

## MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE PLUMAS DE EFLUENTES COM BASE NO FÓSFORO NA ZONA COSTEIRA DA REGIÃO METROPOLITANA DA BAIXADA SANTISTA (SÃO PAULO, BRASIL)

### Samuel Hora Yang <sup>(1)</sup>

Oceanógrafo graduado pelo Centro Universitário São Judas Tadeu (Campus UNIMONTE), com Mestrado e Doutorado em Ciências Ambientais pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Possui experiência com modelagem numérica (ênfase em hidrodinâmica costeira, emissários submarinos, dispersão de efluentes e qualidade da água) e com tratamento de dados meteorológicos e oceanográficos. Currículo Lattes: <<https://lattes.cnpq.br/9526942756788572>>. ORCID: 0000-0002-3920-6829.

### Joseph Harari <sup>(2)</sup>

Professor associado (livre-docente) no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, atuante no Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica. Possui experiência na área de Oceanografia Física (ênfase em circulação costeira, modelagem hidrodinâmica, modelagem de dispersão, análise de séries temporais, marés, monitoramento do nível médio do mar e processamento de dados de altimetria de satélite). Currículo Lattes: <<https://lattes.cnpq.br/5626018595035359>>. ORCID: 0000-0002-7094-4504.

### Elisabete de Santis Braga <sup>(3)</sup>

Professora titular no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, atuante no Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica. Possui experiência na área de Oceanografia Química (ênfase em bioquímica marinha, ciclos biogeoquímicos nos oceanos, metais pesados, nutrientes e poluição marinha). Currículo Lattes: <<https://lattes.cnpq.br/9298544294588050>>. ORCID: 0000-0001-5780-3814.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Praça do Oceanográfico, N.º 191, Sala 193 – Butantã – São Paulo (SP) – CEP: 05508-120 – Brasil – Telefone: + 55 (11) 3091-6576 – E-mail: samyang.93@gmail.com.

## RESUMO

O objetivo deste estudo foi monitorar a dispersão de plumas de efluentes fosforados oriundas dos emissários submarinos e das fontes difusas de poluição (rios, córregos e canais) situadas na Baixada Santista, através do processamento de dois modelos numéricos: o *Delft3D* (módulos hidrodinâmico e de qualidade da água) e o *Visual Plumes* (módulo UM3). A modelagem de campo próximo mostrou que tanto as correntes de maré como as correntes geradas pelo vento afetam a dispersão e a diluição inicial das plumas dos emissários; enquanto que a modelagem de campo distante, validada qualitativamente, apresentou eventuais índices de baixa qualidade da água na zona costeira (indicados por níveis de fósforo acima do limite máximo do Conselho Nacional do Meio Ambiente), os quais não foram causados somente pelas plumas dos emissários submarinos, mas também pelas contribuições de plumas das fontes difusas de poluição (associadas a esgoto bruto).

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem numérica, qualidade da água, fósforo.

## INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são muito importantes em termos ambientais e socioeconômicos, sendo estimado que mais da metade da população mundial concentre-se a menos de 60 km do litoral (ROBERTS *et al.*, 2010). Tal ocupação combinada com as atividades desenvolvidas nas regiões costeiras pode produzir impactos ambientais negativos que podem ser prejudiciais à sociedade, como por exemplo, os problemas associados ao descarte de esgotos domésticos ou industriais em sua forma bruta (sem nenhum tipo de tratamento) diretamente no oceano, o que pode vir a causar alterações das características físico-químicas e da qualidade sanitária da água, e consequentemente, a proliferação de patógenos nocivos à saúde humana, além de também poder prejudicar o turismo, que é a principal fonte de renda de muitas cidades litorâneas (YANG, HARARI & BRAGA, 2019).

Por outro lado, o lançamento de esgoto no oceano por meio de emissários submarinos é uma opção viável economicamente em relação aos sistemas de tratamento de esgoto sanitário padrão, visto que quando os emissários submarinos estão bem dimensionados e operando corretamente, trazem benefícios em termos de qualidade da água e balneabilidade das praias. Ademais, a aplicação e desenvolvimento de modelos numéricos para análises hidrodinâmicas e de qualidade da água é muito útil para a realização de monitoramentos ambientais em regiões costeiras, por possibilitar simulações da dispersão de plumas, lançadas por emissários submarinos e/ou por fontes difusas, com uma elevada precisão (YANG, HARARI & BRAGA, 2019).

A modelagem de plumas de emissários submarinos considera que a mistura dos efluentes na água ocorre em três zonas: o campo próximo, onde ocorrem os processos iniciais de mistura e de dispersão das plumas, sendo que as características da tubulação difusora e da hidrodinâmica local são importantes nesses processos; o campo intermediário, onde a pluma alcança seu equilíbrio hidrostático no ambiente; e o campo distante, onde a dispersão passa a ocorrer exclusivamente pelos processos advectivos e difusivos, assim que a pluma alcança o seu equilíbrio hidrostático (MORELISSSEN, VAN DER KAAIJ & BLENINGER, 2013).

## OBJETIVOS

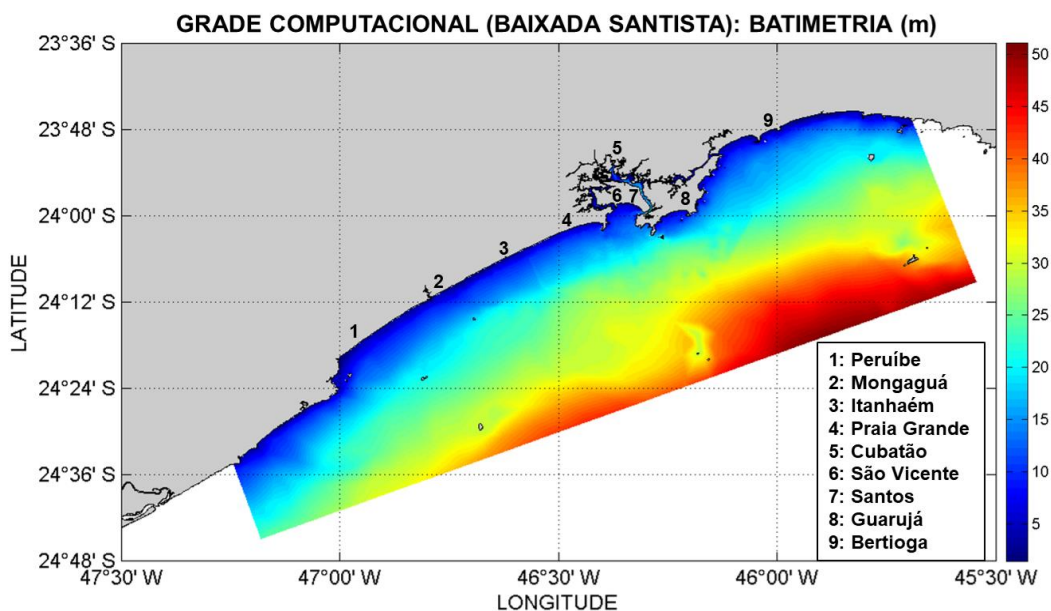
O objetivo do presente trabalho foi analisar a dispersão das plumas de fósforo emitidas pela operação simultânea dos emissários submarinos de Praia Grande, Santos e Guarujá, além das demais fontes de poluição (rios, córregos e canais) presentes na Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), através do processamento de modelos numéricos. Ademais, este estudo também analisou os índices de qualidade da água nas proximidades da zona costeira da RMBS, diante dos níveis máximos estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para a substância química em questão.

## METODOLOGIA

### ÁREA DE ESTUDO

A RMBS está localizada no litoral central do Estado de São Paulo (Brasil), e abrange um total de nove municípios (Peruíbe, Itanhaém, Mongaguá, Praia Grande, Cubatão, São Vicente, Santos, Guarujá e Bertioga), que em 2021 abrigavam uma população fixa estimada em 1.897.551 habitantes (CETESB, 2022). A Figura 1 ilustra a delimitação da área de estudo, além da batimetria local (em metros) e da localização dos municípios.

