



280 - MODELAGEM COMO FERRAMENTA DE GESTÃO VISANDO A QUALIDADE DA ÁGUA BALNEAR

Renan Braga Ribeiro ⁽¹⁾

Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo, Mestre em Ciência Ambiental pela Universidade de São Paulo, graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Santa Cecília. Atualmente é Professor e Pesquisador no Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília.

Eloisa Helena Cherbakian ⁽²⁾

Graduada em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), MBA em Administração pelo Instituto Mauá e Mestre em Engenharia Sanitária pela Escola Politécnica da USP. Em sua trajetória profissional, atuou como Gerente de Controle Sanitário, Gerente de Operação nas Estações de Tratamento de Esgotos Suzano e ABC, Coordenadora de Riscos Ambientais e Engenheira na área de Pesquisa e Inovação da Sabesp.

Alexandra Franciscatto Penteadó Sampaio ⁽³⁾

Graduada em Engenharia Civil, Mestre em Ciências Ambientais pelo PROCAM/USP, docente do curso Engenharia da Computação e coordenadora do Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Santa Cecília, Santos, Brasil.

Francisco Correia Ramos Júnior ⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina. Engenheiro da Superintendência de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da SABESP - Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Matheus Souza Ruiz ⁽⁵⁾

Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade de São Paulo, graduado em Engenharia Civil pela Universidade Santa Cecília. Atualmente é Técnico de Laboratório no Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade Santa Cecília.

(1) Endereço: Rua Dr. Oswaldo Cruz, 277 – Boqueirão – Santos – São Paulo - CEP: 11045-907 - Brasil - Tel: +55 (13) 3202-7100 ramal 7216 - **e-mail:** renanribeiro@unisanta.br.

RESUMO

O monitoramento das águas balneares objetivam a proteção da saúde dos banhistas, com advertências sobre a existência de riscos. O uso de modelagem numérica tem se difundido em locais mais desenvolvidos, por permitir às autoridades complementar o monitoramento, antecipando avisos da condição de balneabilidade. Este estudo apresenta resultados das simulações numéricas nas praias de Santos, que recebem poluentes provenientes de diversas fontes, entre essas, a poluição difusa dos canais de drenagem urbana afluentes às praias. Os canais possuem um sistema de comportas, evitando que as águas da drenagem sejam despejadas continuamente nas praias. Assim, foi simulada a influência do escoamento superficial desses canais na balneabilidade das praias, após evento de chuva com abertura de comportas. Também foi simulada uma alternativa de manobra operacional das comportas, visando mitigar os efeitos da poluição trazida por esses canais. Obteve-se boa aderência da simulação aos dados medidos em campo. Os resultados da simulação de manobra operacional das comportas indicaram uma melhora das condições balneares nas praias, reduzindo o tempo de recuperação da qualidade das águas após evento pluviométrico, sendo assim uma potencial ferramenta para auxílio na gestão balnear, dos sistemas de drenagem urbana e de saneamento básico.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Balneabilidade, Praias.

INTRODUÇÃO

Programas de monitoramento em áreas balneares têm como principal objetivo a proteção da saúde dos banhistas através de um sistema efetivo de comunicação de riscos. Nas orientações para águas recreativas seguras da

Organização Mundial de Saúde (OMS), há duas abordagens centrais definidas (KAY et al., 2017): a primeira, como ferramenta central e utilizada nas praias do Brasil, está relacionada ao conceito de classificação da praia, baseado na avaliação da qualidade microbiológica e inspeção sanitária, que implica em uma avaliação dos riscos *a priori*; a segunda se baseia na previsão da má qualidade da água, para ajudar na avaliação de risco em tempo real e proteção da saúde pública.

Nesse sentido, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – *Environmental Protection Agency* (EPA) apresentou uma revisão e um protocolo técnico acerca das ferramentas preditivas para notificação da qualidade da água das praias. Essas ferramentas de modelagem preditiva se enquadram nas seguintes categorias (USEPA, 2010): (i) modelos estatísticos de regressão, baseados em notificações de chuva; (ii) árvores de decisão ou protocolos de notificação; (iii) modelos determinísticos; e (iv) combinações dessas ferramentas. Há várias considerações para o desenvolvimento e seleção de modelos preditivos, e cada um tem seu próprio conjunto de desafios.

O uso de modelagem numérica tem se difundido em locais mais desenvolvidos, uma vez que, em se estabelecendo boas correlações e calibração, o sistema permite às autoridades locais antecipar avisos de advertência ou liberação de praias. A EPA afirma que as ferramentas de modelagem podem ser utilizadas para complementar e não substituir o monitoramento. Ferramentas de modelagem podem fornecer estimativas conservadoras quando há um intervalo de tempo entre a amostragem da qualidade da água e obtenção de resultados. Se os modelos são adequadamente desenvolvidos e aplicados, eles podem ser utilizados na tomada de decisão entre fechar ou não a praia (USEPA, 2014; USGS, 2016). Desta forma, a EPA tem orientado os estados americanos no desenvolvimento e uso de ferramentas de previsão da qualidade balnear. Países europeus como França, Espanha, Portugal, Dinamarca e Irlanda também se utilizam de ferramentas auxiliares (modelo) de previsão da qualidade balnear.

Assim, além de um breve resumo sobre a utilização de modelos na gestão balnear, o estudo atual buscou apresentar resultados das simulações numéricas realizadas através de um projeto piloto desenvolvido na Baía de Santos financiado pelo FEHIDRO - Fundo Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, denominado: 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, utilizando a plataforma AquaSafe.

