



**Estimativa do Tempo de Renovação da Água do Complexo
Lagunar da Baixada de Jacarepaguá Através de Modelagem Numérica**
Estimation of Time Water Renewal of the Lagoon
Complex of Jacarepaguá Lowland Through the Numerical Model

Luana Riscado de Carvalho Pinto; Alessandro Filippo; Lucio Silva de Souza; Alexandre Macedo
Fernandes; Itamar Almeida de Oliveira; Camila Guedes Viana & Ana Lúcia Travassos Romano

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia,
Departamento de Oceanografia Física, Laboratório de Oceanografia Física (LABOFIS).
Rua São Francisco Xavier, 524 – 4o andar, Bloco F, sala 4126-F, 20550-013, Maracanã, Rio de Janeiro, R.J.
E-mails: riscado.luanacp@gmail.com; amfilippo@gmail.com; luciodesouza@gmail.com;
alxmfr@gmail.com; ialmeida.uerj@gmail.com; cgv.camila@gmail.com; nanatromano@gmail.com*

Recebido em: 22/05/2019 Aprovado em: 01/07/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_289_298

Resumo

O Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá (CLBJ), situado ao sul do município do Rio de Janeiro formado por 5 lagunas costeiras, apresenta um sistema estuarino complexo e altamente produtivo, que sustenta uma rica biodiversidade de plantas aquáticas e animais. O acelerado processo de urbanização ao seu entorno, tem acarretado um intenso processo de eutrofização e assoreamento desses corpos d'água, e que precisa ser melhor compreendido. Assim, o presente trabalho teve como objetivo calcular o tempo de residência (TR) das águas do Complexo através da utilização de um modelo numérico computacional, o MOHID - Water Modelling System. Inicialmente foram feitos testes para se avaliar as respostas do modelo frente os diferentes forçantes, introduzindo primeiramente apenas a maré e posteriormente a descarga dos rios e o regime de vento local. O estudo do TR das águas do complexo foi feito pela implementação do modelo hidrodinâmico acoplado ao modelo de transporte lagrangeano. O cenário construído para simulação considerou os principais forçantes que regem a hidrodinâmica do sistema, maré, descarga dos principais tributários e regime de vento local (hipotético). Os resultados de elevação de nível d'água e circulação obtidos se mostraram bem satisfatórios, com grande semelhança aos dados coletados em campo e com estudos pretéritos. Revelando um alto TR, atingindo uma taxa de renovação máxima de apenas 23% durante o período de 30 dias de simulação, o Canal da Joatinga e a Lagoa de Camorim foram as áreas que apresentaram menor TR, de 7 dias e 12 dias, respectivamente, para uma taxa de renovação de aproximadamente 92%. Para as demais regiões, durante todo o período da simulação, valores de taxa de renovação que variaram entre 59% para Lagoa da Tijuca a 0% para a Lagoa de Marapendi. O regime de troca hídrica das regiões próximas a desembocadura do CLBJ é controlado pelo regime de maré enquanto as regiões mais interiores possuem maior influência dos agentes continentais.

Palavras-chave: Lagunas costeiras; modelagem numérica; tempo de residência; MOHID

Abstract

The Lagoon Complex of Jacarepaguá Lowland (LCJL), located in the south of the of Rio de Janeiro county, formed by 5 coastal lagoons presents a complex and highly productive estuarine system, that sustains a rich biodiversity of aquatic plants and animal. However, due to the rapid urbanization process of its surroundings, it has suffered from high eutrophication and silt build-up in the water body, that need to be better understood. The present work had as a goal to calculate the residence time (RT) of the water in the lagoon complex through a numerical computational model, the MOHID. Initially were made tests in order to evaluate the responses of the model to the introduction of the different forcing, introducing firstly only the tide and later the discharge of the rivers and the local wind regime. The study of the RT of the water complex was made by the implementation of the hydrodynamic model coupled to the lagrangean transport model. The scenario constructed for simulation contained the main forcing that governs the hydrodynamics of the system, tide, discharge of the main tributaries and local wind regime (hypothetical). The results obtained proved to be quite satisfactory, with big similarity with the fields datas and with previous researches. Revealing a high RT, reaching a maximum renewal rate of only 23% during the 30-day simulation period, observing a lower RT for the Joatinga channel and the Camorim Lagoon of 7 days and 12 days, respectively, for a renewal rate of approximately 92%. The other regions during the whole period of the simulation obtained a renewal rate ranging from 59% for the Tijuca Lagoon to 0% for the Marapendi Lagoon. The regime of water exchange of the regions near the mouth of the CLBJ is controlled by the tide regime, while the innermost regions have a greater influence of the continental agents.

Keywords: Coastal Lagoons; numerical model; residence time; MOHID

1 Introdução

Os sistemas lagunares costeiros são caracterizados por serem sistemas pequenos e efêmeros com laminais d'água geralmente rasas, formadas como resultado da variação no nível médio dos mares ao longo de escala de tempo geológica (Kjerfve & Knoppers, 1999), que ficam isolados parcialmente ou totalmente do oceano pelas restingas arenosas (Kjerfve, 1994).

Os balanços hídricos, a qualidade da água e o processo de eutrofização da laguna são dependentes da circulação do sistema, que por sua vez ocorrem por influência direta da variação das marés, descarga fluvial, cisalhamento dos ventos e do balanço de calor da superfície (Kjerfve, 1994; Kjerfve & Magill, 1989), além da ação antrópica.

O tempo de residência (TR), em termos gerais, é definido como o tempo médio que um material dissolvido ou em suspensão reside dentro do sistema antes de ser levado para o mar aberto (Monsen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2004). Grande parte dos sistemas semifechados e de águas costeiras ao redor do mundo estão sendo afetados negativamente por níveis elevados de poluentes, provenientes da descarga exagerada de afluentes domésticos e industriais em seu interior (Carpenter *et al.*, 1998; Cugier *et al.*, 2005; Geva *et al.*, 2006). Assim como acontece com o Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá (CLBJ).