**Figura 1 - Delimitação da área de estudo em conjunto com a sua batimetria (em metros), e localização dos nove municípios pertencentes à RMBS.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

Em termos de saneamento básico, a RMBS atualmente dispõe de cinco emissários submarinos, sendo três situados no município de Praia Grande, um no município de Santos (que também atende o município de São Vicente), e um no município de Guarujá (SABESP, 2013); além de um total de 14 estações de tratamento de esgoto (CETESB, 2022). Entretanto, também deve ser ressaltado que ao considerar todos os municípios da RMBS, até o presente momento não se constata nenhuma estrutura que assegure 100% de coleta e tratamento de esgoto, e conseqüentemente, parte dos efluentes acaba sendo despejada de modo inadequado (esgoto bruto e sem qualquer tipo de tratamento) diretamente em corpos d'água (ex.: rios, estuários, canais e córregos) que possuem o oceano como destino final (RUIZ, 2016; NPH, 2017).

## MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A etapa de modelagem hidrodinâmica tridimensional foi realizada através do módulo hidrodinâmico do modelo numérico *Delft3D*, o D3D-FLOW (DELTARES, 2023a), e para tanto, foi estabelecida uma grade computacional de 520 por 180 células (ver limites na Figura 1), com espaçamento horizontal de 350 metros, e espaçamento vertical composto por um total de 15 camadas do tipo Sigma. A batimetria associada à grade computacional (ver profundidades na Figura 1) foi adquirida a partir da Folha de Bordo FB-1700-005/82 da Marinha do Brasil (BAPTISTELLI, 2008); cinco cartas náuticas (Números 1711, 1712, 1713, 23100 e 23200) também pertencentes à Marinha do Brasil (DHN, 2018); e dados batimétricos coletados *in situ* pelo Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo (CTHUSP) e pelo Instituto de Pesquisas Ambientais do Estado de São Paulo (IPASP), respectivamente conforme Roversi (2012) e Souza *et al.* (2019).

O D3D-FLOW foi processado para os meses de agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), com passo de tempo de um minuto. Como forçantes hidrodinâmicas nos contornos abertos da grade, prescritos como do tipo *Riemann* (WALSH, 1973), foram consideradas: as marés astronômicas (componentes M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, e Ssa), extraídas a partir do modelo global de marés *TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution* (TPXO) (EGBERT, BENNETT & FOREMAN, 1994); além da elevação do nível médio do mar e dos perfis verticais de correntes, temperatura e salinidade, produzidos pelo modelo oceânico global do *Copernicus Marine Environment Monitoring System* (CMEMS) (LE GALLOUDEC *et al.*, 2022). Já as forçantes meteorológicas na superfície da grade, representadas por vento, pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, nebulosidade, temperatura atmosférica e umidade relativa do ar, foram adquiridas do modelo atmosférico global *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) (VED & NAIHU, 2014).

Por fim, a validação hidrodinâmica do D3D-FLOW foi realizada através da correlação dos seus resultados de correntes (componente zonal e componente meridional) com os resultados gerados pelo modelo oceânico global *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) (BLECK, 2002), o qual já está devidamente validado (CHASSIGNET *et al.*, 2009). Para tanto, foram realizados os cálculos do *Absolute Mean Statistic Error* (AMSE) e do *Root Mean Square Error* (RMSE), sendo que ambos possuem valor ideal zero; e foi também calculado o *Index of Agreement* (IOA), que possui valor ideal igual a um. Detalhes adicionais sobre esses métodos de validação estão em Willmott (1981) e Willmott (1982).

## MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA

Quanto às fontes pontuais de poluição presentes na RMBS (representadas por emissários submarinos), foram considerados: os três emissários submarinos de Praia Grande (PG1, PG2 e PG3), o emissário submarino de Santos, e o emissário submarino de Guarujá (a Figura 2 disponibiliza as posições de lançamento das plumas dos cinco emissários submarinos locais). Por outro lado, em relação às fontes difusas de poluição presentes na RMBS (representadas por rios, córregos e canais), após a realização de uma extensa revisão bibliográfica de documentos pertencentes à Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), e ao Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas (NPH) da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), o presente estudo considerou adicionalmente 73 descargas difusas. Informações completas e maiores detalhes a respeito de todas as fontes de poluição (pontuais e difusas) consideradas no presente estudo estão disponíveis em Yang (2022).

Para a modelagem da dispersão das plumas, foi selecionado o fósforo como indicador de qualidade da água, cujo limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA N.º 357/2005 é de 0,062 mg/L em água salgada; e de 0,124 mg/L em água salobra (BRASIL, 2005). Quando este limite é superado, indica riscos e efeitos negativos à saúde humana, além de alterações nas propriedades da água em relação à manutenção da biota marinha, bem como desencadear o processo de eutrofização; portanto, seu acompanhamento em simulações numéricas pode contribuir com ações de preservação e de monitoramento ambiental. Neste estudo, a modelagem de qualidade da água foi realizada em duas etapas (campo próximo e campo distante).

Na modelagem de campo próximo, foi usado o modelo numérico *Visual Plumes* (VP), no caso, seu módulo *Three Dimensional Updated Merge* (UM3), um modelo lagrangeano 3D que calcula a diluição inicial de plumas de emissários submarinos, por meio das equações de conservação (de massa, de *momentum* horizontal, de energia e de salinidade) e do decaimento, descritas em Baumgartner, Frick & Roberts (1994). Nesta primeira etapa, foram utilizadas as especificações técnicas das tubulações difusoras dos cinco emissários submarinos da RMBS (PG1, PG2, PG3, Santos e Guarujá), fornecidas por Ortiz, Garcia & Subtil (2011); Baptistelli & Marcellino (2016); Ortiz, Yanes & Braulio Neto (2016); e Yang, Harari & Braga (2019). As concentrações sazonais de fósforo nos efluentes lançados pelos cinco emissários submarinos mencionados foram obtidas em SABESP (2006a) para o emissário de Santos; em SABESP (2006b) para os emissários PG1 e PG2; e estimadas para os emissários PG3 e de Guarujá, com base na quantidade máxima de habitantes atendida por tais emissários, conforme Ortiz, Yanes & Braulio Neto (2016). Deve ser ressaltado que a modelagem de campo próximo das plumas dos emissários submarinos foi realizada com lançamentos contínuos e constantes de fósforo a cada hora, com o contaminante (não conservativo) tendo uma taxa de decaimento constante equivalente a  $0,03\text{ d}^{-1}$ , valor padrão sugerido por King (2016).

