



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 7, nº 2 (2021)

<http://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24914>



RENOVAÇÃO DAS ÁGUAS NO COMPLEXO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (ALAGOAS, BRASIL) SOB DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMBOCADURAS

Mariana Kummer da Rocha Pinheiro¹; Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha²; Teresa Elaine Bezerra Luz³; Ada Cristina Scudelari⁴

¹Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-4584>

E-mail: marianakummer1@gmail.com

²Doutora em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0005-467X>

E-mail: cynara@ufpr.br

³Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8563-0698>

E-mail: elanebluz30@gmail.com

⁴Doutora em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7594-1196>

E-mail: adaufrn@gmail.com

Resumo

O presente trabalho analisa as alterações morfológicas ocorridas no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), através de técnicas de geoprocessamento e da modelagem computacional. Inicialmente realizou-se uma análise multitemporal das variações das linhas de costa entre o período de 1986 até 2017 a partir de imagens dos satélites Landsat 5-TM e Landsat 8-OLI. As imagens foram vetorizadas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para a posterior realização do cálculo das taxas de erosão e acreção. Após isso, algumas simulações foram realizadas com o auxílio do Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA[®]) para os parâmetros tempo de residência e idade da água, considerando

três cenários com configurações de embocaduras distintas (2006, 2014 e 2017). Os resultados indicaram o predomínio da deposição de sedimentos na região da embocadura, com a dinâmica migratória no sentido Sudoeste-Nordeste. O tempo de residência apontou possíveis áreas de estagnação na região Noroeste da laguna Manguaba e nas porções Noroeste e Sudeste da laguna Mundaú. O cenário de 2014 apresentou menores idades das águas, mostrando que as diferentes configurações de embocaduras interferem na renovação das águas do complexo estuarino lagunar.

Palavras-chave: Monitoramento Costeiro; Embocadura; Renovação das Águas.

WATER RENEWAL IN THE MUNDAÚ-MANGUABA ESTUARINE-LAGOON COMPLEX (AL, BRAZIL) UNDER DIFFERENT INLET CONFIGURATIONS

Abstract

The present study analyzes the morphological changes that occurred in the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon Complex (MMELC), through geoprocessing techniques and computational modeling. Initially, a multitemporal analysis of the coastline variations between 1986 and 2017 was carried out using Landsat 5-TM and Landsat 8-OLI satellite images. The images were vectored in a Geographic Information System (GIS) environment for the subsequent calculation of erosion and accretion rates. After that, some simulations were carried out with the Hydrodynamic Environmental System (SisBaHiA[®]) for residence time and water age parameters, considering three scenarios with different inlet configurations (2006, 2014 and 2017). The results indicated the predominance of sediment deposits in the inlet region, with migratory dynamics in the Southwest-Northeast direction. Residence time (RT) indicated possible stagnation areas in the Northwest region of the Manguaba lagoon and the Northwest and Southeast portions of the Mundaú lagoon. The 2014 scenario showed lower water ages, indicating that the different inlet configurations interfere with the water renewal of the lagoon-estuarine complex.

Keywords: Coastal Monitoring; Inlet; Water Renewal.

RENOVAÇÃO DE ÁGUA EN EL COMPLEJO ESTUARINO LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (AL, BRASIL) BAJO DIFERENTES CONFIGURACIONES DE EMBOCADURAS

Resumen

El presente trabajo analiza los cambios morfológicos ocurridos en el Complejo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), mediante técnicas de geoprocésamiento y modelación computacional. Inicialmente, se realizó un análisis multitemporal de las variaciones del litoral entre el período de 1986 a 2017 utilizando imágenes de los satélites Landsat 5-TM y Landsat 8-OLI. Las imágenes fueron vectorizadas en un entorno de Sistema de Información Geográfica (SIG) para el cálculo posterior de las tasas de erosión y acreción. Posteriormente, se realizaron algunas simulaciones con el Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental (SisBaHiA[®]) para los parámetros tiempo de residencia y edad del agua, considerando tres escenarios con diferentes configuraciones de embocaduras (2006, 2014 y 2017). Los resultados indicaron el predominio de la deposición de sedimentos en la región de la embocadura, con la dinámica migratoria en dirección suroeste-noreste. El tiempo de residencia indicó posibles áreas de estancamiento en la región noroeste de la laguna Manguaba y en las porciones noroeste y sureste de la laguna Mundaú. El escenario de 2014 mostró edades del agua más bajas, mostrando que las diferentes configuraciones de embocaduras interfieren con la renovación de las aguas del complejo estuarino de la laguna.

Palabras-clave: Monitoreo Costero; Embocadura; Renovación de agua.

1. INTRODUÇÃO

As lagunas costeiras ocupam cerca de 13% das áreas costeiras e representam corpos de água rasos, encontrados em todos os continentes, orientados de forma paralela à costa, e conectados ao oceano através de embocaduras (KJERFVE, 1994; MIRANDA *et al.*, 2002). Esses sistemas possuem uma variedade de formas e tamanhos que podem ser modificados pela erosão e deposição de sedimentos, principalmente na região da embocadura (BIRD, 2008).

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

Dessa forma, as embocaduras das lagunas são regiões morfológicamente complexas, dependentes de um equilíbrio entre o transporte litorâneo, o aporte fluvial, os fluxos de maré e as características morfológicas do corpo d'água interior, que promovem a abertura e o fechamento das embocaduras (FORTUNATO *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2006; SILVA e ROSMAN, 2016). As configurações morfológicas das embocaduras determinam a capacidade de trocas de águas de uma laguna, onde o tamanho (comprimento, largura e profundidade) e o maior número de entradas provocam um aumento nas trocas de águas entre a laguna e a região costeira adjacente, melhorando

significativamente a qualidade e a renovação de suas águas (PANDA *et al.*, 2013).

Alguns estudos investigam os efeitos das variações morfológicas das embocaduras em corpos d'água naturais. Dias *et al.* (2009) estudaram o impacto da realocação da embocadura de Ancão na circulação hidrodinâmica e no tempo de residência da laguna Ria Formosa. García-Oliva *et al.* (2019) analisaram os efeitos de diferentes cenários de dragagem nos parâmetros de salinidade e temperatura na laguna Mar Menor. Mulligan *et al.* (2019) realizaram simulações hidrodinâmicas e de salinidade na baía de Pamlico para diferentes condições geomorfológicas. Oliveira *et al.* (2006) verificaram o resultado das mudanças morfológicas na renovação das águas da laguna Óbidos, localizada em Portugal. Panda *et al.* (2013) analisaram as mudanças geomorfológicas ocorridas na laguna Chilika, a partir da análise de satélites e de simulações hidrodinâmicas e de distribuição de salinidade.

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

Dentre os sistemas lagunares existentes na costa brasileira, destaca-se neste estudo o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú – Manguaba (CELMM), localizado no estado de Alagoas (Figura 1), um sistema de corpos aquáticos naturais composto por duas lagunas, Mundaú e Manguaba, conectadas ao oceano por uma série de canais revestidos por manguezais, que terminam em uma embocadura que possui uma alta variabilidade, com a constante abertura e fechamento de seus canais (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993).

A região do CELMM vem sendo estudada por diversos autores. Lima (2017) calculou o tempo de residência com o auxílio do modelo computacional Mike 21. Brito Júnior *et al.* (2018) estudaram diferentes abordagens para os tempos de residência durante o cenário de estígio da laguna Mundaú e avaliaram a influência da maré e do vento nas trocas de água. Cunha *et al.* (2021) verificaram como as variações do aporte fluvial e do vento influenciam a circulação hidrodinâmica e a renovação das águas. Nunes *et al.* (2020) desenvolveram um modelo morfológico para a evolução das embocaduras e aplicaram o modelo na embocadura da laguna Mundaú. Pinheiro (2020) calculou o tempo de residência, a taxa de renovação e a idade da água para diferentes configurações de embocaduras, considerando os períodos seco e chuvoso.