O TR é um conceito superimportante para se estabelecer a “saúde” do corpo d'água submetido a estresses antropogênicos. O estudo feito por Knoppers *et al.* (1991) relacionou o TR da água de lagunas costeiras estranguladas com seu estado trófico e estabeleceu que a carga de nutrientes antropogênicos afeta essa relação, contribuindo para sua eutrofização e anoxia. Cucco & Umgiesser (2006) e Mahanty *et al.* (2016) utilizaram modelos hidrodinâmicos 2D para calcular o TR de Lagoas Costeiras submetidos a diferentes forçantes meteorológicos e oceanográficos, por meio da utilização do modelo lagrangeano de traçadores de partículas passivas.

O presente estudo teve como objetivo calcular o TR das águas do CLBJ, através da implementa-

ção de um modelo hidrodinâmico 2D acoplado ao modelo de transporte lagrangeano, com base na metodologia descrita por Braunschweig *et al.* (2003) e também utilizada no trabalho feito por Kenov *et al.* (2012), para o estudo do TR do estuário de Mondego em Portugal. Usando o método dos volumes finitos, o modelo resolveu os padrões de circulação de todo o complexo induzido pelas três principais forçantes que regem o sistema (maré, descarga fluvial e vento). A variação espacial do TR foi caracterizada pela subdivisão do complexo em caixas, preenchidas com traçadores (partículas lagrangeanas geradas pelo MOHID), e o caminho feito pelas partículas quantificados.

Dada a grande importância do TR para gestão das águas costeiras e de poucos estudos e referências na literatura para a região de estudo, essa foi uma das grandes motivações para a realização desta pesquisa.

2 Área de Estudo

A Baixada de Jacarepaguá (BJ) consiste em um ambiente costeiro situado na planície litorânea da parte sul do município de Rio de Janeiro, limitada geograficamente entre o Maciço da Tijuca à leste, a Serra da Pedra Branca à oeste e o Oceano Atlântico ao sul, abrangendo a área da ponta da Joatinga até a Prainha (Figura 1). Encontra-se a aproximadamente 40 km do centro, entre as latitudes 22°58' W e 23°01' S e longitudes 43°0' e 43°29' W (Soares, 1999) localizada ao sul da cidade do Rio de Janeiro, possui estreita faixa de manguezal distribuída de forma descontínua ao longo de suas margens. Os bosques de mangue apresentam grande variabilidade estrutural. Nos bosques monoespecíficos de Laguncularia racemosa, com dap médio entre 3,4 e 7,7 cm e altura média entre 4,5 e 7,7 m, há predomínio de indivíduos com menos de 10,0 cm de diâmetro. Nos demais pontos, observamos bosques mistos, mais desenvolvidos, dominados ora por Laguncularia racemosa, ora por Rhizophora mangle (dap médio entre 7,8 e 16,7 cm; altura média entre 6,8 e 16,1 m).

Sua bacia hidrográfica possui aproximadamente 300 km², sendo que 176 km² referem-se aos rios drenantes, formada por dois conjuntos fisiográficos distintos: o domínio Serrano, representado por montanhas e escarpas da vertente oceânica dos

Maciços da Pedra Branca e Tijuca e o domínio da Baixada, representado pela planície fluvio-marinha. O domínio da Baixada abriga três das quatro maiores lagoas costeiras restantes no litoral fluminense, formando o Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá (CLBJ), que é composto por três lagoas principais: Jacarepaguá, Tijuca e Marapendi, e duas lagoas menores: Camorim e Lagoinha (PROJCONSULT, 2011), todas interligadas por canais. A Lagoa da Tijuca é a única que tem contato direto e permanente com o oceano, através do Canal da Joatinga, e portanto está sujeita a sofrer maiores influências das águas marinhas (Soares, 1999) localizada ao sul da cidade do Rio de Janeiro, possui estreita faixa de manguezal distribuída de forma descontínua ao longo de suas margens. Os bosques de mangue apresentam grande variabilidade estrutural. Nos bosques

monoespecíficos de *Laguncularia racemosa*, com dap médio entre 3,4 e 7,7 cm e altura média entre 4,5 e 7,7 m, há predomínio de indivíduos com menos de 10,0 cm de diâmetro. Nos demais pontos, observamos bosques mistos, mais desenvolvidos, dominados ora por *Laguncularia racemosa*, ora por *Rhizophora mangle* (dap médio entre 7,8 e 16,7 cm; altura média entre 6,8 e 16,1 m).

O CLBJ está localizado em uma região de micro maré predominantemente semi-diurna, com duas baixa-mares e duas preamares por dia, com ocorrência de desigualdades diurnas (Miranda *et al.*, 2002). Apesar disso, esta força é uma das principais forças geradoras da circulação dentro do Sistema, juntamente com a descarga de seus afluentes.