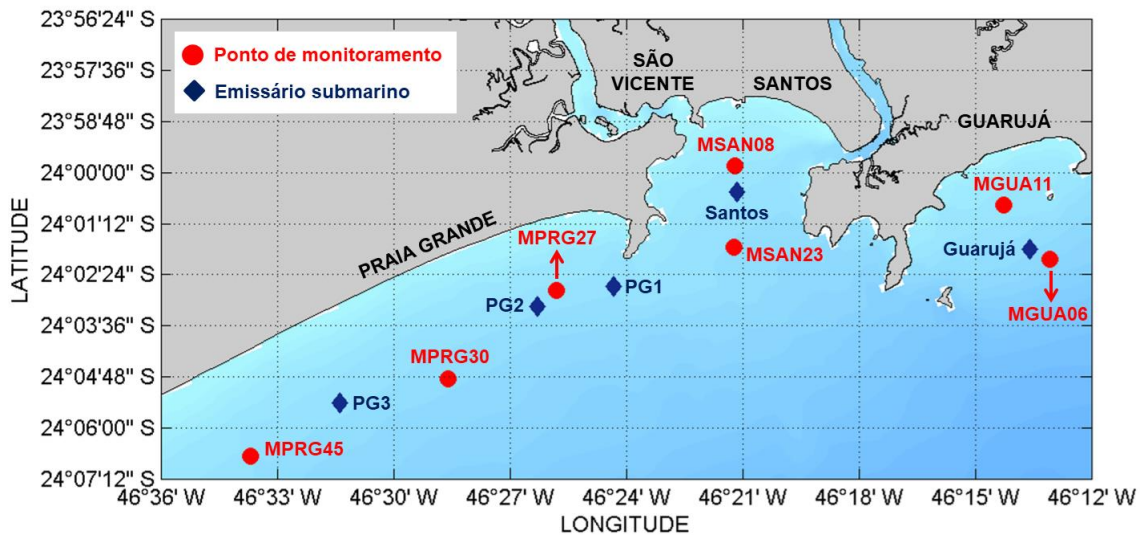
Subsequentemente, foi realizada a modelagem de campo distante, por meio do módulo de qualidade da água do modelo numérico *Delft3D*, o D3D-WAQ (DELTARES, 2023b). No D3D-WAQ, os resultados hidrodinâmicos (da modelagem realizada no D3D-FLOW) e da modelagem de campo próximo dos cinco emissários submarinos (realizada no VP-UM3) foram inseridos juntamente com informações sobre as plumas das 73 fontes difusas de poluição da RMBS (rios, córregos e canais), as quais foram consideradas apenas nessa etapa de campo distante, também com um lançamento contínuo e constante de fósforo a cada hora, e com taxa de decaimento constante de  $0,03\text{ d}^{-1}$ , conforme sugerido pelo próprio modelo D3D-WAQ. As médias sazonais das vazões nas fontes difusas foram obtidas em Sampaio *et al.* (2008), NPH (2017), Yang *et al.* (2019) e Ribeiro (2021); enquanto suas médias sazonais de concentração de fósforo foram extraídas de Coelho (2013), Gandra (2016), Novaes Júnior (2017), InfoÁguas (2021) e Sutti *et al.* (2022).

Para a realização da validação dos resultados do modelo D3D-WAQ, foi selecionado um total de sete pontos de monitoramento, os quais são coincidentes com locais de amostragens *in situ* realizadas pela SABESP, cujas localizações estão disponibilizadas na Figura 2. Para tanto, foi aplicado o método de validação qualitativa de Yang (2022), com a comparação das ordens de grandeza das concentrações sazonais médias de fósforo que foram obtidas nesses pontos pelo modelo D3D-WAQ e pelas coletas *in situ* feitas pela SABESP nas regiões costeiras dos municípios de Praia Grande (SABESP, 2006b), Santos (SABESP, 2006a) e Guarujá (SABESP, 2013). O método de validação qualitativa considerou o modelo D3D-WAQ validado somente quando a ordem de grandeza dos resultados coincidiu em pelo menos 50% do total de amostragens, ou seja, nesse caso, no mínimo sete validações em 14 testes de comparação.





**Figura 2 - Localização dos sete pontos de monitoramento selecionados para a realização da validação qualitativa do modelo D3D-WAQ, e dos cinco emissários submarinos da RMBS.**



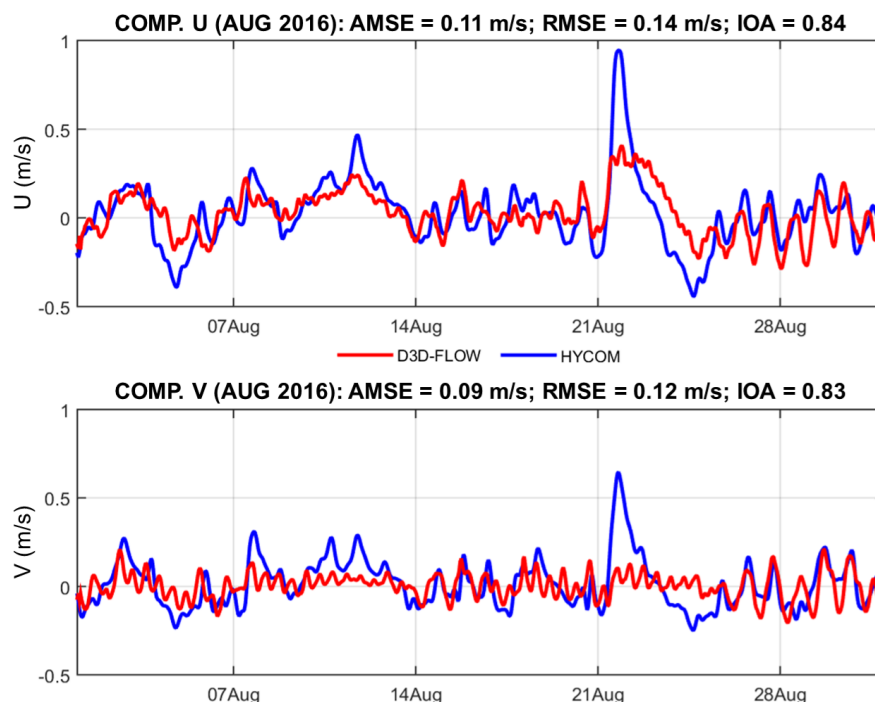
Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

## RESULTADOS

### MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Resultados da validação do modelo D3D-FLOW, incluindo os valores adquiridos nos cálculos dos parâmetros de validação (*AMSE*, *RMSE* e *IOA*), referentes à variação temporal da componente U (zonal) e da componente V (meridional) das correntes, nos meses de agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), encontram-se respectivamente nas Figuras 3 e 4.

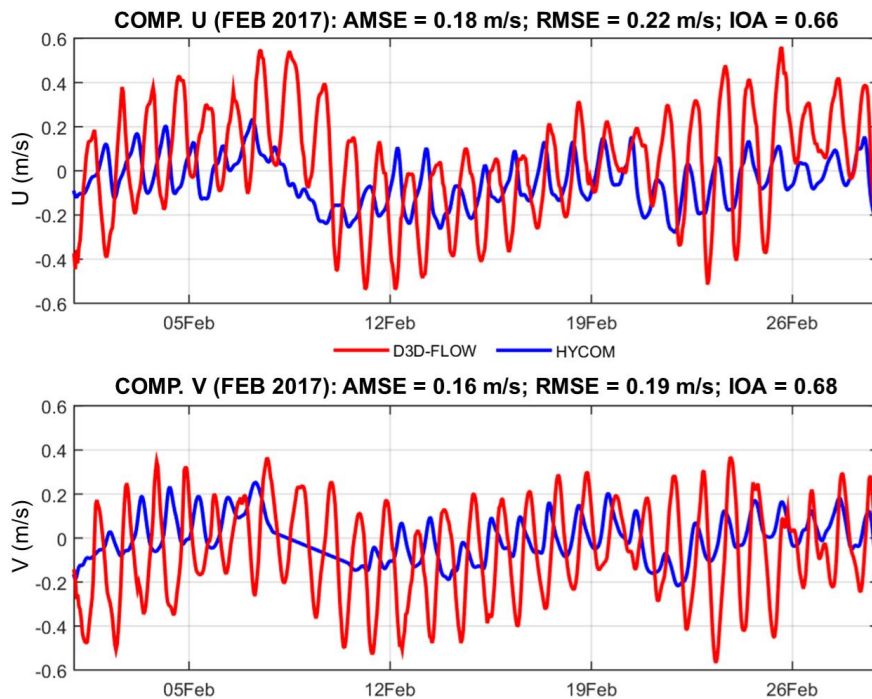
**Figura 3 - Séries temporais da componente U (zonal) e componente V (meridional) das correntes (m/s) no centro da grade computacional, em agosto de 2016, junto com os cálculos de validação.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).



