s. As estações A3 e A4, que representam os canais da laguna Mundaú apresentaram picos de velocidades de 0,17 e 0,32 m/s e para a Manguaba, a região com maior pico de corrente foi dentro do canal principal, estação B4, alcançando 0,32 m/s.

Figura 61: Dados reais de velocidades das correntes da laguna Mundaú e canais de ligação distribuídos espacialmente em 4 estações. Estação A1: Lat. -9.611; Long. -35.791; estação A2: Lat. -9.635; Long. -35.774; estação A3: Lat. -9.677; Long. -35.790; estação A4: Lat. -9.674; Long. -35.770.

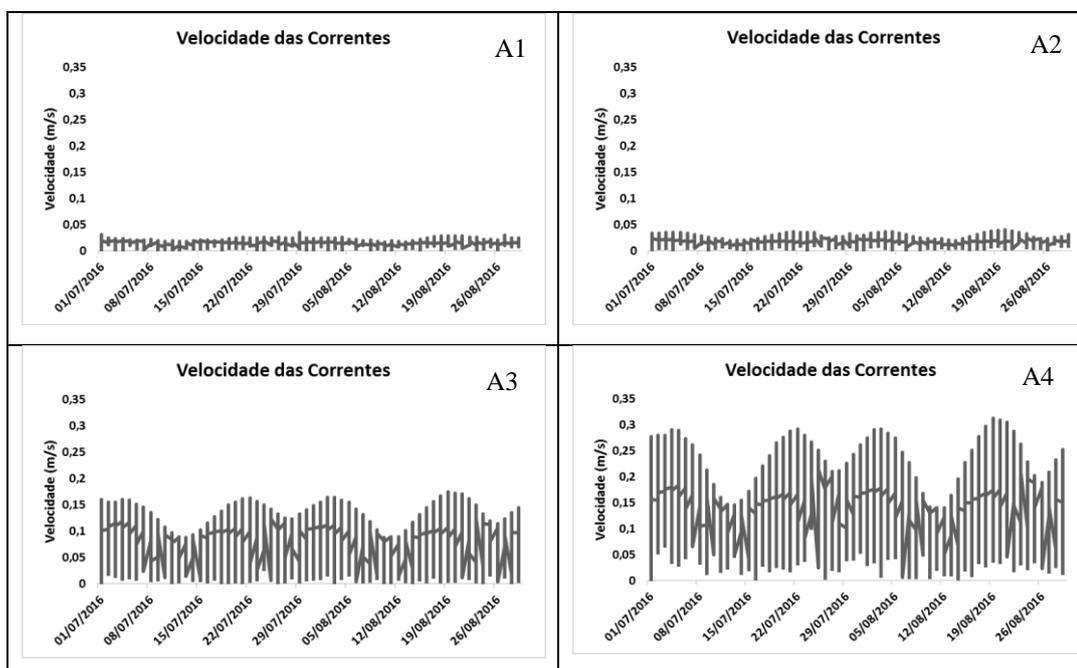
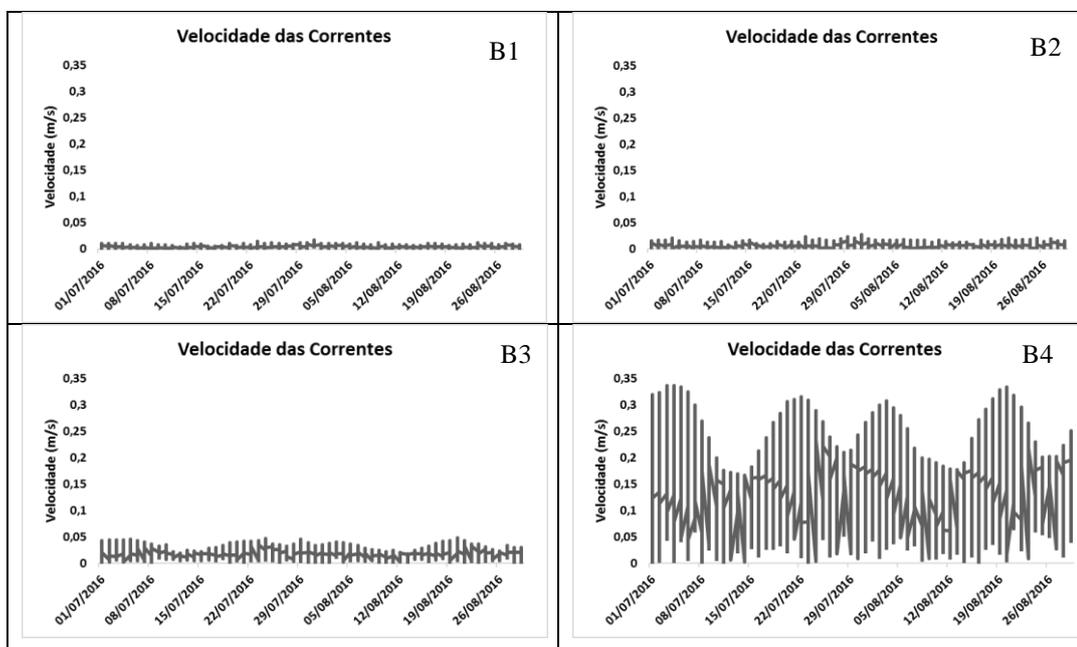