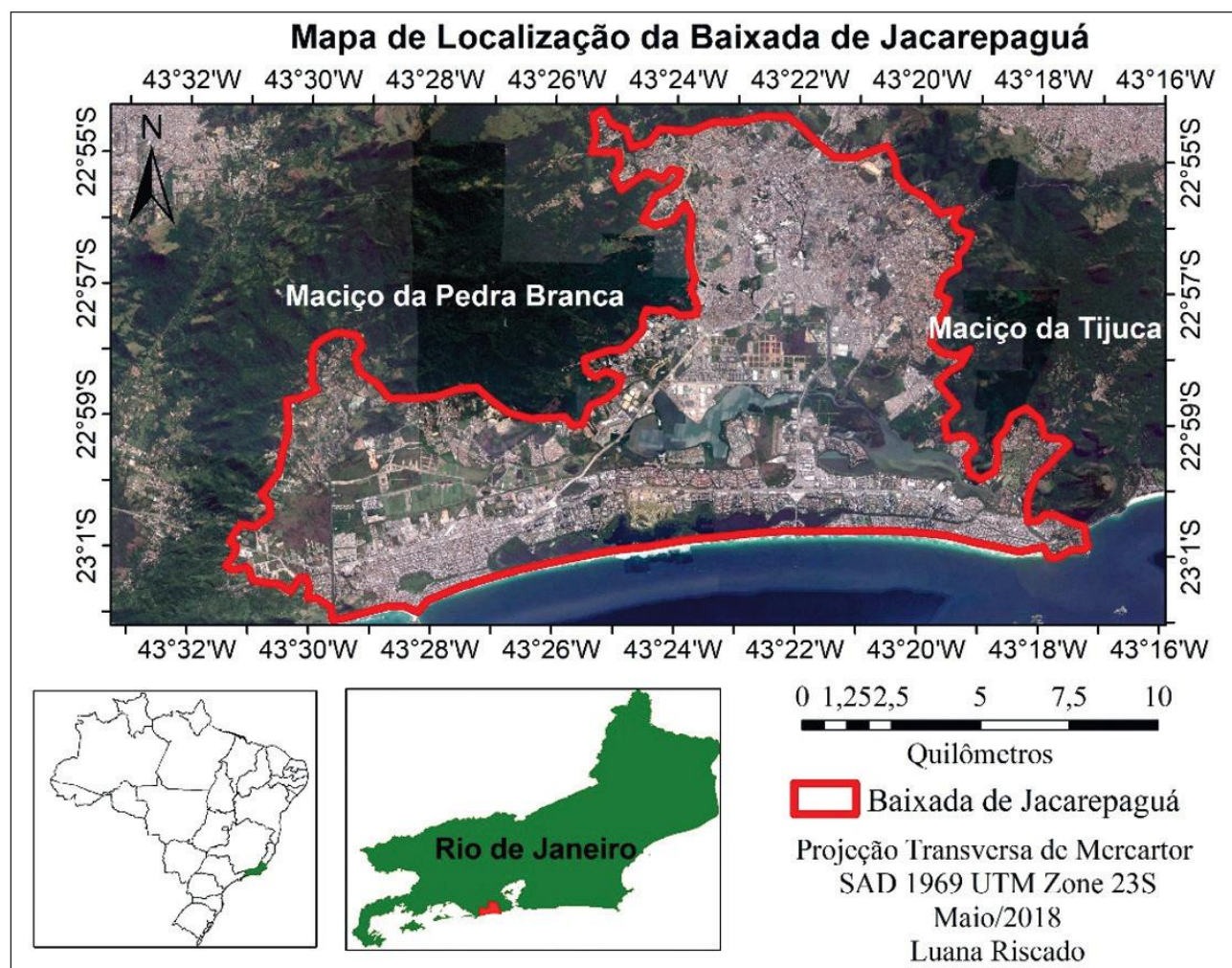


Figura 1 Mapa de localização da Baixada de Jacarepaguá, área de estudo no litoral do Rio de Janeiro.

O clima da região pode ser definido como do tipo “A” segundo a classificação de Köppen adaptada ao Brasil, que é definido de modo geral, como clima tropical quente e úmido – com temperatura média superior a 18°C em todos os meses e com totais de precipitação excedendo a evaporação, tendo invernos brandos e secos e verões quentes e chuvosos (Souto Maior, 1954; Alvares *et al.*, 2014).

A caracterização do regime de ventos em superfície realizado por Pimentel *et al.* (2014) revela um padrão de ventos bem definido nas direções norte e sul, com velocidades máximas de até 7 m/s. Entretanto há uma predominância dos ventos de sul/sudoeste nos períodos da tarde e noite, enquanto que os períodos da madrugada e da manhã contribuem os ventos de menor intensidade do quadrante norte. Revelando uma efetiva atuação das brisas marítima e terrestres na região.

3 Materiais e Métodos

O modelo utilizado nas simulações numéricas desse estudo foi o MOHID (Modelo Hidrodinâmico), que consiste em um modelo tridimensional que utiliza as equações de Navier-Stokes, com base nas aproximações Boussinesq e hidroestática. A discretização espacial das equações são resolvidas numericamente usando o método dos volumes finitos e a discretização temporal utilizada é implementada através do algoritmo semi-implícito (MARETEC, 2012; Franz *et al.*, 2016). É um modelo que permite trabalhar com qualquer número de dimensões espaciais (uni, bi e tridimensional) e, além da hidrodinâmica, admite a simulação simples de processos de transporte e qualidade da água em vários domínios (Neves *et al.*, 2001). A malha foi criada com espaçamento variável, resultando em uma grade com 486x331 pontos nos eixos meridional e zonal, respectivamente, com uma resolução espacial que variou de 50x50 m a 20x10 m. Por ser um corpo hídrico raso e sem estratificação vertical, optou-se pela utilização na forma 2DH (modelo bidimensional no plano horizontal), com apenas uma camada vertical do tipo Sigma.

Os dados de inicialização do MOHID para o presente estudo foram obtidos de fontes diversas. A

linha de costa foi delimitada e digitalizada através de imagens do Google Earth, enquanto os dados batimétricos, do interior do Complexo Lagunar, foram obtidos do relatório técnico da Secretaria do Ambiente do Estado do Rio de Janeiro (PROJCONSULT, 2011). Para a região da costa adjacente, a batimetria utilizada foi provida pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM/MB) obtidos através da digitalização das cartas náuticas das séries 1506 e 1620.

Nos contornos fechados, que constituem os limites territoriais da modelagem, a componente do transporte perpendicular ao contorno foi considerada nula nos pontos de grande sem desembocadura de rio, e nos pontos de grade em que esses estiveram presente foi considerada sua vazão média, retirados de Moraes (2007). Nos contornos abertos, foi imposta a condição de fronteira radiacional para a elevação do nível proposta por Blumberg & Kantha (1985), a qual inclui um termo de amortecimento, que tende a forçar o valor da elevação de nível da água na fronteira do domínio a um valor conhecido, ou medido, dentro de uma escala de tempo.