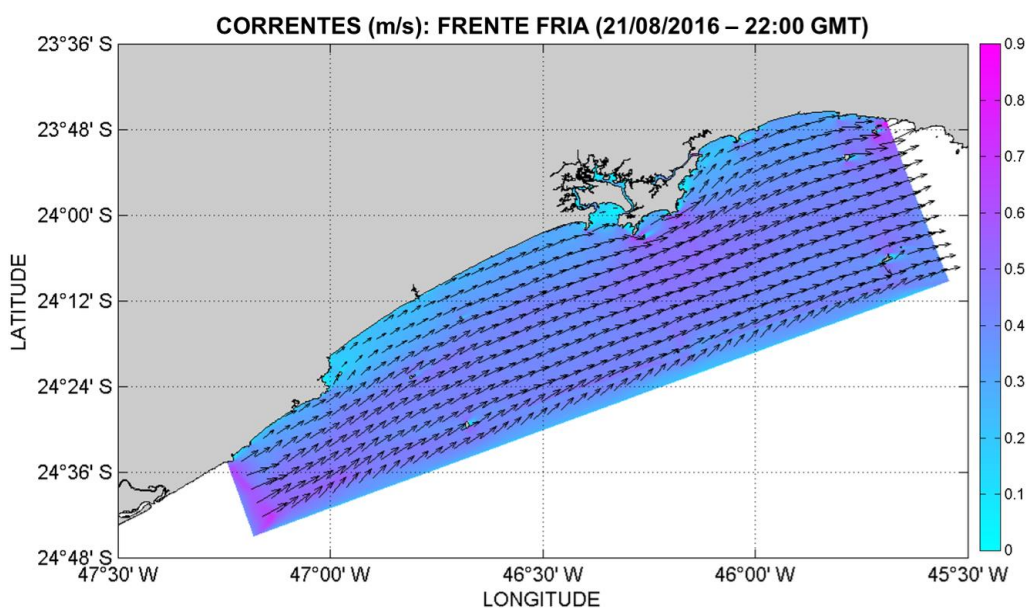
**Figura 4 - Séries temporais da componente U (zonal) e componente V (meridional) das correntes (m/s) no centro da grade computacional, em fevereiro de 2017, junto com os cálculos de validação.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

Ademais, a modelagem feita no D3D-FLOW também produziu mapas dos campos de correntes (incluindo direção e intensidade) na superfície. O presente trabalho disponibiliza duas situações: durante a passagem de uma frente fria no inverno (Figura 5), e sob a ação de ventos predominantes no verão (Figura 6).

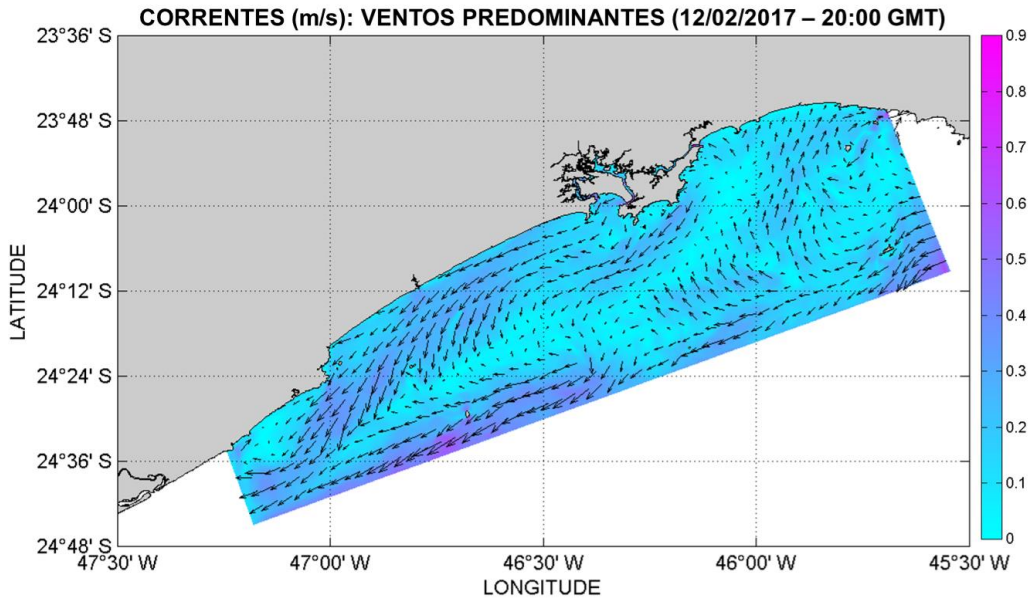
**Figura 5 - Correntes (m/s) na superfície durante a passagem de uma frente fria, em agosto de 2016.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).



Figura 6 - Correntes (m/s) na superfície sob a ação de ventos predominantes, em fevereiro de 2017.

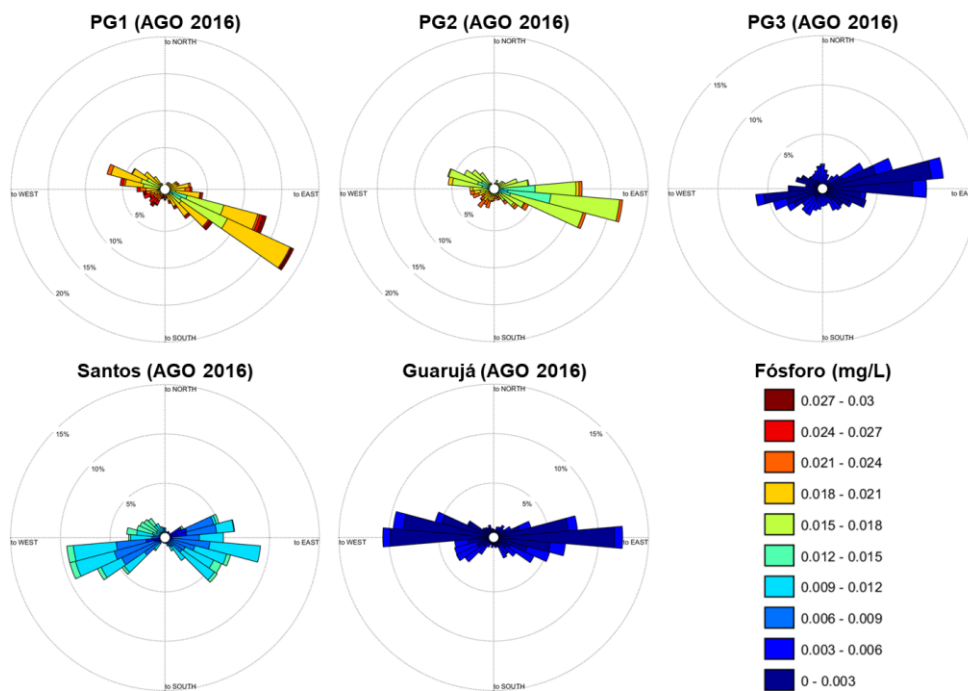


Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

### MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA

Resultados da modelagem de campo próximo produzidos com o VP-UM3 são apresentados no presente trabalho como histogramas direcionais das plumas de fósforo lançadas pelos cinco emissários submarinos da RMBS (PG1, PG2, PG3, Santos e Guarujá), referentes aos meses de agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), respectivamente conforme as Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Histogramas direcionais da concentração de fósforo (mg/L) nas plumas dos cinco emissários submarinos da RMBS, em agosto de 2016.