Figura 62: Dados reais de velocidades das correntes da laguna Manguaba e canal de ligação. Estação B1: Lat. -9.625; Long. -35.937; estação B2: Lat. -9.671; Long. -35.902; estação B3: Lat. -9.716; Long. -35.884; estação B4: Lat. -9.733; Long. -35.855.



7. Conclusão

A distribuição espacial dos tempos de residência na região do CELMM mostrou ser coerente de acordo com outros trabalhos, indicando que a metodologia pode ser aplicada com confiabilidade. O conhecimento do padrão do tempo de residência no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba é de extrema importância e pode ser adaptado em programas de gerenciamento costeiro, pois está intimamente relacionado com impactos ambientais, dentre eles lançamentos de efluentes em vários pontos das lagoas.

A circulação nas áreas internas das lagoas mostrou limitações em decorrência aos estreitos e irregulares canais de ligação com a região oceânica, indicando limitada comunicação entre as lagoas, e reduções nas amplitudes da maré, refletindo em velocidades das correntes quase nulas no interior do CELMM. As máximas velocidades das correntes foram encontradas nas regiões próximas às desembocaduras e em períodos de maré de vazante.

Os resultados mostraram que o CELMM é fortemente influenciado pela descarga fluvial dos seus rios principais, rio Mundaú e Paraíba do Meio, o que ocasionou uma diminuição no tempo de residência nas simulações com vazões históricos 1978 - 2016. A combinação de um ambiente raso e uma forte e constante descarga fluvial resultou em um tempo de residência de 14 dias para laguna Mundaú e 30 dias a Manguaba.

As regiões mais suscetíveis à problemas de qualidade de água na laguna Mundaú estão próximas as margens, ao leste da Mundaú onde está localizado os bairros de Bebedouro, Mutange e Bom Parto. Entretanto, a laguna Manguaba mostrou elevados tempos de renovação, sugerindo que toda a sua extensão, principalmente as margens, ao norte da laguna, está susceptível à problemas ligados à qualidade da água.

As simulações com vazões reais, ou seja, a baixa descarga fluvial, retardou o tempo de residência de ambas as lagoas. Os 2 meses de simulações para a Manguaba não foram suficientes para alcançar níveis de 37% da concentração do traçador, sugerindo possíveis problemas na qualidade da água. Por outro lado, a laguna Mundaú necessitou de 6 semanas para uma completa renovação.