O estudo do TR foi realizado por meio da construção de um cenário com as principais forçantes que regem a hidrodinâmica do sistema lagunar, possibilitando uma compreensão mais adequada possível da taxa de renovação do sistema. O modelo teve como forçante a maré, descarga dos principais rios que desaguam no complexo e o regime de ventos locais simplificado, que foi construído tendo como base estudos pretéritos do regime de vento local realizados por Pimentel *et al.*, 2014. Recorrendo ao módulo lagrangeano do MOHID, o complexo lagunar foi subdividido em 9 áreas (Figura 2), onde foram lançados traçadores lagrangeanos com cores diferentes em cada uma dessas regiões. A densidade inicial de partículas em cada uma das regiões (ou “caixas”) é calculada através da seguinte equação:

$$\text{Número de partículas} = \frac{\text{Volume da caixa}}{\text{BoxVolic}} \quad \text{BoxVolic}$$

Onde o valor do *BoxVolic* (valor escolhido de forma a obter a quantidade de partículas desejadas) foi o mesmo para todas as regiões, para que o

número de partículas fosse proporcional ao volume das caixas. A Tabela 1 apresenta o número inicial de partículas em cada uma das caixas.

Caixas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nº de Partículas	11	63	12	37	59	21	185	77	38

Tabela 1 Número inicial de partículas em cada uma das caixas

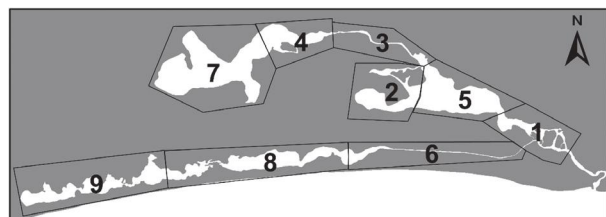


Figura 2 Divisão do CLBJ nas nove regiões em que foram laçados os traçadores lagrangeanos.

O cenário foi simulado por um período de 30 dias (22 de fevereiro a 24 de março de 2014, o qual abrange o período de coleta de dados) a partir do resultado de um aquecimento do modelo de 3 dias, com armazenamento de dados a cada 1 hora sendo o passo temporal de 4 segundos. A validação do modelo foi feita através da comparação dos resultados simulados da elevação de superfície do mar com as previsões feitas com o uso do software PACMARÉ desenvolvido por Franco (2009), a partir de dados coletados em uma estação fixa no Canal da Joatinga, no dia 20 de fevereiro de 2014 por um período de 13 horas. A campanha foi realizada durante um ciclo de maré de sizígia, através da utilização de uma régua graduada fixa a margem do canal, que era lida impreterivelmente a cada 15 minutos.

4 Resultados

4.1 Avaliação da Resposta do Modelo Frente às Diferentes Forçantes

A Tabela 2 abaixo apresenta a taxa de renovação média das águas superficiais do complexo lagunar obtidas durante os estudos de análises da resposta do modelo, frente a introdução das diferentes forçantes. No Experimento 1 onde utilizou-se como forçante apenas a maré, a renovação das águas deu-se principalmente ao longo do Canal da Joatinga. A introdução das descargas dos rios (Experimento 2) ocasionou um aumento de 28,45% na taxa de

renovação média das águas, esse aumento ocorreu principalmente ao longo do subsistema Joatinga-Tijuca-Camorim, devido a maior influência fluvial nessa região. A introdução do vento (Experimento 3) acarretou em uma pequena diminuição (1,64%) do TR médio. Como os ventos associados a passagens de sistemas frontais nessa região fluem preferencialmente de sudoeste (Filippo, 1997), os mesmos geram um empilhamento das águas para dentro do sistema, gerando consequentemente um aumento no TR. Durante essa simulação foi possível observar uma maior movimentação das partículas na região de circulação mais restritas, gerando maior dinamidade e mistura das partículas.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
	Maré	Maré + Rio	Maré + Rio + Vento
Taxa de Renovação média (%)	11,23	39,68	38,04

Tabela 2 Taxas de renovação média

4.2 Variação de Nível da Superfície e Corrente

A figura 3 mostra a localização da estação maregráfica da FEMAR e onde feita a fixação da régua de maré ao longo do Canal da Joatinga. A curva de comparação, usada para validação do modelo, dos dados obtidos pelo modelo, com os dados gerados pelo PACMARÉ e com os dados medidos em campo estão representados na figura 4, abaixo. A tabela 3 apresenta os índices estatísticos obtidos na comparação dos dados.

Os resultados de elevação de nível e das correntes obtidos pelo modelo revelaram que os maiores valores ocorrem ao longo do canal da Joatinga, com 0.63 m e 0.57 m/s, respectivamente. Esses valores tornam-se menores a medida em que se avança para o interior das lagoas, sendo as Lagoas de Jacarepaguá e Marapendi as regiões com menor circulação, obtendo valores médios da amplitude de maré de 0.2 m e 0.15 m, respectivamente.

Nas figuras 4 e 5 pode-se observar as velocidades médias das correntes para o interior de cada uma das lagoas e as variações do nível da superfície da água obtidas nos pontos de monitoramento (exibidos em vermelho), respectivamente.