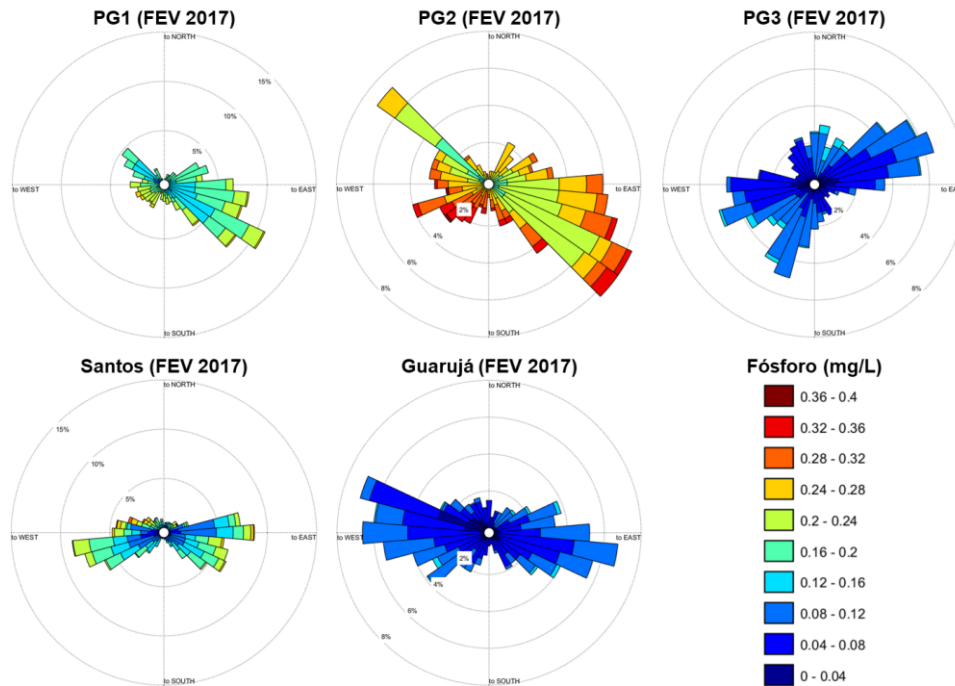


Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).





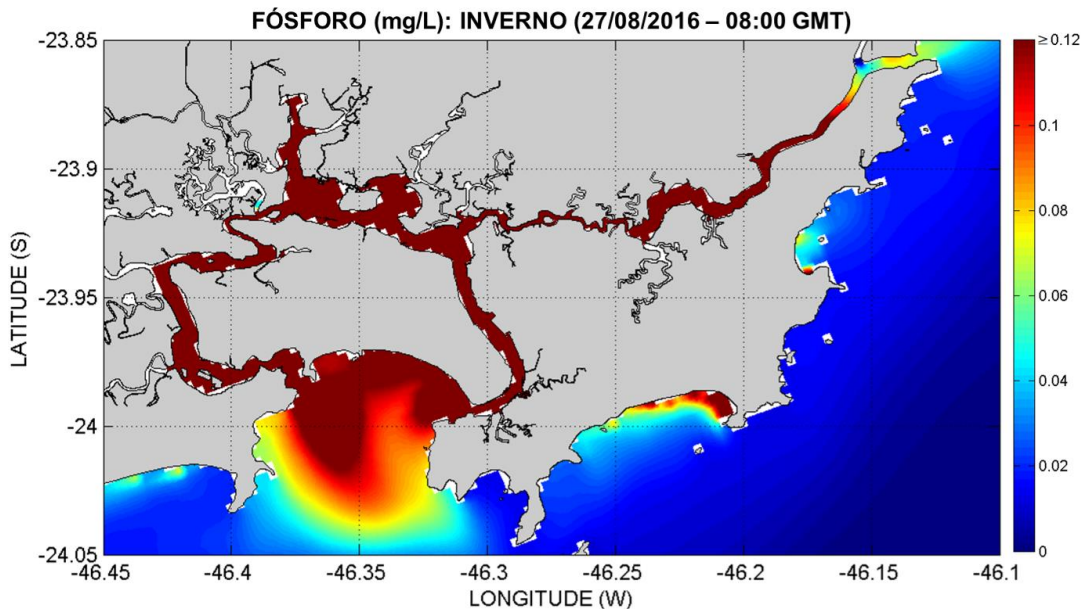
**Figura 8 - Histogramas direcionais da concentração de fósforo (mg/L) nas plumas dos emissários submarinos da RMBS, em fevereiro de 2017.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

Ademais, a modelagem feita no D3D-WAQ produziu mapas da distribuição das plumas de fósforo na camada de superfície, oriundas da operação simultânea dos cinco emissários submarinos e das 73 fontes difusas de poluição. O presente trabalho disponibiliza dois mapas, ambos com destaque para a região do Sistema Estuarino de Santos e São Vicente (SESSV), que também abrange as zonas costeiras de Praia Grande, Santos e Guarujá, conforme ilustrado na Figura 9 (inverno) e na Figura 10 (verão).

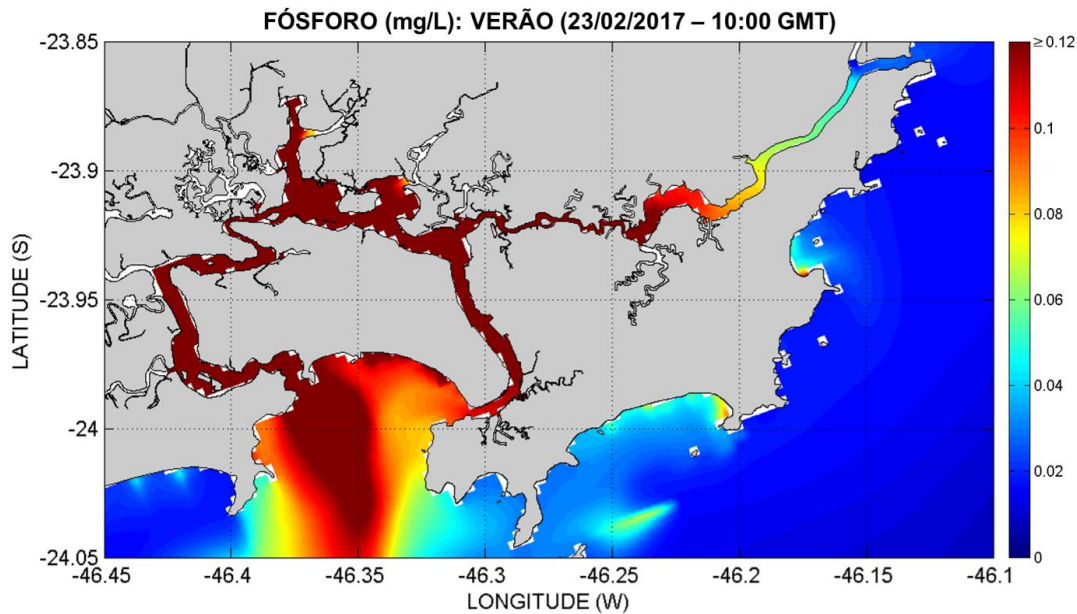
**Figura 9 - Distribuição das plumas de fósforo (mg/L) na superfície, com destaque para a região do SESSV (e zonas costeiras de Praia Grande, Santos e Guarujá), num instante de agosto de 2016.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).



**Figura 10 - Distribuição das plumas de fósforo (mg/L) na superfície, com destaque para a região do SESSV (e zonas costeiras de Praia Grande, Santos e Guarujá), num instante de fevereiro de 2017.**



Fonte: Elaboração própria com o software *Matrix Laboratory* (MATLAB).

Resultados da validação qualitativa do D3D-WAQ são referentes à comparação das ordens de grandeza das concentrações médias de fósforo, obtidas através da modelagem de campo distante para agosto de 2016 (inverno) e fevereiro de 2017 (verão), e pelas amostragens *in situ* realizadas pela SABESP: em julho de 2005 (inverno) e fevereiro de 2006 (verão) nas regiões costeiras de Praia Grande (SABESP, 2006b) e de Santos (SABESP, 2006a); e em janeiro de 2012 (verão) e julho de 2012 (inverno) na região costeira de Guarujá (SABESP, 2013). Os resultados das validações qualitativas estão disponíveis nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1 - Validação qualitativa do fósforo na modelagem de campo distante, no período de inverno.**

Período: Inverno Ponto de Coleta	Valor médio (mg/L)		Ordem de grandeza		Validação Fósforo
	D3D-WAQ	SABESP	D3D-WAQ	SABESP	
MPRG27	0,006	0,030	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Não
MPRG30	0,004	0,003	$10^{-3}$	$10^{-3}$	Sim
MPRG45	0,003	0,003	$10^{-3}$	$10^{-3}$	Sim
MSAN08	0,059	0,050	$10^{-2}$	$10^{-2}$	Sim
MSAN23	0,020	0,030	$10^{-2}$	$10^{-2}$	Sim
MGUA06	0,004	0,024	$10^{-3}$	$10^{-2}$	Não
MGUA11	0,011	0,019	$10^{-2}$	$10^{-2}$	Sim

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados do modelo D3D-WAQ e das coletas *in situ* da SABESP.