Neste trabalho, pretende-se ampliar o entendimento sobre os impactos que as variações morfológicas na embocadura provocam na circulação e renovação das águas do CELMM, além de permitir que informações espacialmente dispersas possam ser usadas no entendimento da dinâmica dos processos de mudanças morfológicas ocorridas na embocadura do CELMM.

Portanto, o objetivo do presente trabalho é retratar as mudanças morfológicas ocorridas na embocadura do CELMM, através de técnicas de geoprocésamento; avaliando assim o efeito das diferentes configurações de embocaduras na renovação das águas do referido complexo estuarino lagunar, usando o sistema de modelagem SisBaHiA[®].



Figura 1 – Mapa de localização do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba. Fonte: Adaptado de Cunha *et al.* (2021).

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) está localizado entre as latitudes 9°35' e 9°45' Sul e entre as longitudes 35°44' e 35°58' Oeste, no estado de Alagoas, compreendendo os municípios de Santa Luzia do Norte, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Pilar e Maceió (Figura 1).

O CELMM é um sistema lagunar do tipo sufocado, apresentando longos tempos de residência e trocas de massas de

água restritas (KJERFVE, 1986; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993). O sistema também atua como um filtro eficiente para a atenuação da amplitude das marés. O amortecimento das marés chega a 88% na laguna Mundaú e 98% na laguna Manguaba, quando comparada à amplitude do porto de Maceió (OLIVEIRA e KJERFVE, 1993).

As lagoas Mundaú e Manguaba são rasas, com profundidades médias de 1,7 metros e 2,1 metros, respectivamente (COSTA *et al.*, 2010; OLIVEIRA e KJERFVE, 1993). A laguna Mundaú possui uma área de 27 km² e tem como principal fonte fluvial o rio Mundaú. Já a laguna Manguaba tem, aproximadamente, 42 km² e o seu principal contribuinte é o rio Paraíba do Meio (ANA, 2006).

O regime de precipitação da região pode ser dividido em duas estações bem definidas, uma estação seca entre setembro e março, e uma estação chuvosa de abril até agosto, concentrando 70% da precipitação total anual (INMET, 2020). A precipitação média anual é em torno de 1800 mm, com a temperatura média do ar variando entre 24 e 26,5°C (INMET, 2020). As lagoas também estão inseridas no clima As do sistema de classificação de Köppen, caracterizado pelo clima tropical com verão seco (ALVARES *et al.*, 2013).

2.2. Alterações morfológicas

Para verificar as alterações morfológicas ocorridas na região próxima à embocadura do CELMM e quantificar as taxas de erosão e deposição, foram utilizadas imagens de satélites adquiridas entre 1986 e 2017. Os critérios definidos para a seleção das cenas foram a cobertura de nuvens e a disponibilidade das imagens. Com isso, foram definidos sete intervalos de tempo (1986 a 1990, 1990 a 1998, 1998 a 2003, 2003 a 2006, 2006 a 2010, 2010 a 2014, 2014 a 2017).

As imagens selecionadas são dos satélites Landsat 5-TM e Landsat 8-OLI, com resolução espacial de 30 metros, órbita/ponto 214/67, datum WGS-1984, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 25 Sul, extraídas do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018) e apresentadas na escala 1:100.000, conforme a Figura 2.

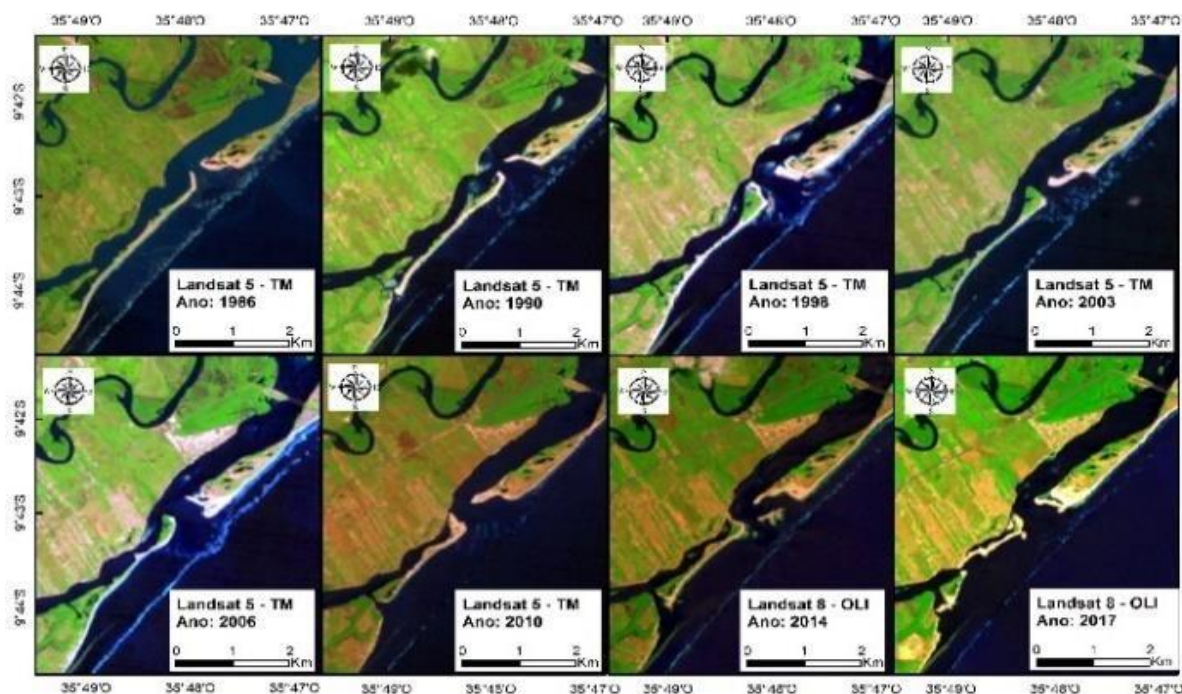


Figura 2 – Imagens orbitais do satélite Landsat para o período de 1986 até 2017. Fonte: Adaptado de Luz *et al.* (2021).

As bandas espectrais foram combinadas no sistema de cores Red-Green-Blue (RGB) para realçar as diferenças entre a massa d'água e as áreas emersas. As composições utilizadas podem ser visualizadas na Tabela 1.

Após isso, as imagens foram inseridas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o software ArcGIS®, para a vetorização das linhas de costa e posterior análise das áreas de erosão e deposição de sedimentos. Conforme a metodologia de Amaro *et al.* (2012), as razões (R) entre a deposição e a erosão dos intervalos de tempo mencionados foram calculadas e classificadas entre Deposição Intensa (DI, $R > 2$), Deposição (DP, $1,10 < R < 2,0$), Equilíbrio (EQ, $0,90 < R < 1,10$), Erosão (ER, $0,70 < R < 0,90$) e Erosão Intensa (EI, $R < 0,70$).

Tabela 1 – Composição RGB das imagens de satélites utilizadas. Fonte: Adaptado de Luz *et al.* (2021).