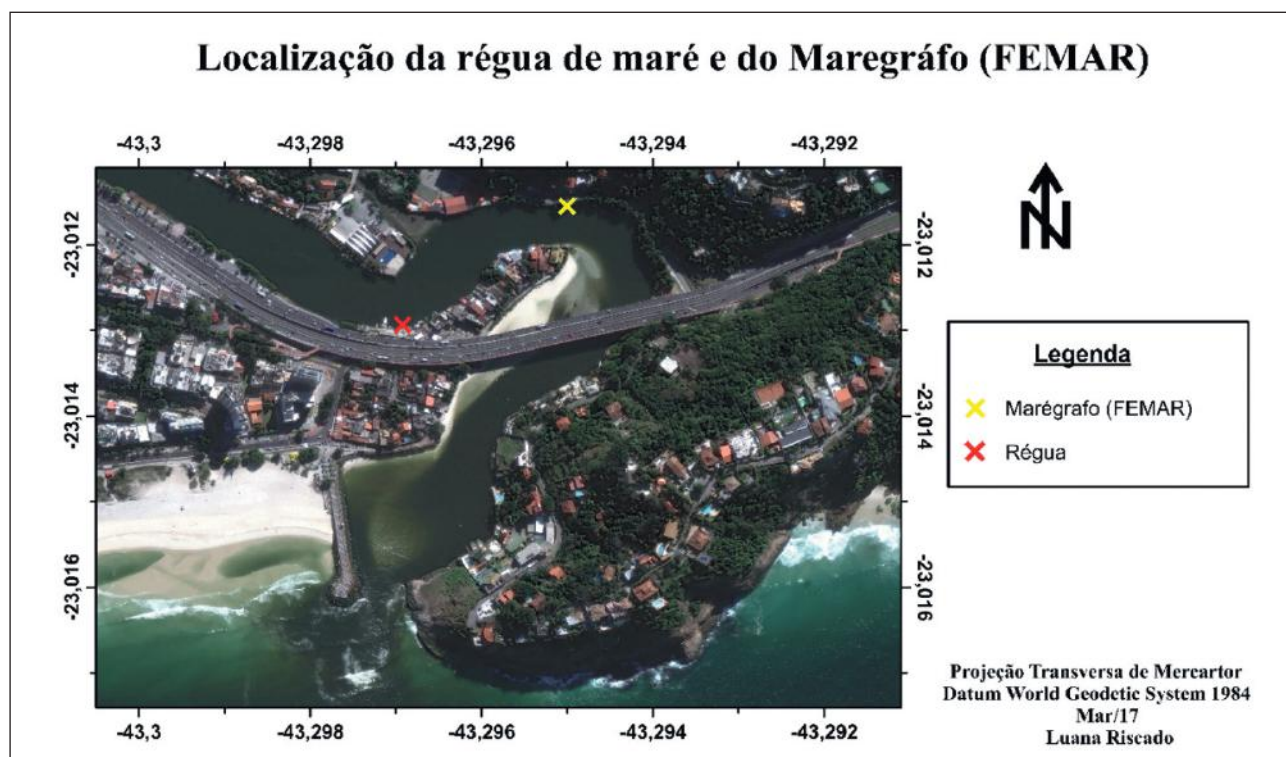


Figura 3 Localização da régua de medição de maré e da estação maregráfica da FEMAR no Canal da Joatinga.

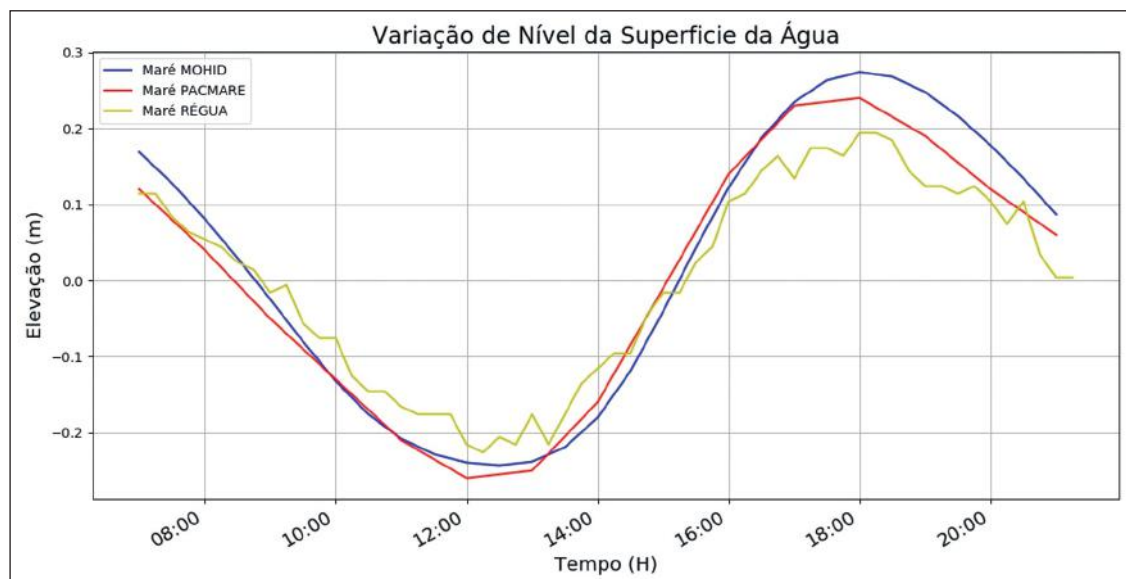


Figura 4 Comparação das amplitudes das marés do Canal da Joatinga obtidas pelo MOHID (em azul), PACMARE (em vermelho) e dados coletados em campo (em amarelo) no dia 20 de fevereiro de 2014.

Índices	MOHID - PACMARE	Régua - MOHID	Régua - PACMARE
RMSE _{re} (%)	9,6352	24,5466	29,8559
R ²	0,94	0,98	0,98
Spearman	0,9379	0,9714	0,9812

Tabela 3 Índices estatísticos da comparação entre os resultados obtidos pelo Mohid, Pacmaré e os dados coletados em campo para o mês de fevereiro de 2014.