**Tabela 2 - Validação qualitativa do fósforo na modelagem de campo distante, no período de verão.**

Período: Verão	Valor médio (mg/L)		Ordem de grandeza		Validação	
	Ponto de Coleta	D3D-WAQ	SABESP	D3D-WAQ	SABESP	Fósforo
	<b>MPRG27</b>	0,014	0,098	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	Sim
	<b>MPRG30</b>	0,013	0,009	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	Não
	<b>MPRG45</b>	0,010	0,052	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	Sim
	<b>MSAN08</b>	0,076	0,060	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	Sim
	<b>MSAN23</b>	0,059	0,120	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	Não
	<b>MGUA06</b>	0,014	0,015	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	Sim
	<b>MGUA11</b>	0,024	0,028	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup>	Sim

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados do modelo D3D-WAQ e das coletas *in situ* da SABESP.

## DISCUSSÃO

### MODELAGEM HIDRODINÂMICA

De acordo com as Figuras 3 e 4, o modelo D3D-FLOW apresentou excelentes resultados para os dois períodos simulados, com ambos os parâmetros de erros próximos ao valor ideal zero: para a componente U (no inverno, AMSE = 0,11 m/s e RMSE = 0,14 m/s; e no verão, AMSE = 0,18 m/s e RMSE = 0,22 m/s) e também para a componente V (no inverno, AMSE = 0,09 m/s e RMSE = 0,12 m/s; e no verão, AMSE = 0,16 m/s e RMSE = 0,19 m/s); enquanto os valores de IOA foram próximos ao valor ideal unitário: para a componente zonal (0,84 no inverno; e 0,66 no verão) e para a componente meridional (0,83 no inverno; e 0,68 no verão). Portanto, o modelo D3D-FLOW pôde ser considerado como validado quanto à hidrodinâmica na RMBS.

Ademais, a Figura 5 indicou que durante a passagem de um sistema frontal frio na RMBS, ocorre um aumento na intensidade das correntes e que a direção predominante do fluxo torna-se para leste-nordeste; enquanto que a Figura 6 mostrou que quando a RMBS encontra-se sob a ação de ventos predominantes, a magnitude das correntes é menos e intensa e a direção predominante do fluxo é para oeste-sudoeste. Tais padrões hidrodinâmicos são concordantes com os resultados de experimentos numéricos realizados ao longo de sub-regiões da RMBS, por exemplo, os estudos de: Harari, França & Marques (2007); Ferreira (2015); Yang (2016); Ferreira, Harari & Sartor (2018); e Yang, Harari & Braga (2019).

### MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os histogramas direcionais obtidos na modelagem de campo próximo (Figuras 7 e 8) indicaram que as direções predominantes na dispersão inicial das plumas dos emissários submarinos PG1 e PG2 foram para noroeste e para sudeste, ou seja, há maior influência das correntes de maré, que fluem perpendicularmente à costa (YANG, 2016; YANG, HARARI & BRAGA, 2019); entretanto, na dispersão inicial das plumas dos emissários submarinos PG3, de Santos e de Guarujá, predominaram as direções para oeste-sudoeste e para leste-nordeste, as quais estão associadas com as correntes geradas pelo vento, respectivamente ventos predominantes e passagem de sistemas frontais frios. Tais padrões de transporte confirmam os resultados hidrodinâmicos dos experimentos numéricos realizados por Harari, França & Marques (2007), Ferreira (2015), Yang (2016), Ferreira, Harari & Sartor (2018), e Yang, Harari & Braga (2019), em sub-regiões da RMBS.

O limite máximo do CONAMA para fósforo em água salina corresponde a 0,062 mg/L (BRASIL, 2005). Em agosto de 2016 (inverno), as plumas de todos os cinco emissários submarinos não apresentaram valores superiores a esse limite em nenhum instante (Figura 7). Porém, conforme a Figura 8, em fevereiro de 2017 (verão), o limite do CONAMA foi superado em todo o período de simulação nas plumas dos emissários PG1 e

PG2; em 68,13% do tempo na pluma do emissário PG3; em 98,81% do período de simulação na pluma do emissário de Santos; e em 56,61% do tempo na pluma do emissário de Guarujá. De fato, eram esperados maiores valores de fósforo nas plumas durante o verão, período em que a RMBS recebe muitos turistas, o que consequentemente aumenta a poluição por esgotos (CETESB, 2022).

As plumas emitidas pelos emissários submarinos atingem o equilíbrio hidrostático não muito distante de seus pontos de lançamento, e conforme as plumas são transportadas pelas correntes em campo distante, essas sofrem diluição, e ao chegarem às praias locais, as concentrações de fósforo em geral já estão muito reduzidas e abaixo do limite do CONAMA, situação também verificada por Yang, Harari & Braga (2019) com a modelagem de plumas de amônio. Entretanto, a presença de canais artificiais (os quais podem conter esgoto bruto) que deságuam diretamente nas praias dos municípios de Praia Grande (dez canais), Santos (sete canais) e Guarujá (sete canais na praia da Enseada) (SABESP, 2006a; SABESP, 2006b; SABESP, 2013), pode aumentar a concentração de contaminantes, piorar os índices de qualidade da água e afetar a balneabilidade das praias, situação confirmada por monitoramentos realizados pela CETESB nos dois meses abordados (agosto de 2016 e fevereiro de 2017) em praias desses municípios, as quais ocasionalmente tiveram alguns períodos de balneabilidade imprópria (CETESB, 2017; CETESB, 2018), devido ao esgoto bruto despejado por tais canais.

De acordo com as Figuras 9 e 10, o SESSV apresentou elevadas concentrações de fósforo, maiores do que na plataforma continental, e acima do limite máximo estabelecido pelo CONAMA para águas salobras, correspondente a 0,124 mg/L (BRASIL, 2005). Tal situação era esperada, pois, há décadas que o SESSV sofre com problemas de poluição por resíduos sólidos (MARCHESANI *et al.*, 2011) e por esgoto bruto clandestino (BRAGA *et al.*, 2000; YANG *et al.*, 2012). Os resultados obtidos foram concordantes com os estudos de Moser *et al.* (2005), Ancona (2007) e Azevedo & Braga (2011), cujas coletas *in situ* no SESSV indicaram concentrações médias de fósforo de 0,031 a 0,340 mg/L no inverno, e de 0,031 a 0,260 mg/L no verão; enquanto este estudo registrou médias de 0,027 a 0,523 mg/L no inverno, e de 0,010 a 0,160 mg/L no verão.

A validação qualitativa do modelo D3D-WAQ (ver Tabelas 1 e 2) indicou 10 de 14 validações possíveis (total de 71,43% de casos validados); portanto, o D3D-WAQ foi considerado como validado em relação à dispersão das plumas de fósforo provenientes das fontes poluidoras da RMBS que foram consideradas para a realização deste estudo (cinco emissários submarinos e 73 descargas difusas).

## CONCLUSÕES

A modelagem hidrodinâmica feita através do D3D-FLOW representou as feições hidrodinâmicas da RMBS com um elevado grau de confiabilidade, sendo gerados resultados concordantes com a literatura (conforme as Figuras 3, 4, 5 e 6), os quais foram devidamente validados.