Como recomendação para trabalhos futuros se faz necessário a realização de um novo levantamento batimétrico no CELMM, principalmente na laguna Manguaba, já que a região é muito dinâmica e em 30 anos ocorrem muitas variações.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA/MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM)**, 2006. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil**. Brasília, DF, 2005.
- ALBANO, G.D. 2004. **Integração de um Modelo Matemático de Quantidade de Água em Rede de Fluxo (ACQUANET) com um Modelo Matemático de Qualidade de Água em Represas (CE-QUAL-R1) – Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí, Sistema Cantareira**. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento – USP, São Paulo, Brasil. 2004.
- ALVES A. R.; WALSSEMAN J. C., **Estudo da variabilidade espaço-temporal do tempo de residência para o sistema lagunar de Saquarema-RJ**. Mundo & Vida: Alternativas em Estudos Ambientais. 2002.
- AMANTE, C.; EAKINS, B.W. **ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis**. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi: 10.7289/V5C8276M. 2009.
- AMBROSETTI, W.; BARBANTI, L.; SALA, N. **Residence time and physical processes in lakes**. Journal of Limnology. v.67, p. 1-15, 2003.
- BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; CHAMBEL, P.; NEVES, R. **A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case**. Portugal, 2001.
- CAMERON, W. M & PRITCHARD, D.W. (1963). In: MIRANDA, Luiz Bruner de; Castro, Belmiro Mendes de; KJERFVE, Björn (2002). **Princípio de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2002. Página 34.
- CAVALCANTE, G. H.; BJÖRN KJERFVE; FEARY, D. A. **Examination of residence time and its relevance to water quality within a coastal mega-structure: The palm jumeirah lagoon**. Journal of Hydrology, vol. 468–469, pp. 111 – 119, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169412007068>
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI), 2007, MIKE21 – **Scientific Documentation**. Disponível em: <<http://www.dhigroup.com>>. Acesso em 11 de janeiro. 2017, 15:28:56.
- DAME, R.; ALBER, M.; ALLEN, D.; MALLIN, M.; MONTAGUE, C.; LEWITUS, A CHALMERS, A.; GARDNER, R.; GILMAN, C.; KJERFVE, B.; PINCKNEY, J.; SMITH, N. **Estuaries of the South atlantic coast of north américa: Their geographical signatures**. Estuaries, 2000, v 23, n 6, p, 793-819.
- DAY JUNIOR, J. W. et al. **Estuarine ecology**. New York: J; Wiley, 555 p. 1989.
- DIAS, R. A. **Salinidade, Temperatura, Oxigênio Dissolvido e Descarga Fluvial do Estuário da Lagoa dos Patos**. 2002. 42fls. Monografia para conclusão do curso de Oceanologia. Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, RS. 2002.