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

2.3 Modelos utilizados

O sistema de modelagem escolhido foi o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA®), registrado e desenvolvido pelo Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. As simulações computacionais deste estudo foram realizadas utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional, o modelo de transporte euleriano e o modelo de transporte lagrangeano do SisBaHiA®. O modelo hidrodinâmico utiliza um esquema numérico implícito de segunda ordem para a discretização temporal e elementos finitos quadráticos para a discretização espacial. Os campos de vento e atrito do fundo variam dinamicamente no tempo e no espaço e a modelagem de turbulência multi-escala é baseada em Simulação de Grandes Vórtices (LES). O modelo de transporte utiliza a mesma discretização espacial e o mesmo esquema para discretização temporal do modelo hidrodinâmico. O modelo de transporte lagrangeano é especialmente adequado para determinação de tempos de residência em corpos de água naturais, permitindo obter mapas de isolinhas de tempos de residência em diferentes setores de corpos de água com geometria complexa (ROSMAN, 2020).

A integração na direção vertical, que caracteriza o modelo bidimensional, deve ser aplicada em corpos de água com dimensões horizontais predominantes sobre a dimensão vertical e com estratificação vertical pouco relevante. O CELMM é um sistema de águas rasas, com pouca estratificação vertical e com escalas horizontais de ordens de grandeza maiores que as escalas verticais, sendo possível o emprego do modelo bidimensional, utilizado neste trabalho.

O tempo de residência é definido como o tempo médio de permanência da água dentro de um compartimento e pode ser calculado através da razão entre o volume e o fluxo residual de água (BRYE *et al.*, 2013; ZIMMERMAN, 1988). Esse cálculo tradicional é adequado para corpos de água homogêneos. Porém, em corpos de água heterogêneos, a utilização desse conceito se torna inviável. Para esses corpos heterogêneos e com a modelagem computacional, é possível definir uma função de tempo de residência variável no espaço. Para o cálculo dessa distribuição espacial, o modelo adota a seguinte metodologia: inicialmente, os compartimentos são preenchidos com várias partículas neutras dispostas aleatoriamente, com as posições iniciais e os instantes de tempo devidamente contabilizadas. Depois desse lançamento, as partículas são advectadas pelas correntes geradas no modelo de circulação hidrodinâmica e a trajetória de cada partícula é acompanhada ao longo do tempo. Quando uma partícula sai do compartimento, o seu tempo de vida ao sair corresponde ao tempo de residência (ROSMAN, 2020). No final da simulação, o valor do tempo de residência das partículas que não saíram do sistema equivale ao tempo final da simulação.

O modelo de transporte euleriano foi usado no cálculo da idade da água. A idade da água calcula o tempo de decaimento de uma substância passiva e marcadora de idade na água. Para a estimativa desse tempo de decaimento, a substância deve ter reação cinética de decaimento de primeira ordem, sem efeitos adicionais de perdas ou ganhos de massa (ROSMAN, 2020). O modelo de idade da água possui a seguinte metodologia: admite-se que a concentração inicial é igual a um em todo o domínio, resultando em idade da água zero. As novas águas que entram no sistema, a partir da maré e do aporte fluvial, também possuem uma idade de água zero. Na medida em que as águas iniciais e as águas novas se misturam e são transportadas, o valor da concentração da substância diminui em função do processo de decaimento da substância (ROSMAN, 2020).

2.4. Dados do modelo hidrodinâmico

A partir das imagens orbitais do período entre 1986 e 2017 (Figura 2), foi possível verificar a formação de um novo canal de ligação a partir do ano de 2010. Para verificar os efeitos das diferentes configurações de embocaduras, os contornos de 2006, 2014 e 2017 foram analisados no trabalho.

A imagem referente ao ano de 2006 foi utilizada para retratar a situação anterior à abertura desse novo canal de ligação, ou seja, representa a situação com uma única saída para o mar. Já o ano de 2017 foi escolhido por representar a configuração mais próxima à atual, com duas saídas para o mar. Por fim, o ano de 2014 foi contabilizado para realizar a calibração do modelo hidrodinâmico com os dados de elevação do nível de água medidos por Brito Júnior *et al.* (2018).

Com o intuito de analisar somente a influência das embocaduras na renovação das águas, os dados inseridos de batimetria, rugosidade, maré, vazão e vento foram os mesmos para todas as simulações. Para isso, as simulações de 2006, 2014 e 2017 foram realizadas com os valores médios de vazão e de vento.

Cunha *et al.* (2021) realizaram uma comparação entre os resultados hidrodinâmicos encontrados para os valores

observados em 2014 e os valores médios de vazão e de vento, não encontrando diferenças relevantes. Assim, a utilização dos valores médios, sem a influência de eventos extremos, não causa uma variação significativa nos resultados. Todos os dados utilizados neste trabalho serão melhor descritos a seguir.

A malha de elementos finitos usada na discretização foi construída para abranger as três configurações de embocaduras analisadas, com alterações apenas nas fronteiras de terra. A Figura 3 mostra a malha de discretização utilizada e os detalhes das malhas na região da embocadura de 2006, 2014 e 2017.

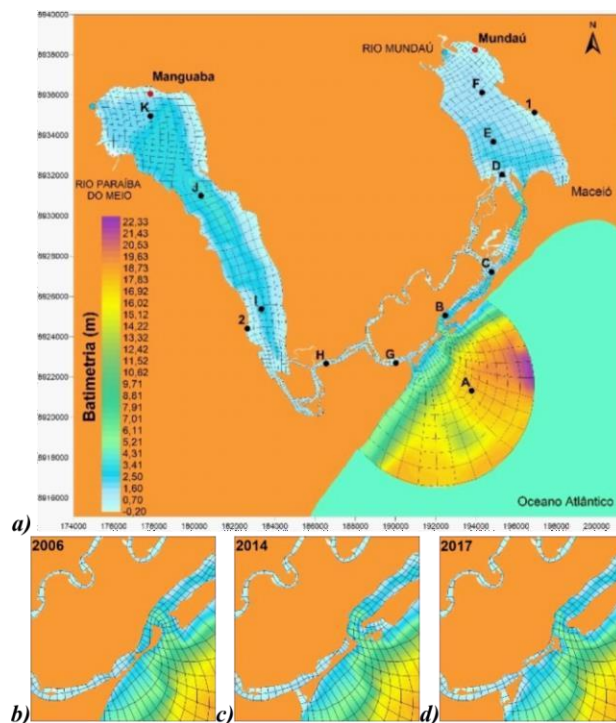


Figura 3 – a) Domínio de modelagem do CELMM, com malha de elementos finitos, batimetria, localização das estações 1 e 2, onde dados de níveis foram medidos no ano de 2014 e usados na calibração do modelo, e as demais estações, A até K, usadas para a análise dos resultados hidrodinâmicos e de idade da água, b) detalhes das regiões das embocaduras nos anos de 2006, c) 2014 e d) 2017.

A batimetria foi extraída da carta náutica do porto de Maceió número 901, realizada em 1977 pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, da medição da Agência Nacional de Águas (ANA) em 2012 e dos levantamentos realizados pela PORTOBRÁS em 1984. A partir da análise da Figura 3, percebe-se que as lagoas possuem até quatro metros de profundidade, e que os canais têm profundidades de até sete metros.

A rugosidade equivalente do domínio foi obtida a partir da correlação dos dados de Alves (2010) com os valores de rugosidade sugeridos por Abbott e Basco (1989). No interior das lagoas Mundaú e Manguaba ocorre a predominância de silte. Nos canais há o domínio de areia média e ao longo da costa ocorre o predomínio de areia grossa.