A modelagem de campo próximo realizada no VP-UM3 indicou que tanto as correntes de maré como as correntes geradas pelo vento afetam a dispersão inicial das plumas dos cinco emissários submarinos da RMBS, embora as concentrações de fósforo nas plumas ainda permaneçam acima do limite estabelecido pelo CONAMA em alguns instantes durante o verão (Figuras 7 e 8), devido à alta demanda populacional que é atendida nesta época do ano. De uma maneira geral, as diluições iniciais das plumas emitidas pelos emissários submarinos foram satisfatórias, o que é um indicativo que esses emissários submarinos abordados foram bem dimensionados e operam adequadamente. Portanto, pode-se considerar que os eventuais períodos de balneabilidade imprópria em algumas praias da região estudada (principalmente em Praia Grande, Santos e Guarujá) podem ter contribuições de descargas de outras fontes como canais de drenagem com cargas sanitárias sem tratamento que atingem as praias, de modo que uma contribuição para a solução deste problema encontra-se na adequação e melhoria do sistema de saneamento básico em algumas localidades da RMBS.

A modelagem de campo distante feita com o D3D-WAQ indicou que os emissários submarinos da RMBS (PG1, PG2, PG3, Santos e Guarujá) estão dimensionados de maneira correta e funcionando eficientemente, além de também confirmarem a hipótese levantada por Yang (2016), onde este autor menciona que os períodos de balneabilidade imprópria nas praias e os baixos índices de qualidade da água próximo à costa da RMBS pode ter origem em contribuições de fontes difusas (rios, canais e córregos) que deságuam nas praias contendo esgoto bruto (ou seja, sem tratamento) provenientes de despejos não conectados à rede saneamento, conforme mencionado anteriormente. Ademais, conforme as Figuras 9 e 10, a modelagem de qualidade da água realizada

neste estudo também indicou a necessidade da implementação de políticas públicas para solucionar os atuais problemas dos descartes de esgoto bruto no SESSV e nas praias da RMBS, o que seria de suma importância em termos ambientais, de saneamento básico e de saúde pública.

O modelo D3D-WAQ pôde ser validado de modo qualitativo, o que demonstra sua eficiência na modelagem de qualidade da água em campo distante. As poucas diferenças que foram encontradas nas comparações entre as ordens de grandeza das concentrações de fósforo registradas pelo D3D-WAQ e por amostragens *in situ* da SABESP (Tabelas 1 e 2, com 28,57% de invalidações) ocorreram muito provavelmente devido ao modelo calcular médias de séries temporais registradas ao longo de períodos mensais completos, enquanto que os valores fornecidos pela SABESP foram referentes a coletas *in situ* individuais. De qualquer forma, os resultados da validação do modelo de qualidade da água foram satisfatórios.

Por fim, a metodologia empregada no presente estudo poderá servir de referência em futuros estudos e monitoramentos que envolvam análise de qualidade da água por meio de simulações numéricas da dispersão de plumas de efluentes emitidas por fontes poluidoras pontuais (emissários submarinos) e difusas (rios, córregos, canais, etc.). De fato, a modelagem da dispersão de plumas de fósforo (e/ou de outros contaminantes) em cenários realísticos ou hipotéticos poderá ser uma ferramenta de grande importância para que futuramente seja possível prover significativas melhorias no saneamento básico da RMBS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANCONA, C.M. Aspectos da variação espacial e temporal da biomassa e produção fitoplanctônica e parâmetros correlatos no estuário e baía de Santos. São Paulo, 2007. 229p. Dissertação de Mestrado - Instituto Oceanográfico - Universidade de São Paulo, 2007.
2. AZEVEDO, J.S., BRAGA, E.S. *Caracterização hidroquímica para qualificação ambiental dos estuários de Santos – São Vicente e Cananéia*. *Arquivos de Ciências do Mar*, v. 44, n. 2, p. 52-61, Set. 2011.
3. BAPTISTELLI, S.C. Análise crítica da utilização de modelagem matemática na avaliação da dispersão de efluentes leves no litoral da Baixada Santista (Estado de São Paulo). São Paulo, 2008. 314p. Tese de Doutorado - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2008.
4. BAPTISTELLI, S.C., MARCELLINO, E.B. *Seawater monitoring under the influence of SABESP sea outfalls in Baixada Santista (south coast) and north coast - São Paulo State - Brazil*. *Revista DAE*, n. 204 (ed. especial), p. 47-56, Out. 2016.
5. BAUMGARTNER, D.J., FRICK, W.E., ROBERTS, P.J.W. *Dilution models for effluent discharges*. Third edition. Portland: United States Environmental Protection Agency, 1994. 189p.
6. BLECK, R. *An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates*. *Ocean Modelling*, v. 4, n. 1, p. 55-88, 2002.
7. BRAGA, E.S., BONETTI, C.V.D.H., BURONE, L., BONETTI FILHO, J. *Eutrophication and bacterial pollution caused by industrial and domestic wastes at the Baixada Santista Estuarine System – Brazil*. *Marine Pollution Bulletin*, v. 40, n. 2, p. 165-173, 2000.
8. BRASIL. *Resolução N.º 357 de 17/03/2005*. *Diário Oficial da União*, n. 53, p. 58-63. Mar. 2005.
9. CETESB. *Qualidade das praias litorâneas no estado de São Paulo - 2016*. Relatório técnico. São Paulo: 2017. 183p.
10. CETESB. *Qualidade das praias litorâneas no Estado de São Paulo - 2017*. Relatório técnico. São Paulo: 2018. 196p.
11. CETESB. *Qualidade das praias litorâneas no Estado de São Paulo - 2021*. Relatório técnico. São Paulo: 2022. 123p.



12. CHASSIGNET, E.P., HURLBURT, H.E., METZGER E.J., SMEDSTAD, O.M., CUMMINGS, J.A., HALLIWELL, G.R., BLECK, R., BARAILLE, R., WALLCRAFT, A.J., LOZANO, C., TOLMAN, H.L., SRINIVASAN, A., HANKIN, S., CORNILLON, P., WEISBERG, R., BARTH, A., HE, R., WERNER, F., WILKIN, J. *US GODAE: global ocean prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)*. *Oceanography*, v. 22, n. 2, p. 64-75, Jun. 2009.
13. COELHO, F.R. Caracterização físico-química, microbiológica e ecotoxicológica das águas dos canais de drenagem urbana de Santos (São Paulo, Brasil). Santos, 2013. 69p. Dissertação de Mestrado - Universidade Santa Cecília, 2013.
14. DELTARES. Delft3D-FLOW User Manual: simulation of multi-dimensional hydrodynamics flows and transport phenomena, including sediments. Version 4.05. Delft: 2023b. 709p.
15. DELTARES. D-Water Quality User Manual: versatile water quality modeling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio) chemical and biological processes. Version 5.06. Delft: 2023b. 387p.
16. DHN. Cartas Raster. 2018. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em: 18 jun. 2018.
17. EGBERT, G.D., BENNETT, A.F., FOREMAN, M.G.G. *TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model*. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. 12, p. 24821-24852, Dec. 1994.
18. FERREIRA, F.R. Análise da qualidade ambiental das praias do Guarujá (SP) através da avaliação de lançamentos pontuais de esgotos - emissário submarino do Guarujá, canais artificiais e rios da Praia do Perequê. São Paulo, 2015. 134p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo, 2015.
19. FERREIRA, F.R., HARARI, J., SARTOR, S.M. Análise da dispersão de esgoto nas águas das praias do Guarujá (SP) e seu risco à saúde dos banhistas. In: SINISGALLI, P.A.A., JACOBI, P.R. Caminhos do conhecimento em interdisciplinaridade e meio ambiente. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2018, p. 82-106.
20. GANDRA, C.V. Caracterização físico-química, microbiológica e ecotoxicológica das águas pluviais do sistema de drenagem urbana de Santos (São Paulo, Brasil). Santos, 2016. 93p. Dissertação de Mestrado - Universidade Santa Cecília, 2016.
21. HARARI, J., FRANÇA, C.A.S., MARQUES, J. Aplicações da modelagem numérica da Baía de Santos (SP, Brasil): correntes residuais e dispersão de poluentes. In: 1º Encontro Internacional de Governança da Água na América Latina, São Paulo: 2007.
22. INFOÁGUAS. Sistema InfoÁguas. 2021. Disponível em: <<https://sistemainfoaguas.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 03 fev. 2021.
23. KING, I.P. Chapter 3: governing equations for water quality parameters. In: KING, I.P. Documentation RMA-11: a three dimensional finite element model for water quality in estuaries and streams. Version 9.1a. Sydney: Resource Modelling Associates, 2016, pp. 3.1-3.35.
24. LE GALLOUDEC, O., LAW-CHUNE, S., NOUEL, L., FERNANDEZ, E., DERVAL, C., TRESSOL, M., DUSSURGET, R., BIARDEAU, A., TONANI, M. Product user manual for global ocean physical analysis and forecasting product: Global\_Analysis\_Forecast\_PHY\_001\_024. Toulouse: CMEMS, 2022. 41p.
25. MARCHESANI, D.S., YANG, S.H., ODA, D.V., COSTA, M.H.N., TAVARES FILHO, O.M., BERTOZZI, C.P. Analysis of solid wastes in the Estuary of Santos and São Vicente, Baixada Santista, SP, Brazil. In: 5<sup>th</sup> International Marine Debris Conference, Honolulu: 2011.