- DIEGUES, A. C. **Costa do Brasil: áreas úmidas costeiras e litorâneas**. *Jornal do Meio Ambiente*. 1994. 31 p. www.jornaldomeioambiente.com.br. Ecossistemas Costeiros. FURG. Rio Grande-RS. 1994.
- DYER, K. R., **Estuaries: A Physical Introduction**. 2nd. Baffins Lane, Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 140p. 1997.
- FAIRBRIDGE, R. W. **The Estuary: its Definition and Geodynamic Cycle**. In: *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, E. Olausson & I. Cato (Eds.) p1-35, Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York. 1980.
- GAMA, N. A. et al. **Aspectos geoambientais das áreas urbanas dos municípios ao longo do rio paraíba**. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 58., 2006, Florianópolis. Anais eletrônicos... São Paulo: SBPC/UFSC, 2006. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/58ra>.
- GORDON, R. L. **Acoustic Doppler Current Profiler – Principles of Operation – A Practical Primer**. 2nd ed. RD Instruments, San Diego, USA. 54pp. 1996.
- HASSAN, A. E. **Validation of numerical groundwater models used to guide decision making**. *Ground Water*, v.42, n.2, pp.277-290. 2004.
- INPH. **Instituto Nacional de Recursos Hidroviários. Relatório da segunda campanha de medições hidráulico-sedimentológicas do complexo lagunar Mundaú-Manguaba**. 1985.
- KJERFVE, B., MAGILL, K.E. **Geography and Hydrodynamic Characteristics of Shallow Coastal Lagoons**. *Marine Geology*. pp. 187-199. 1989.
- KJERFVE, B. **Coastal Lagoons**. *The World & I*. V.5, n.5, pp. 312-317. 1990.
- KNOPPERS B.; KJERFVE B.; CARMOUZE JP. **Trophic state and water turn-over time in six choked lagoon in Brazil**. *Biogeochemistry* 14:149-166. 1991.
- LARSSON, L.; NILSSON S. **Hydrodynamic Modeling of the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System, Brazil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Water Resources Engineering) - Lund University, Swedish International Development Cooperation Agency. 2014.
- LINS, R. C.; FRAGOSO, C. R.; CIRILO, J. A. **Simulações da hidrodinâmica no complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba - celmm/al**. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves/ RS. 2013.
- MACHADO, E. C. **Relatório do subprojeto estudos integrados da dinâmica bioecológica do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba**. Maceió: CIRM-UFAL, 1989.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípio de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- MAGALHÃES, E. M. **Influência Da Eutrofização Do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba, Alagoas- Brasil, Sobre A Comunidade Fitoplanctônica**. 2005, 253 f. Tese (Doutorado em Oceanografia). Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- MCGLATHERY, Karen J.; ANDERSON, Iris Cofman; TYLER, Anna Christina. **Magnitude and variability of benthic and pelagic metabolism in a temperate coastal lagoon**. *Marine ecology progress series*, v. 216, p. 1-15, 2001.

- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S.O. **Uma Revisão das chuvas no Nordeste brasileiro**, Revista Brasileira de Meteorologia- SBMET, v.17, nº01, p. 1-10, 2002.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S.O. **Dinâmica das chuvas sobre o Nordeste brasileiro**, In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. **Anais Sociedade Brasileira de Meteorologia – SBMET CL00132**, Rio de Janeiro, RJ, 1 CD-ROM, 2000.
- MONSEN, N., CLOERN, J., LUCAS, L., MONISMITH, S., **A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales**. *Limnol. Ocean.* 47, 2002, 1545–1553.
- ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 434 p. 1986.
- OLIVEIRA, R. B. P.; ACCETTA, DOMENICO; SCHILITZ, P. **Calibração de Modelo Hidrodinâmico Bidimensional de Alta Resolução do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú / Manguaba - AL: Análise Em Benefício do Desenvolvimento do Molusco Mytella Falcata (D' Orbigny, 1846)**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió. 2011.
- OLIVEIRA, A. M. & KJERFVE, B., 1993. **Environmental Response of a Tropical Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil**, South Carolina, Colombia: Academic Press Limited.
- PAES-LEME R. B.; ACCETTA D.; SCHILITZ P., **Calibração de modelo hidrodinâmico bidimensional de alta resolução do complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba – AL: análise em benefício do desenvolvimento do molusco Mytella Falcata (D’Orbigny, 1846)**, XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.
- PATGAONKAR, R. S.; VETHAMONY P.; LOKESH, K. S.; BABU, M. T. **Residence time of pollutants discharged in the Gulf of Kachchh, northwestern Arabian Sea**. *Mar. Pollut. Bull.*, V. 64, p. 1659-1666, 2012.
- PEREIRA, R. S.; NIENCHESKI, L.F.H. **Simulação do tempo de residência da Lagoa dos Patos**. XXI Congresso Latino-Americano de Hidráulica São Pedro, Estado de São Paulo. 2004.
- PILOTTI, M.; SIMONCELLI S.; VALERIO, G., **A Simple Approach To The Evaluation Of The Actual Water Renewal Time Of Natural Stratified Lakes**. *Water Resources Research*. 2014.
- PLANO DIRETOR DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBA DO MEIO – PDRH. v. 1, cap 1 p. 18- 23. 2001.
- PORTOBRÁS.INPH. **Relatório da segunda campanha de medições hidráulicas-sedimentológicas do complexo lagunar Mundaú/Manguaba**. Rio de Janeiro, 1985. (INPH-73/85. Relatório interno).
- PORTOBRÁS.INPH. **Relatório da segunda campanha de medições hidráulicas-sedimentológicas do complexo lagunar Mundaú/Manguaba**. Rio de Janeiro, 1984. (INPH-204/85. Relatório interno).
- PRITCHARD, D. W. **Estuarine Classification – A Help or Hindrance**, In: Neilson, B. J.; Kuo, A.; Brubaka, J. (Eds). **Estuarine Circulation**. 1989, pp. 1-38
- PRITCHARD, D. W. **Estuarine Circulation Patterns**. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 1955, 87:717:1-11.