Estimativa do Tempo de Renovação da Água do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá Através de Modelagem Numérica

Luana Riscado de Carvalho Pinto; Alessandro Filippo; Lucio Silva de Souza;

Alexandre Macedo Fernandes; Itamar Almeida de Oliveira; Camila Guedes Viana & Ana Lúcia Travassos Romano

Figura 5
Velocidades
médias das
correntes no
CLBJ obtidas
durante a
simulação do
modelo.

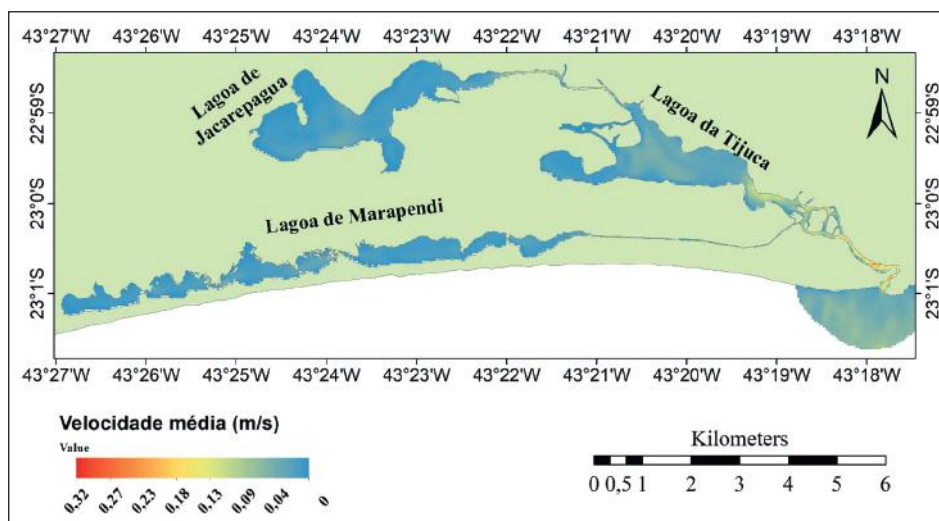
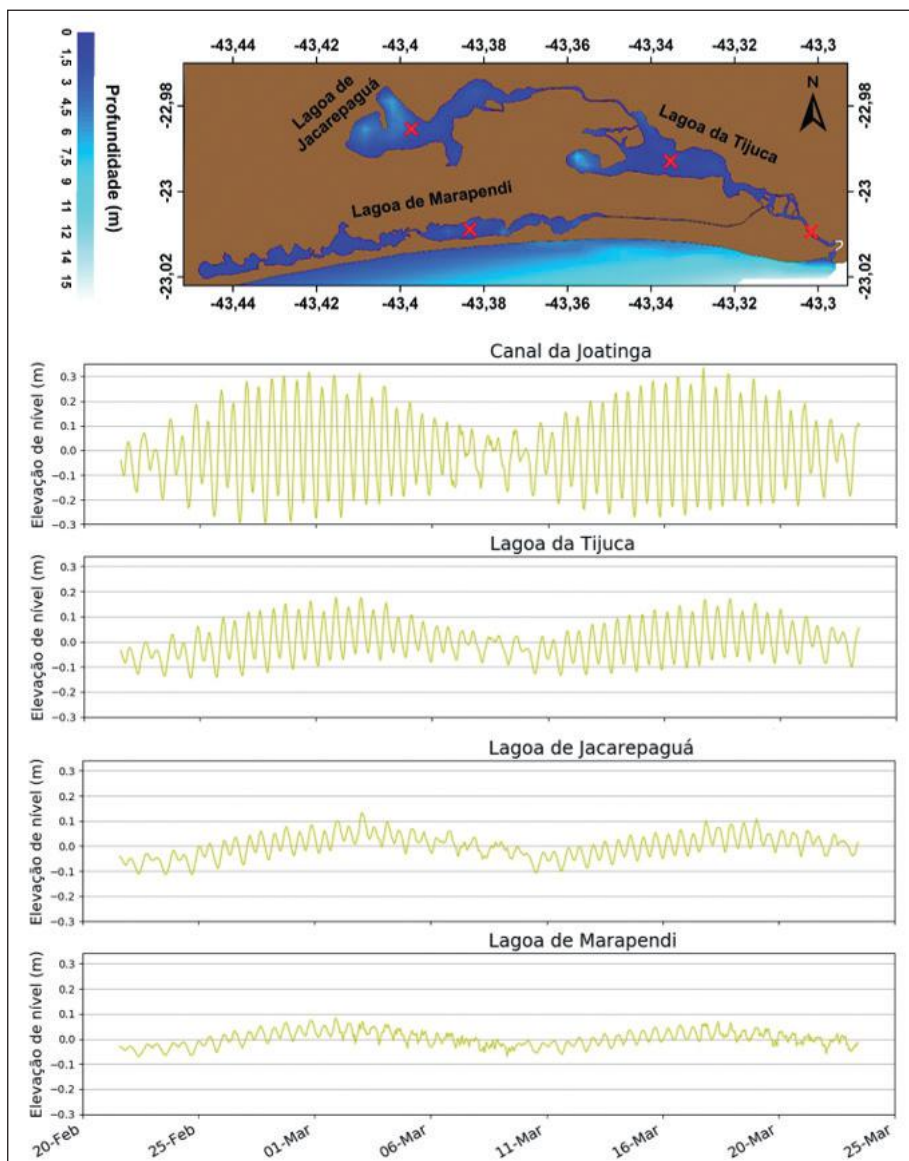


Figura 6 Estações de monitoramento ao longo do CLBJ: Comparação das elevações do nível da superfície no interior das três lagoas e no canal da Joatinga.