Os dados de vazões foram adquiridos pelo portal HidroWeb (ANA, 2019) para o período de 1974 e 2018 nas estações automáticas mais próximas dos exutórios dos rios Paraíba do Meio e Mundaú. Para a laguna Manguaba, a estação fluviométrica está sob o código 39870000 (09°30'24,0"S e 36°01'22,0"W). Na laguna Mundaú, a estação encontra-se no município Rio Largo, com o código 39770000 (09°28'02,0"S e 35°51'35,0"W).

A Figura 4 expõe os valores de vazões médias diárias dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, utilizadas no modelo de circulação hidrodinâmica. Nota-se que o período seco, ou seja, com menores descargas fluviais, está compreendido entre os meses de outubro a março e que o período chuvoso está inserido entre os meses de abril a setembro.

Percebe-se também que o mês de julho representa o pico das vazões para os dois rios e que o rio Mundaú possui vazões mais elevadas que o rio Paraíba do Meio.

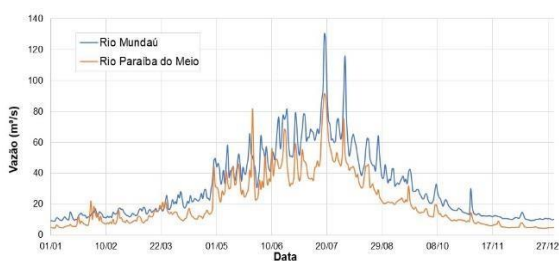


Figura 4 – Vazões médias diárias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio entre 1974 e 2018.

Os dados de direção e intensidade dos ventos foram extraídos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) a partir da estação Maceió-A303, sob o código OMM 81998 (9°33'04,2"S; 35°46'12,7"W). Para as simulações hidrodinâmicas, os dados médios horários da série histórica entre 2004-2018 foram utilizados. Os valores dos anos de 2007 e 2008 foram desconsiderados devido à ocorrência de falhas na estação meteorológica. A Figura 5 traz a rosa de distribuição dos ventos médios, onde verifica-se a predominância de ventos do quadrante leste com intensidades entre 0,5 e 8 m/s e velocidade média de 2,68 m/s.

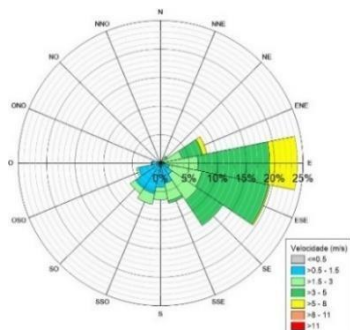


Figura 5 – Rosa de distribuição dos ventos médios para o período entre 2004 e 2018 na estação Maceió A-303.

Os valores médios diários de direção e intensidade dos ventos mostram que no período seco, o vento é de leste (41% do tempo) com uma velocidade média de 2,85 m/s. Na estação chuvosa, o vento sopra com maior frequência na direção sudeste (21% do tempo) com uma velocidade média de 2,25 m/s (CUNHA *et al.*, 2021). Com referência ao alinhamento das lagunas, é possível constatar que os ventos de sudeste influenciam mais a circulação hidrodinâmica que os ventos de leste.

A maré astronômica foi determinada com a inserção das constantes harmônicas do catálogo de estações maregráficas brasileiras, através da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2000) para o Porto de Maceió (9°40,9'S; 35°43,5'W). As curvas de marés observadas nos anos de 2006, 2014 e 2017 eram similares em relação à amplitude, com poucas diferenças de fases. Deste modo, para auxiliar na análise dos resultados encontrados, optou-se por adotar a curva de maré correspondente ao ano de 2014 em todas as simulações.

A Figura 6 mostra a curva de maré utilizada no modelo. Verifica-se que a maré atinge uma elevação máxima de 1,39 m e amplitude máxima de 2,61 m.

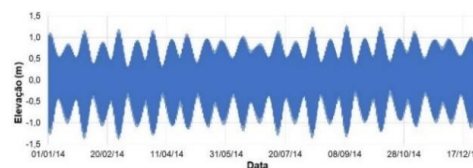


Figura 6 – Curva de maré de 2014, obtida a partir das constantes harmônicas do Porto de Maceió.

2.5. Condições iniciais e de contorno dos modelos

Para o modelo de circulação hidrodinâmica, como condição inicial, deve-se fornecer os valores de elevação da superfície livre e de velocidades para todos os nós do domínio. Como não haviam resultados prévios, foram realizadas simulações no período de dezembro, para as três configurações analisadas (2006, 2014 e 2017), com os valores de elevação e velocidades nulos. Os resultados dessas simulações geraram as condições iniciais do modelo hidrodinâmico.

Também são necessárias condições de contorno para o campo das velocidades e para a elevação da superfície livre. Foi estabelecido que a velocidade normal é nula nos nós ao longo das margens. Nos nós que possuem vazões fluviais, foi considerado que a vazão é normal e a componente tangencial é nula.

Para a utilização do modelo de transporte lagrangeano, devem ser admitidas duas condições de contorno. A primeira estabelece que quando uma partícula atravessa o segmento de contorno, ela sai do domínio e é perdida. A segunda condição ocorre ao longo dos contornos terrestres e duas situações podem ser consideradas: a partícula atinge a fronteira e retorna ao meio sem sofrer alteração em sua massa ou a partícula retorna ao meio com uma fração de sua massa absorvida. Essa fração é dada pelo coeficiente de absorção, que varia de zero a um. Neste trabalho, foi considerado o coeficiente de absorção igual a um, indicando uma absorção total da partícula no trecho de fronteira atingido.

Para o cálculo da idade da água, definiu-se a concentração igual a um, tanto no domínio de modelagem, como nos contornos abertos e com vazões fluviais.

As análises dos resultados foram feitas nas estações localizadas na Figura 3. As estações 1 e 2 indicam os locais onde foram realizadas as medições de níveis d'água de Brito Júnior *et al.* (2018). A estação A corresponde à região costeira adjacente.

As estações B e G indicam as regiões mais próximas das embocaduras das lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente. As estações C e H estão localizadas nas regiões intermediárias dos canais de acesso às lagunas Mundaú e Manguaba, respectivamente.

As estações D, E e F estão alocadas na laguna Mundaú e caracterizam os três compartimentos: a região próxima ao canal de ligação, a região central e o fundo da laguna. De forma análoga, as estações I, J e K, localizadas na laguna Manguaba, descrevem os três compartimentos: a região mais próxima ao canal de acesso, a região central e o fundo da laguna.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução das linhas de costa

A Figura 7 mostra a evolução da linha de costa para o período de 1986 até 2017, através da classificação e quantificação das áreas erodidas e acrescidas.

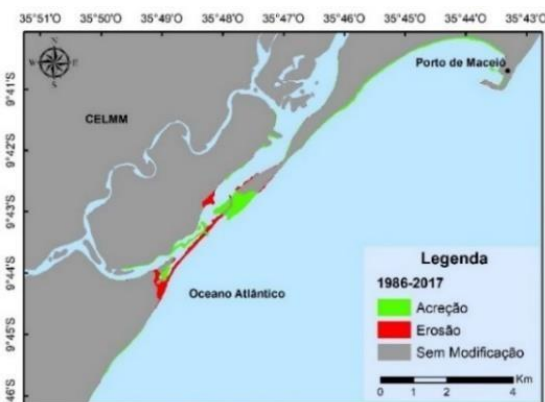


Figura 7 – Mapa com zonas de erosão e acreção para o período de 1986 até 2017.