26. MORELISSEN, R., VAN DER KAAIJ, T., BLENINGER, T. *Dynamic coupling of near field and far field models for simulating effluent discharges. Water Science and Technology*, v. 67, n. 10, p. 2210-2220, May 2013.
27. MOSER, G.A.O., GIANESELLA, S.M.F., ALBA, J.J.B., BÉRGAMO, A.L., SALDANHA-CORRÊA, F.M.P., MIRANDA, L.B., HARARI, J. *Instantaneous transport of salt, nutrients, suspended matter and chlorophyll-A in the tropical Estuarine System of Santos. Brazilian Journal of Oceanography*, v. 53, n. 3/4, p. 115-127, Dec. 2005.
28. NOVAES JÚNIOR, R.R. *Avaliação da qualidade das águas de três canais do sistema de drenagem pluvial de Santos (São Paulo, Brasil) com base em parâmetros físicos, químicos e microbiológicos. Santos, 2017. 60p. Dissertação de Mestrado - Universidade Santa Cecília, 2017.*
29. NPH. *Implantação do sistema de monitoramento e previsão da qualidade da água por meio de modelagem numérica ambiental e desenvolvimento de base de dados na Bacia Hidrográfica do Estuário de Santos - São Vicente. Relatório técnico. Santos: Universidade Santa Cecília, 2017. 125p.*
30. ORTIZ, J.P., GARCIA, R.S., SUBTIL, E.L. *New design of Santos Submarine Outfall: hydrodynamic modeling simulation at the Santos Bay. In: International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata: 2011.*
31. ORTIZ, J.P., YANES, J.P., BRAULIO NETO, A. *Wastewater marine disposal through outfalls on the coast of São Paulo State - Brazil: an overview. Revista DAE*, n. 204 (ed. especial), p. 29-46, Out. 2016.
32. RIBEIRO, R.B. *Previsão de balneabilidade com o uso da modelagem numérica operacional para as praias das Baías de Santos e de São Vicente. São Paulo, 2021. 163p. Tese de Doutorado - Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo, 2021.*
33. ROBERTS, P.J.W., SALAS, H.J., REIFF, F.M., LIBHABER, M., LABBE, A., THOMSON, J.C. *Marine wastewater outfalls and treatment systems. London: IWA Publishing Limited, 2010. 528p.*
34. ROVERSI, F. *Estudo hidrodinâmico e de renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos. Rio de Janeiro, 2012. 141p. Dissertação de Mestrado - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.*
35. RUIZ, M.S. *Estudo comparativo do impacto da poluição difusa na balneabilidade das praias localizadas nas Baías de Santos e de São Vicente (2014-2015). Santos, 2016. 77p. Monografia de Bacharelado - Universidade Santa Cecília, 2016.*
36. SABESP. *Prestação de serviços referentes à execução dos programas de monitoramento ambiental da área sob influência do emissário submarino de esgotos de Santos / São Vicente e de monitoramento ambiental da área sob influência dos emissários submarinos de esgotos de Praia Grande - Subistemas 1, 2 e 3. Relatório técnico. v. 1 (Avaliação do monitoramento de Santos / São Vicente). São Paulo: 2006a. 247p.*
37. SABESP. *Prestação de serviços referentes à execução dos programas de monitoramento ambiental da área sob influência do emissário submarino de esgotos de Santos / São Vicente e de monitoramento ambiental da área sob influência dos emissários submarinos de esgotos de Praia Grande - Subistemas 1, 2 e 3. Relatório técnico. v. 2 (Avaliação do monitoramento de Praia Grande). São Paulo: 2006b. 380p.*
38. SABESP. *Relatório de integração do monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos da disposição oceânica dos emissários submarinos e dos esgotos afluentes e efluentes das estações de pré-condicionamento dos sistemas de esgotos sanitários do Guarujá, de Santos e São Vicente e da Praia Grande. Relatório técnico. v. 1. São Paulo: 2013. 511p.*
39. SAMPAIO, A.F.P., MATEUS, M., RIBEIRO, R.B., BERZIN, G. *A modelling approach to the study of faecal pollution in the Santos Estuary. In: NEVES, R., BARETTA, J., MATEUS, M. Perspectives on integrated coastal zone management in South America. Lisboa: IST Press, 2008, p. 425-434.*

40. SOUZA, C.R.G., FERREIRA, A.T.S., YANG, S.H., HARARI, J., CORTEZ, T., RIBEIRO, R.B. Taxas históricas de erosão ao longo da Praia da Enseada (Guarujá - SP) e sua correlação com modelos hidrodinâmicos. In: 13º Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, Arraial do Cabo: 2019.
41. SUTTI, B.O., GUIMARÃES, L.L., BORGES, R.P., BRAGA, E.S. *River Flows influence on nutrients (Si, N and P) and fecal coliforms (E. coli) in two tributaries of the estuarine channel of Bertioga (Santos Estuary, São Paulo, Brazil)*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 10, n. 6, p. 26-46, Jun. 2022.
42. VED, M., NAIHU, R. User's manual: Climate Forecast System Version 2.0. Bangalore: Indian Centre for Development of Advanced Computing, 2014. 50p.
43. WALSH, J.L. *History of the Riemann Mapping Theorem*. *The American Mathematical Monthly*, v. 80, n. 3, p. 270-276, Mar. 1973.
44. WILLMOTT, C.J. *On the validation of models*. *Physical Geography*, v. 2, n. 2, p. 184-194, Jul. 1981.
45. WILLMOTT, C.J. *Some comments on the evaluation of the model performance*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, Nov. 1982.
46. YANG, S.H. Análise das condições ambientais e da dispersão de plumas de efluentes na região costeira centro-sul do Estado de São Paulo com uso da modelagem numérica. São Paulo, 2016. 299p. Dissertação de Mestrado - Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo, 2016.
47. YANG, S.H. Análise de condições hidrodinâmicas e da qualidade da água na região costeira central do Estado de São Paulo através de modelagem numérica. São Paulo, 2022. 638p. Tese de Doutorado - Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo, 2023.
48. YANG, S.H., HARARI, J., BRAGA, E.S. *Modelagem de plumas de efluentes entre Praia Grande e Peruíbe, litoral do Estado de São Paulo, Brasil*. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 4, p. 697-708, Jul. / Ago. 2019.
49. YANG, S.H., HARARI, J., RIBEIRO, R.B., CORTEZ, T., RUIZ, M.S. Efeitos da intensificação de tempestades em praias do Estado de São Paulo, Brasil. In: 9º Congresso sobre Planejamento e Gestão Costeira dos Países de Expressão Portuguesa, Lisboa: 2019.
50. YANG, S.H., PAIVA, J., COTRIM, N.M.A., ROCHA, N.B.S., SALVADOR, T.C., SCHULZ, R., PALANCH-HANS, M.F. Concentração de nitrito e fosfato no médio e baixo Estuário de Santos, São Paulo, Brasil. In: 24ª Semana Nacional da Oceanografia, Florianópolis: 2012.