4.2 Tempo de Residência

Os resultados obtidos com a simulação revelaram um elevado TR nas regiões mais interiores do complexo, ao longo de todo o Canal e da Lagoa de Marapendi (caixas 6, 8 e 9). Não foi possível identificar uma taxa de renovação das águas nessas áreas do CLBJ, provavelmente, devido a sua forma estreita e alongada e sem descarga de água doce e onde a intensidade das correntes eram baixas e as partículas se deslocavam pouco espacialmente (Figura 4), independentemente do tempo de simulação. No entanto, foi possível observar uma certa mistura dos derivadores entre as diferentes áreas. No extremo oeste da Lagoa de Jacarepaguá (caixa 7), a taxa de renovação foi de apenas 1,64% ao longo de todo o período simulado, e foi observado uma grande mistura de águas entre as diferentes caixas. O subsistema Joatinga-Tijuca-Camorim (caixas 1, 3 e 5) foi a região que apresentou maior taxa de renovação, com mais 90% dos seus traçadores deixando o sistema. No Canal da Joatinga o TR foi de apenas 7 dias, devido a sua proximidade com a embocadura do complexo, enquanto, na Lagoa de Tijuca, esse tempo foi de 30 dias. Apesar da Lagoa de Camorim se localizar mais distante da foz do que a lagoa da Tijuca seu TR foi de apenas 12 dias, devido a seu menor tamanho e pelo fato de um dos principais rios desaguar em seu corpo hídrico, favorecendo assim o deslocamento de suas águas sempre a jusante no sistema, em direção a desembocadura.

Na tabela 4 abaixo pode-se observar o TR e a taxa de renovação obtida em cada uma das 9 regiões durante todo o período simulado.

Caixas	Tempo de residência (dias)	Taxa de renovação (%)
1	7	94,44
2	30	33,33
3	12	91,67
4	30	33,33
5	30	87,93
6	30	0,00
7	30	1,64
8	30	0,00
9	30	0,00

Tabela 4 Tempo de residência e taxa de renovação dos traçadores lagrangeanos de cada região (caixa) nos três cenários.

A resposta do modelo à introdução das diferentes forçantes revelou que o MOHID reproduziu de forma satisfatória a resposta hidrodinâmica, fornecendo resultados diferentes em cada uma das análises. A partir dos experimentos numéricos realizados foi possível notar que a dispersão dos traçadores lagrangeanos é modulada, principalmente, pela forçante de maré no Canal da Joatinga, enquanto a parte central da Lagoa da Tijuca, Camorim e a parte leste da Lagoa de Jacarepaguá possui uma maior influência das descargas dos rios, devido à proximidade com os principais tributários. Nas demais áreas o vento entra como uma forçante importante para dispersão das partículas em suspensão.

5 Discussão

O estudo de corpos costeiros é uma tarefa que exige cuidados em decorrência da complexidade de sua dinâmica. Lagoas costeiras do tipo estrangulada, assim como as Lagoas de Jacarepaguá, apresentam uma heterogeneidade hidrológica fortemente influenciada pelas condições meteorológicas, entradas continentais e trocas de água com a região costeira, no qual acabam apresentando uma capacidade de tamponamento restrita e uma heterogeneidade das propriedades físico-químicas da água. Desse modo, avaliá-los de maneira segmentada, como foi feita nesse trabalho, é uma alternativa para aprimorar o gerenciamento desses sistemas (Seiler, 2014).

A variação de nível no interior lagunar é fortemente influenciada pela significativa perda de energia do escoamento ao longo do Canal da Joatinga como consequência de suas características morfológicas, que geram um acentuado amortecimento e defasagem na onda de maré, assim como visto pelo trabalho realizado por Falcao (1995). Consequentemente, as lagoas mais interiores possuem maior TR comparado com as localizadas mais próximas a costa, devido a maior efetividade da troca hídrica com oceano. Corroborando com resultado já obtido por Knoppers *et al.* (1991) em estudo realizado nas lagoas ao longo do litoral oeste Fluminense.

A aplicação da modelagem numérica na gestão de ambientes dinâmicos possibilita uma maior visualização da distribuição espacial e temporal das

variáveis de interesse do que os dados discretos adquiridos em campo, embora dados medidos sejam essenciais para garantir a fiabilidade dos resultados do modelo. Portanto, apesar do presente estudo ter obtido resultados satisfatórios é necessário se fazer uma análise mais detalhada de todo o complexo. E para isso uma maior quantidade de dados ao longo de todo o sistema é requerida, através de estações maregráficas e meteorológicas, bem como coletas de dados de corrente, para que se possa garantir a comparabilidade dos dados obtidos pelo modelo e um melhor entendimento de sua dinâmica.

No geral, existem duas abordagens de modelagem para calcular o TR: o método Euleriano e o Lagrangeano. Enquanto o método euleriano é capaz de fornecer um retrato em alta resolução sobre a idade da água e de computar a taxa de renovação em escala global e local, esta abordagem deixa a desejar com relação ao monitoramento da posição da parcela de água desde a origem, no tempo e no espaço. Por sua vez, através da utilização do método lagrangeano, método usado no presente trabalho, é possível mapear a origem e o deslocamento das águas, conhecimento importante quando se trata de regiões que possuem áreas entremarés, como é caso de corpos d'água costeiros (Kenov *et al.*, 2012).

A escolha de uma representação 2D pode ser justificada pela pequena profundidade das lagunas e por apresentar um tempo de execução bem menor, quando comparado as simulações em 3D. No entanto, a modelagem em 2D apresenta limitações pois é incapaz de representar as velocidades e os gradientes das propriedades da água ao longo da profundidade, modelando a hidrodinâmica na hipótese de uma coluna d'água verticalmente homogênea.

As correntes de densidade, geradas em água com estratificação vertical de densidade, afeta o TR. Portanto, em corpos d'água com canais profundos (> 2 m) e onde o gradiente de densidade vertical é importante, a utilização de modelos 2D pode apresentar um erro significativo (Kenov *et al.*, 2012).

As descargas fluviais possuem grande influência no TR do sistema. Portanto, para trabalhos futuros, é importante de que se leve em consideração a taxa de precipitação da região, pois esta influencia

diretamente na vazão dos rios. Morais (2007) verificou mudanças significativas na hidrodinâmica do CLBJ com a ligação do mesmo ao Canal das Taxas, fazer um estudo do TR nesse cenário também seria uma opção importante a ser abordada.