Como mostrado na Figura 2, percebe-se que em 1986 o CELMM possuía apenas uma saída para o oceano. Entre o período de 1986 e 1990, ocorreu uma erosão intensa na porção sudoeste da embocadura, ocasionando na abertura de um canal de acesso à laguna Manguaba. As cheias ocorridas nas bacias dos rios Paraíba do Meio e Mundaú em 1988 e 1989 podem ter originado essa nova abertura no complexo lagunar (FRAGOSO JR. *et al.*, 2010).

Entre os anos de 1990 e 1998, ocorreu uma deposição de sedimentos na mesma região, com o conseqüente fechamento do canal de acesso entre a laguna Manguaba e o oceano. No período de 2003 a 2006, essa região do CELMM possuía apenas uma entrada oceânica.

Novamente, entre 2006 e 2010, verificou-se uma erosão na porção sudoeste da embocadura, com a abertura do canal de acesso na laguna Manguaba, e uma deposição de sedimentos na porção nordeste, no canal que conecta a laguna Mundaú com o oceano. Os eventos de cheias nas bacias dos rios Paraíba do Meio e Mundaú em junho de 2010 podem explicar essa casualidade (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

O canal de ligação entre a laguna Manguaba e o oceano não foi fechado nos anos seguintes (2010, 2014 e 2017). No período de 2010 a 2014, verificou-se a deposição de sedimentos na porção do canal de acesso à laguna Mundaú, com a formação de uma ilha-barreira na região. Entre os anos de 2014 e 2017, observou-se uma erosão de sedimentos no canal de ligação da laguna Manguaba, com a formação de uma ilha-barreira na região da embocadura, devido às descargas intensas dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, na estação chuvosa de 2017 (NUNES *et al.*, 2020).

Percebe-se uma alta variabilidade na região da embocadura do CELMM, com o predomínio da deposição de sedimentos e com a dinâmica migratória dos sedimentos ocorrendo no sentido sudoeste-nordeste. A porção sudoeste da embocadura possui a predominância de processos erosivos, enquanto a região nordeste da embocadura apresenta o predomínio de processos de deposição de sedimentos.

A Tabela 2 traz os resultados quantitativos do balanço sedimentar realizado para os intervalos interdecadais de 1986-1990, 1990-1998, 2003-2006, 2006-2010, 2010-2014 e 2014-2017. Nos períodos de 1986-1998 e 2003-2010 houve a prevalência da deposição de sedimentos. No intervalo de 1998-2003, a razão encontrada foi inferior a 0,7, indicando uma erosão intensa na região. Por último, o período de 2014-2017 indicou um processo de deposição de sedimentos, de acordo com a metodologia desenvolvida por Amaro *et al.* (2012).

Tabela 2 – Valores das áreas de erosão e acreção em km² e classificação em deposição intensa (DI, $R > 2$), deposição (DP, $1,10 < R < 2,0$), equilíbrio (EQ, $0,90 < R < 1,10$), erosão (ER, $0,70 < R < 0,90$) e erosão intensa (EI, $R < 0,70$).

Período	Acreção (A)	Erosão (E)	Razão $R = A/E$	Classificação
1986-1990	0,4613	0,2445	1,8872	DP
1990-1998	0,6198	0,4299	1,4416	DP
1998-2003	0,1900	0,4792	0,3965	EI
2003-2006	0,4889	0,3149	1,5527	DP
2006-2010	0,5805	0,4291	1,3527	DP
2010-2014	0,2879	0,4110	0,7005	ER
2014-2017	0,7014	0,3599	1,9487	DP
1986-2017	1,2822	0,6209	2,0650	DI

3.2. Calibração e resultados hidrodinâmicos

A calibração do modelo foi realizada a partir da comparação entre os dados de níveis d'água medidos por Brito Júnior *et al.* (2018) entre 15/02/2014 e 24/02/2014 com os dados computados pelo SisBaHiA[®] em dois pontos do CELMM, estação 1 na laguna Mundaú e estação 2 na laguna Manguaba. Os resultados da calibração podem ser consultados em Cunha *et al.* (2021). A

calibração dos níveis de água foi satisfatória e indicou uma boa representatividade do modelo.

Foram realizadas três simulações hidrodinâmicas, contemplando os anos de 2006, 2014 e 2017, para períodos de um ano, com número de Courant médio igual a 0,7 e máximo igual a 2,7. Os resultados hidrodinâmicos indicam que as estações próximas à região da embocadura (estações B e G) possuem velocidades e amplitudes de marés relativamente mais elevadas que as outras estações, devido à influência predominante da maré.

Com relação às diferenças entre as simulações realizadas, percebe-se que a laguna Manguaba possui velocidades e elevações mais elevadas nos anos de 2014 e 2017. Como a região próxima à embocadura da laguna Manguaba encontra-se fechada no ano de 2006, as trocas de água ocorrem apenas através da embocadura próxima à laguna Mundaú. Nos anos de 2014 e 2017, as embocaduras estão ramificadas, favorecendo as trocas de águas e gerando um aumento na amplitude de maré e na velocidade. Na laguna Mundaú, as amplitudes de maré são mais elevadas no ano de 2006, devido à configuração de embocadura da região que permite uma maior entrada de águas.

3.3. Tempo de residência

Foram realizadas simulações para os períodos chuvoso e seco para os cenários de 2006, 2014 e 2017. Para o período seco, os meses de janeiro, fevereiro e março (01/01 até 31/03) foram utilizados. Para o período chuvoso, foram definidos os meses de junho, julho e agosto (01/06 até 29/08). As partículas ficaram dispostas com o espaçamento de 100 x 100 metros.

A Figura 8 mostra os tempos de residência para os anos de 2006, 2014 e 2017, considerando o período seco. As partículas que não saíram do sistema no final dos 90 dias de simulação ficam com o tempo de residência correspondente a 90 dias.

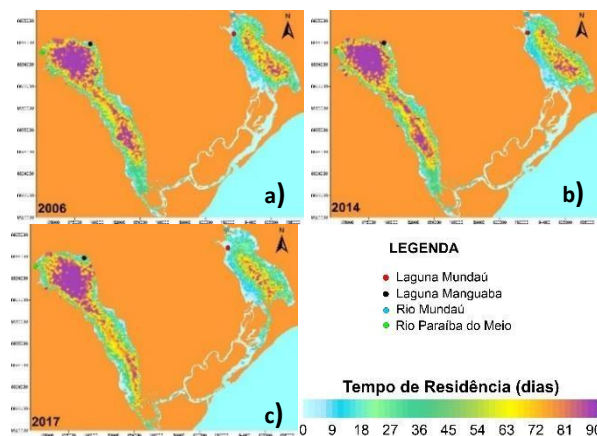


Figura 8 – a) Tempo de residência após 90 dias de simulação no período seco para os cenários de 2006, b) 2014 e c) 2017./

De maneira geral, a laguna Mundaú possui tempos de residência (TR) mais elevados na porção sudeste, com valores entre 63 a 90 dias. Os valores são inferiores nas áreas próximas às margens, com tempos de residência menores que 20 dias. O estudo considerou a absorção total das partículas nas margens das

lagunas e nos canais, o que pode explicar os tempos de residência inferiores nestas regiões.

É possível definir três compartimentos na laguna: a região próxima ao exutório do rio Mundaú, com tempos de até 20 dias, onde as trocas de massas d'água são favorecidas pelo aporte fluvial; a porção central, com TR entre 50 a 80 dias; e a região próxima à entrada do canal de ligação, com tempos de residência de até 40 dias, onde as trocas de massas são favorecidas pela maré.