- RD INSTRUMENTS. 1992. **Broad Band Acoustic Doppler Current Profiler**. [RD Instruments], San Diego, USA. 1992, 7pp.
- ROCHA, C. B. M. **Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na a Lagoa da Conceição-SC**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade de Santa Catarina. 2007.
- ROSMAN, P. C. C. **Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental**. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.
- ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., 1997, **Subsídios para Modelagem de Sistemas Estuarinos**. In: Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3, 1 ed., capítulo 3. Rio de Janeiro, Brasil, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.
- ROVERSI, F. **Estudo hidrodinâmico e de renovação das águas do sistema Estuarino de Santos**. 2012. 154 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Oceanica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012.
- SILVA, D. F. **Análise De Aspectos Históricos , Agroeconômicos, Ambientais E De Seus Efeitos Sobre A Bacia Hidrográfica Do Rio Mundaú (Al e Pe)**. 2009, 221 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2009.
- SILVA, D. F.; SOUSA, F. A. S.; KAYANO, M. T. **Avaliação dos impactos da poluição nos recursos hídricos da bacia do Rio Mundaú (AL e PE)**. Revista de Geografia v. 24, n. 3. 2007.
- SILVA, C.G.S.; PATCHINEELAM, S.M.; BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A. **Ambientes de Sedimentação Costeira e Processos Morfodinâmicos Atuantes na Linha de Costa**. In: BAPTISTA NETO, J.A.; PONZI, V.R.A.; SICHEL, S.E. (Org.) **Introdução à Geologia Marinha**. Rio de Janeiro: Interciência. Cap. 8. p. 175- 218. 2004.
- SOUZA, A. P. M., **Avaliação do Efeito do Assoreamento na Hidrodinâmica e no Tempo de Residência de um Complexo Estuarino Lagunar Tropical**. Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento. 51 f, 2017.
- SONTEK. 1996. **Technical Notes – Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) Principles of Operation**. [Sontek], San Diego, USA. 1996, 15pp.
- STOMMEL, H. **The role of density currents in estuaries**. Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, Minneapolis, University of Minnesota, 1953, p. 305-312.
- TUNDISI, J.G.& TUNDISI, T. M. **Limnologia**. Oficina de Textos, São Paulo, 2008. ISBN: 978-85-86238-66-6.
- VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**, 2ª edição, Pax gráfica e editora, 532 p., Brasília – DF, julho de 2001.
- VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**, Versão Digital 2, Recife – PE, março de 2006.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**, Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa, 449 p., 2000.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**, 1 ed., vol. 7. Belo Horizonte, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 2007.

WANG, C.F.; HSU, M-H.; KUO, A. Y. **Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan**. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2004.

YÁÑES-ARANCÍBIA, A. **Lagunas costeras y estuários: cronología, critérios y conceptos para una clasificación ecológica de sistemas costeros**. In: Simpósio sobre ecossistemas da costa sul e sudeste brasileira, 1987. Cananéia. Anais...São Paulo: ACIESP. v. 3. 1987.