6 Conclusão

Com base nos resultados desse estudo, pode-se concluir que a implementação do modelo hidrodinâmico MOHID, de maneira geral, demonstrou-se satisfatória, apresentando características descritas em outros estudos e uma correspondência com os dados observados em campo. O Sistema Lagunar, de maneira geral, possui elevado TR, atingindo uma taxa de renovação de apenas 23% durante todo período simulado com regiões de circulação bem restritas, pela presença de canais estreitos, e com acelerado processo de assoreamento devido à grande pressão antrópica presente em seu entorno, que vem causando sérios danos ambientais ao sistema.

A investigação da influência do TR para qualidade da água do corpo hídrico é uma abordagem que pode ser estudada como proposta de trabalho futuro, usando o modelo hidrodinâmico, uma vez que se conhece a importâncias ecológica e social desses sistemas.

7 Referências

- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M. & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728.
- Blumberg, A.F. & Kantha, L.H. 1985. Open Boundary Condition for Circulation Models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2): 237 - 255.
- Braunschweig, F.; Chambel, P.; Martins, F. & Neves, R. 2003. A methodology to estimate the residence time of estuaries. *Ocean Dynamics*, 53: 137 - 145.
- Carpenter, S.R.; Caraco, N.F.; Correl, D.L.; Howarth, R.W.; Sharpley, A.N. & Smith, V.H. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications Ecological Society of American*, 8(3): 559 - 568.
- Cucco, A. & Umgiesser, G. 2006. Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological Modelling*, 193: 34 - 51.
- Cugier, P.; Billen, G.; Guillaud, J.F.; Garnier, J. & Ménesguen, A. 2005. Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. *Journal of Hydrology*, 304(1 - 4): 381 - 396.
- Falcao, M.M. 1995. *Estudo da Circulação Hidrodinâmica no*

- Sistema Lagunar de Jacarepaguá*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 120p.
- Filippo, A.M. 1997. *Passagem de frentes frias na Baía de Guanabara: impacto no nível do mar*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal Fluminense, Dissertação de Mestrado, 79 p
- Franco, A. Dos S. 2009. *Marés. Fundamentos, análise e previsão*. 2ª ed. Niterói, DHN. 336p.
- Franz, G.A.S.; Leitão, P.; Santos, Dos A.; Juliano, M. & Neves, R. 2016. From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: Case study of Paranaguá estuarine system. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(3): 277 - 294.
- Gevao, B.; Beg, M.U.; Al-Omar, A.; Helaleh, M. & Zafar, J. 2006. Spatial distribution of polychlorinated biphenyls in coastal marine sediments receiving industrial effluents in Kuwait. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 50(2): 166 - 174.
- Kenov, I.A.; Garcia, A.C. & Neves, R. 2012. Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106: 13 - 22.
- Kjerfve, B. 1994. *Coastal Lagoons*. In: Coastal Lagoons Process. Columbia, Elsevier Science Publisher B.V. p. 1 - 8.
- Kjerfve, B. & Knoppers, B.A. 1999. Physical characteristics of lagoons of the East Fluminense Coast, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems*, 6: 57 - 67.
- Kjerfve, B. & Magill, K. E. 1989. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88(3 - 4): 187 - 199.
- Knoppers, B.; Kjerfve, B. & Carmouze, J.P. 1991. Trophic state and water turn-over time in six choked coastal lagoons in Brazil. *Biogeochemistry*, 14: 149 - 166.
- Mahanty, M.M.; Mohanty, P.K.; Pattnaik, A.K.; Panda, U.S.; Pradhan, S. & Samal, R.N. 2016. Hydrodynamics , temperature / salinity variability and residence time in the Chilika lagoon during dry and wet period : Measurement and modeling. *Continental Shelf Research*, 125: 28 - 43.
- MARETEC. 2012. *Descrição do MOHID*. 1. ed. Campo dos Goytacazes, Essentia Editora.132p.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M. & Kjerfve, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. 1. ed. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo. 411p.
- Monsen, N.E.; Cloern, J.E.; Lucas, LV. & Monismith, S.G. 2002. The use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnology and Oceanography*, 47(5): 1545 - 1553.
- Morais, A. 2007. *Análise de alternativas hidrodinâmicas para o sistema lagunar da Baixada de Jacarepaguá*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado. 146p.
- Neves, R.; Silva, A.; Braunschweig, F.; Leitão, P.C; Wandel, R.; Pina, P & Pita, G. 2001. Hidroinformática e otimização da gestão de ecossistemas aquáticos A Hidroinformática em Portugal. In: SEMINÁRIO A HIDROINFORMÁTICA EM PORTUGUAL, Lisboa, 2001. *Trabalho Completo*, Lisboa, LNCE, p.2-13.
- Pimentel, L.C.G.; Marton, E.; Silva, M.S. & Jourdan, P. 2014. Caracterização do regime de vento em superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 19(2): 121 - 132.
- PROJCONSULT. *Recuperação Ambiental do Complexo Lagunar da Baixada de Jacarepaguá*, RJ. Rio de Janeiro, 2011.
- Seiler, L.M.N. 2014. *Modelagem numérica da Lagoa dos Patos: variação espacial e temporal da qualidade da água*. Programa de Pós-graduação em Oceanografia Geológica, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado. 165p.
- Soares, M.L.G. 1999. Estrutura vegetal e grau de perturbação dos manguezais da Lagoa da Tijuca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. *Revista Brasileira de Biologia*, 59(3): 503 - 515.
- Souto Maior, A.S. 1954. Tipos climáticos do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geografia*, 6: 267 - 275.
- Wang, C.F.; Hsu, M.H. & Kuo, A.Y. 2004. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60(3): 381 - 393.