Na laguna Manguaba, os tempos de residência são elevados em toda a extensão da laguna, com valores variando entre 63 e 90 dias. Esses resultados estão coerentes com os apresentados por Lima (2017), que identificou as regiões ao leste da laguna Mundaú e toda a extensão da laguna Manguaba como suscetíveis a problemas de qualidade de água.

Verifica-se dois compartimentos para a laguna Manguaba: a região próxima ao canal de ligação, com relativa influência da maré e tempos de residência em torno de 25 a 70 dias; e a porção próxima ao rio Paraíba do Meio, com tempos que variam entre 60 e 90 dias; nesta região o aporte fluvial é dominante e as vazões do rio Paraíba do Meio não são suficientes para gerar trocas de massas d'água significativas.

A Figura 9 expõe os tempos de residência encontrados para o período chuvoso, após os 90 dias de simulação, para os anos de 2006, 2014 e 2017. Percebe-se que, na laguna Mundaú, as partículas ficam retidas na porção noroeste-sudeste da laguna, com tempos de residência mais elevados, de 30 a 72 dias. A região oeste da laguna apresenta valores inferiores a 15 dias.

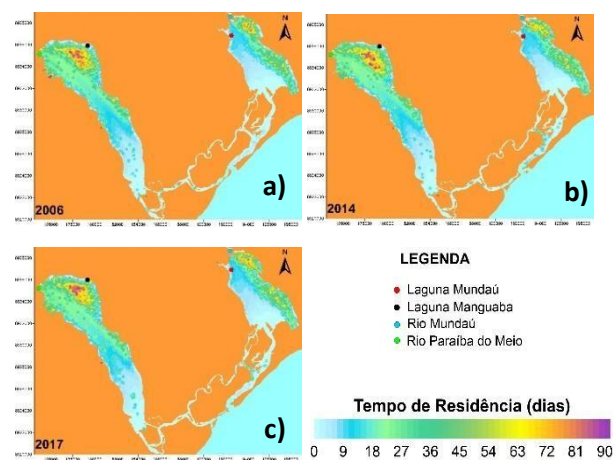


Figura 9 – a) Tempo de residência após 90 dias de simulação no período chuvoso para os cenários de 2006, b) 2014 e c) 2017.

Na laguna Manguaba, as porções central e sudeste, mais próximas aos canais, possuem tempos de residência de cerca de 20 dias; já a região noroeste tem valores que ficam entre 36 e 90 dias, devido ao maior aporte fluvial do rio Paraíba do Meio.

Comparando os períodos seco e chuvoso, percebe-se uma queda acentuada dos valores, indicando que a descarga fluvial interfere de maneira significativa nas trocas de massas d'água no CELMM. Com relação aos cenários analisados, não são

percebidas diferenças significativas entre os anos de 2006, 2014 e 2017.

3.4. Idade da água

Foram realizadas simulações para os três cenários analisados, considerando o período seco (01/01 até 30/04) e o chuvoso (01/06 até 28/09). A Figura 10 e a Figura 11 mostram as séries temporais de idade da água para o período seco nas estações D, E, F, I, J e K, encontradas no interior das lagoas Mundaú e Manguaba. As séries exibem a idade máxima encontrada e foram filtradas com a média móvel com o período de 24 horas.

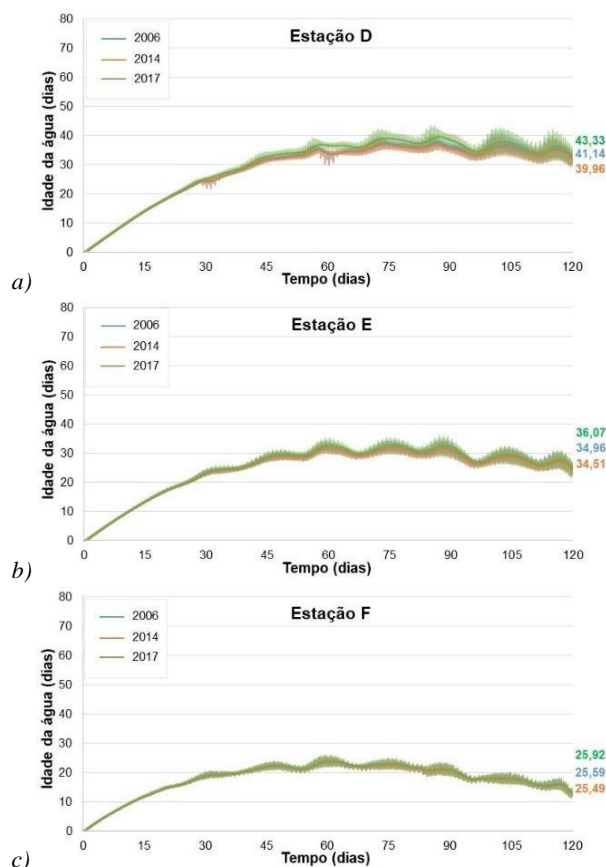


Figura 10 – a) Séries temporais das idades das águas para 120 dias de simulação nas estações D, b) E e c) F, compreendidas na laguna Mundaú durante o período seco.

As regiões a noroeste das lagoas Mundaú (estação F) e Manguaba (estação K) possuem as menores idades das águas, com máximas de 26 dias e 32 dias, respectivamente. Essas estações encontram-se próximas às entradas dos rios Mundaú e Paraíba do Meio. Comparando as simulações realizadas, percebe-se que o ano de 2014 tem idades inferiores aos outros cenários.

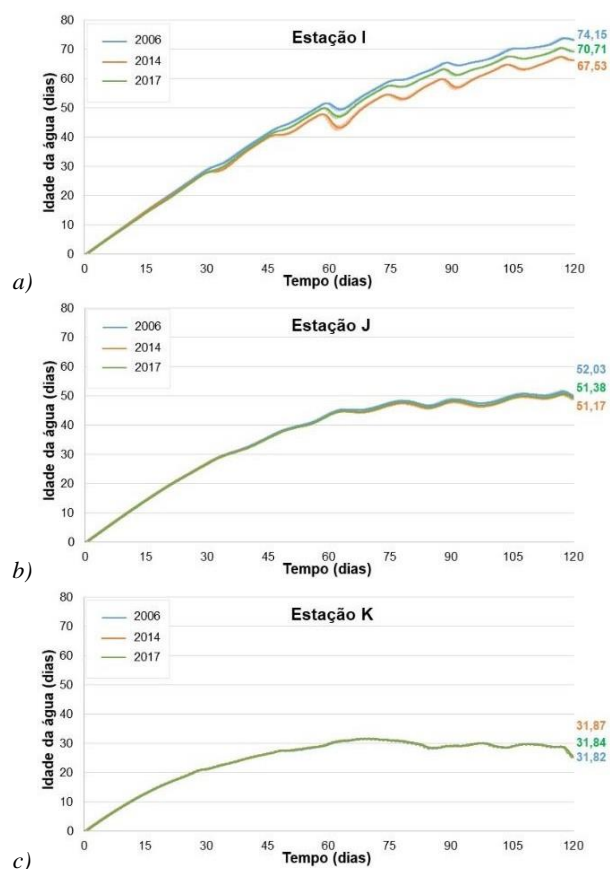


Figura 11 – a) Séries temporais das idades das águas para 120 dias de simulação nas estações I, b) J e c) K, compreendidas na laguna Manguaba durante o período seco.

Na laguna Manguaba, percebe-se o mesmo comportamento identificado nos resultados hidrodinâmicos, em que o ano de 2014 tem idades menores, seguidos pelos cenários de 2017 e 2006, em decorrência da ramificação das embocaduras. Na região próxima ao canal de ligação (estação I), o cenário de 2006 possui uma idade da água de até 74,15 dias, representando uma diferença de 6,6 dias entre os anos de 2006 e 2014.

De forma geral, a porção sudeste da laguna Mundaú e as regiões central e sudeste da laguna Manguaba possuem idades das águas mais elevadas, condizentes com os resultados encontrados para o tempo de residência. Diferenças são encontradas entre os resultados na porção noroeste da laguna, com o tempo de residência elevado e a idade da água baixa.

O tempo de residência é calculado a partir da trajetória das partículas que são advectadas pelas correntes, utilizando uma abordagem lagrangeana. Como a região noroeste da laguna possui velocidades muito baixas, o tempo de residência torna-se elevado.

A idade da água possui uma abordagem euleriana, relacionada com a concentração das substâncias encontradas no corpo d'água. A região noroeste está próxima ao rio Paraíba do Meio, que possui concentrações elevadas, tornando a idade da água mais baixa nesse local.

As figuras 12 e 13 apresentam as séries temporais de idade da água para o período chuvoso, nas estações compreendidas no interior das lagoas Mundaú e Manguaba, considerando os 120 dias de simulação. As imagens também são filtradas por meio de média móvel com o período de 24 horas.

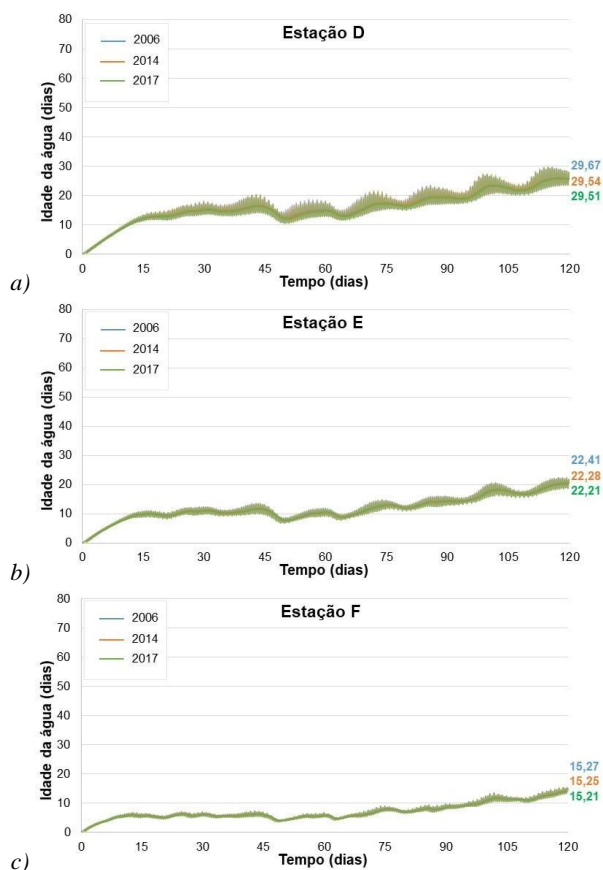


Figura 12 – a) Séries temporais das idades das águas para 120 dias de simulação nas estações D, b) E e c) F, compreendidas na laguna Mundaú durante o período chuvoso.

Percebe-se que na laguna Mundaú, a porção sudeste da laguna (estação D) apresenta uma idade máxima de 29,67 dias, reduzindo para 15,27 dias na porção noroeste (estação F), devido à influência significativa do aporte fluvial.

Comparando os períodos seco e chuvoso, nota-se a importância da descarga fluvial na região, que reduziu em até 14 dias a idade da água na laguna.

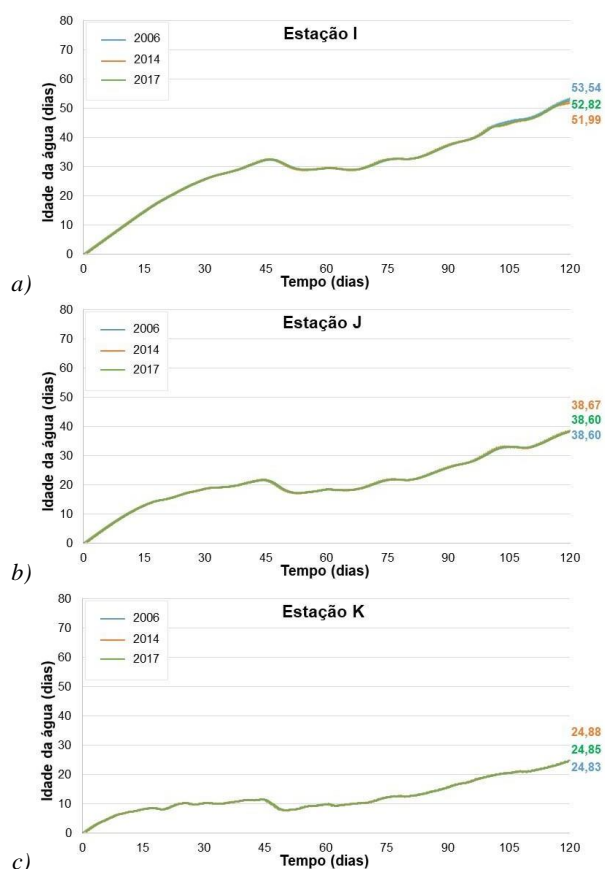


Figura 13 – a) Séries temporais das idades das águas para 120 dias de simulação nas estações I, b) J e c) K, compreendidas na laguna Manguaba durante o período chuvoso.

Na laguna Manguaba (Figura 13), verifica-se que apenas a porção sudeste da laguna (estação I) apresenta diferenças significativas entre os cenários analisados. O comportamento avaliado é similar ao encontrado no período seco, em que o cenário de 2006 tem os maiores valores de idade da água e o cenário de 2014 possui os menores. Os valores de idade da água ainda são elevados no período chuvoso, representando uma região mais suscetível à problemas ambientais.

De maneira geral, como o rio Mundaú possui vazões mais elevadas que o rio Paraíba do Meio e a maré penetra com mais facilidade na laguna Mundaú com o menor amortecimento das marés (88%), as idades das águas encontradas na laguna Mundaú são menores, em comparação com a laguna Manguaba.

Também é possível verificar como a sazonalidade influencia na renovação das águas no CELMM. No período chuvoso, com ventos na direção sudeste e vazões mais elevadas, as idades das águas são menores ao longo de todo o complexo, do que no período seco, caracterizado por vazões baixas e por ventos mais intensos na direção leste.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise histórica das linhas de costa do CELMM a partir das imagens orbitais dos satélites Landsat 5-TM e Landsat 8-OLI indicaram que o CELMM possui uma alta variabilidade na região da embocadura, com o predomínio da deposição de sedimentos e com a dinâmica migratória ocorrendo no sentido sudoeste-nordeste.

A distribuição espacial dos tempos de residência na região do CELMM revelou áreas de estagnação, propensas ao acúmulo de poluentes, na região noroeste da laguna Manguaba e no eixo noroeste-sudeste da laguna Mundaú.

As simulações para a idade da água e o tempo de residência indicaram que o CELMM é fortemente influenciado pela descarga fluvial dos seus principais rios afluentes, rio Mundaú e Paraíba do Meio, ocasionando na redução na idade da água e no tempo de residência. A maré também desempenha um papel essencial na renovação das águas, principalmente nos canais e nas regiões ao sudeste das lagoas.

As regiões central e sudeste da laguna Manguaba apresentaram idades das águas mais elevadas, devido à menor influência do rio Paraíba do Meio. Assim, essas áreas se tornam mais vulneráveis à poluição por lançamentos de efluentes não tratados.

Com relação aos cenários, verifica-se que a configuração de embocadura de 2014 apresentou as menores idades das águas, expondo que a ramificação das embocaduras causou uma melhoria significativa na mistura das águas.

5. REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; BASCO, D. R. *Computational Fluid Dynamics: an Introduction for Engineers*. Longman Scientific & Technical, 1989. 425p.
- AGUILERA, L.; SANTOS, A. L. F. DOS; ROSMAN, P. C. C. On characteristic hydraulic times through hydrodynamic modelling: discussion and application in Patos Lagoon (RS). *Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v.15, n.2, 1-20, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n.6, 711-728, 2013.
- ALVES, M. C. *Composição e acumulação da matéria orgânica (C, N, ligninas) nos sedimentos do sistema lagunar Mundaú-Manguaba, AL - Brasil*. Niterói, 2010. 98f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, 2010.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento remoto e geodésia de precisão*. Natal, RN, 2012. 120p.
- ANA. Agência Nacional das Águas. Batimetria da lagoa Mundaú - Alagoas. *Representação gráfica das profundidades na lagoa Mundaú, corrigidas pelo nível de redução da DHN*. Maceió, AL: ANA, 2012.
- ANA. Agência Nacional das Águas. *Plano de Ações e Gestão Integrada do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba (CELMM)*. Organizadores: João Gilberto Lotufo Conejo, Paulo Lopes Varella Neto, Ronaldo Pereira Lopes. Brasília, DF: ANA, 2006.
- ANA. Agência Nacional das Águas. *In Séries Históricas*. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 14/01/2019.
- BIRD, E. *Coastal Geomorphology: An Introduction*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008. 436p.
- BRITO JÚNIOR, A. N. DE; FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; LARSON, M. Tidal Exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v.17, 133-142, 2018.
- BRYE, B. DE; BRAUWERE, A. DE; GOURGUE, O.; DELHEZ, E. J. M.; DELEERSNIJDER, E. Reprint of water renewal timescales in the Scheldt Estuary. *Journal of Marine Systems*, v.128, 3-16, 2013.
- COSTA, T. L. F.; ARAUJO, M. P.; CARREIRA, R. S.; KNOPPERS, B. A. Lipídios como indicadores de fontes e distribuição de matéria orgânica particulada em um complexo estuarino-lagunar tropical (Mundaú – Manguaba, AL). *Química Nova*, v.33, n.9, 1915–1922, 2010.
- CUNHA, C. L. N.; SCUDELARI, A. C.; SANT'ANA, D. O.; LUZ, T. E. B.; PINHEIRO, M. K. R. Effects on the circulation and water renewal in a brazilian estuary lagoon complex, due to the variations in the river flow and the wind. *Revista Ambiente & Água*, v.16, n.2, 1-18, 2021.
- DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. *Porto de Maceió número 901*. Rio de Janeiro, RJ: DHN, 1977.
- DIAS, J. M.; SOUSA, M. C.; BERTIN, X.; FORTUNATO, A. B.; OLIVEIRA, A. Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). *Environmental Modelling & Software*, v.24, n.6, 711-725, 2009.
- FORTUNATO, A. B.; CLÍMACO, M.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, A.; SANCHÓ, F. FREIRE, P. Dinâmica fisiográfica da orla costeira: estudos de reabilitação e proteção. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v.8, n.1, 45-63, 2008.
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. de A.; SOUZA, V. C. B. de. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 10, 2010, Fortaleza, CE. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2010. p. 1-20.

- FEMAR. Fundação de Estudos do Mar. *Catálogo de estações maregráficas brasileiras*. Rio de Janeiro, RJ: FEMAR, 2000.
- GARCÍA-OLIVA, M.; MARCOS, C.; UMGIESSER, G.; MCKIVER, W.; GHEZZO, M.; PASCALIS, F. DE; PÉREZ-RUZAFÁ, A. Modelling the impact of dredging inlets on the salinity and temperature regimes in coastal lagoons. *Ocean and Coastal Management*, v.180, 1-33, 2019.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Dados meteorológicos. In *Banco de dados meteorológicos*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 16/01/2020.
- KJERFVE, B. Coastal lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). *Coastal lagoon processes*. Elsevier Oceanography Series, 1994. p. 1-8.
- KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. In: WOLFE, D. A. (Ed.). *Estuarine Variability*. Academic Press, 1986. p. 63-81.
- KJERFVE, B.; MAGILL, K. E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, v.88, 187-199, 1989.
- LIMA, A. C. C. de. *Condições hidrodinâmicas e estimativa do tempo de residência no complexo estuarino lagunar Mundaú/Manguaba (AL) através de modelagem computacional*. Maceió, 2017. 102f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2017.
- LUZ, T. E. B.; PINHEIRO, M. K. R.; MATOS, M. F. A. de; AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C. Alterações morfológicas na embocadura do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba, AL/Brasil. In: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, 2021, Recife, PE. ABES, 2021. p. 1-8. (em publicação).
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 425p.
- MULLIGAN, R. P.; MALLINSON, D. J.; CLUNIES, G. J.; REY, A.; CULVER, N. Z.; ZAREMBA, N.; LEORRI, E.; MITRA, S. Estuarine responses to long-term changes in inlets, morphology and sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v.124, n.12, 9235-9257, 2019.
- NUNES, A.; LARSON, M.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. Morphological modeling of long-term inlet channel Evolution with an application to the Mundaú lagoon inlet, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.235, 1-11, 2020.
- OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.37, n.6, 575-591, 1993.
- OLIVEIRA, A.; FORTUNATO, A. B.; REGO, J. R. L. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon (Portugal). *Continental Shelf Research*, v.26, 917-942, 2006.
- OLIVEIRA, D. L.; SOUZA, V. C. B. DE; FRAGOSO JÚNIOR, C. R. Análise hidrológica da cheia excepcional ocorrida em junho de 2010 nas bacias dos rios Mundaú e Paraíba do Meio em Alagoas e Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.19, n.3, 279-293, 2014.
- PANDA, U. S.; MOHANTY, P. K.; SAMAL, R. N. Impact of tidal inlet and its geomorphological changes on lagoon environment: a numerical model study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.116, 29-40, 2013.
- PINHEIRO, M. K. R. *Circulação hidrodinâmica e renovação das águas no complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba para diferentes configurações de embocaduras*. Natal, 2020. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.
- PORTOBRÁS. *Relatório da primeira campanha de medições hidráulicas-sedimentológicas no complexo lagunar Mundaú-Manguaba*. Rio de Janeiro, RJ: INPH, 1984. 41 p.
- ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBaHiA®*. Rio de Janeiro, RJ: Fundação COPPETEC, 2020. 400p.
- SILVA, R. A. G.; ROSMAN, P. C. C. Viabilidade hidro-sedimentológica de um canal de maré projetado no oeste da Lagoa de Araruama - RJ. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.21, n.1, 25-35, 2016.
- USGS. United States Geological Survey. In *Earth Explorer*. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 21/12/2018.
- ZIMMERMAN, J. T. F. Estuarine residence times. In: KJERFVE, B. (Ed.). *Hydrodynamics of Estuaries*. Volume I: Estuarine Physics. CRC Press, 1988. p.75-84.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Agradecemos ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD, projeto n. 88881.068511/2014-01, Edital 071/2013) e o projeto intitulado “Qualidade e circulação de água em ecossistemas costeiros: monitoramento e modelagem para tomada de decisão”.

Recebido em: 19/04/2021

Aceito para publicação em: 05/11/2021