A Baía de Santos está inserida em um sistema estuarino complexo, pois além da importância ecológica do estuário como berçário de muitas espécies marinhas, existem atividades industriais como a do Polo Industrial de Cubatão, atividade portuária relacionada a movimentação de cargas do Porto de Santos, maior porto da América Latina, dragagens, urbanização intensa, ocupações irregulares e submoradias, que acabam por drenar seus efluentes direta ou indiretamente às águas costeiras, além de pendências relativas à meta de universalização do esgotamento sanitário em algumas de suas áreas de influência. Assim, além da contaminação proveniente dos canais estuarinos de Santos e de São Vicente que desembocam em suas águas, a baía recebe a contribuição de fontes de poluição difusa através dos canais de drenagem urbana, que em episódios de alta pluviosidade, deságuam nas praias prejudicando diretamente a qualidade balnear.

Todo esse cenário reforça a importância do uso de ferramentas numéricas complementares confiáveis para modelar os fluxos e a qualidade das águas, bem como para auxiliar na gestão e otimização da operação de sistemas de drenagem, no planejamento de novas obras e empreendimentos de esgotamento sanitário (modo *off line*), com base no ganho com as remoções de cargas orgânicas sobre a qualidade das águas balneares a despeito da existência de outras fontes poluidoras, possibilitando o direcionamento e otimização das ações de saneamento na região.

OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo geral, aplicar a potencialidade da modelagem numérica como ferramenta complementar de gestão da qualidade das águas em regiões costeiras, e o desenvolvimento de um sistema preditivo da qualidade da água balnear. Para tanto, foram utilizadas como piloto as praias da cidade de Santos no litoral paulista.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O estudo tem como objetivos específicos:

- Aplicar o modelo de qualidade de água e simular a influência do escoamento superficial dos canais de drenagem sobre a qualidade balnear nas praias da cidade de Santos, após evento de chuva com abertura de comporta.
- Comparar o resultado modelado com as condições reais monitoradas através de amostragens em campo.
- Avaliar a evolução e recuperação da qualidade balnear nas praias do Embaré e do Boqueirão em Santos, após um evento de chuvas considerando-se o tempo necessário ao decaimento bacteriano e recuperação da qualidade balnear das águas.
- Avaliar, a partir da modelagem, uma alternativa de manobra operacional, visando mitigar os efeitos da poluição difusa trazida pelos canais de drenagem, sobre a qualidade balnear das praias de Santos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como já exposto anteriormente, a EPA tem orientado os estados no desenvolvimento e uso de ferramentas de previsão da qualidade balnear. O documento de orientação, “*Six Key Steps for Developing and Using Predictive Tools at Your Beach*”, oferece uma abordagem simples e direta para o desenvolvimento de um modelo preditivo para as praias (USEPA, 2016). A EPA desenvolveu também o “Praia Virtual”, para incentivar o uso pelos estados, da modelagem como uma ferramenta preditiva. Neste caso, baseado em modelos estatísticos para tomar decisões oportunas consultivas ou de encerramento de praia e emitir notificações públicas no mesmo dia.

Na Europa, desde 2006, normas mais rigorosas passaram a vigorar, visando garantir qualidade das águas balneares no mar e em águas interiores. A este respeito, sabe-se que as águas pluviais e as inundações podem afetar a qualidade das águas costeiras, de rios e de lagos. Desta forma, a qualidade das águas balneares foi sendo gradualmente transformada em um grande desafio da saúde pública e ambiental e, como tal, um fator importante no aspecto econômico. A Diretiva Europeia reforçou padrões de saúde, estabelecendo novos indicadores e também novos padrões para a qualidade da água balnear. Outro objetivo declarado na Diretiva foi proporcionar ao público uma melhor informação e participação na gestão da água (GUTIÉRREZ et al., 2010).

Inicialmente, desenvolvido em Barcelona em 2008, um sistema de modelagem numérica, neste caso, determinística, passou a ser utilizado para prever a qualidade das águas balneares, a fim de otimizar a sua gestão e fornecer melhor informação aos banhistas (GUTIÉRREZ et al., 2010, LEITÃO et al., 2009). Na França ele já foi instalado em Cannes e na região Sul Basco em Biarritz e St Jean de Luz (SUEZ, 2014). A virtude do sistema implantado reside na integração de múltiplos modelos através de coleta de dados automatizada em tempo real, que é utilizado para modelar os fluxos de água e de qualidade no sistema de tratamento de águas residuais, instalações de esgoto e águas costeiras (SUÑER et al., 2007). Ele pode ser usado como um sistema de alerta para os banhistas e gestores de praia (graças à previsão digital das mudanças na poluição da água), bem como uma ferramenta off-line para planejamento de novas obras e empreendimentos com base no impacto das descargas de esgoto e efluentes sobre a qualidade das águas balneares (SUÑER et al., 2007).

Em Portugal, um programa de monitoramento concebido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST) e financiado pela empresa de Saneamento SANEST S.A., foi implementado na Costa do Estoril, a fim de avaliar a contribuição dos córregos à qualidade das águas balneares. As previsões numéricas foram realizadas utilizando os módulos hidrodinâmico e de qualidade da água do Sistema de Modelagem MOHID Water. Segundo estudo de Viegas *et al.* (2009), as simulações usando fluxo de descarga medido mostraram que o modelo pôde simular com precisão a dispersão e evolução da pluma dos córregos e a qualidade das águas balneares.

Baía de Santos

Se considerarmos os aspectos ecológicos, sociais e econômicos, a Baía de Santos está inserida em um sistema estuarino complexo e tem sido submetida à contaminação por fontes de diversas origens (industriais, portuárias, de saneamento, dragagens, difusas, entre outras possíveis). Segundo Ambrozevicius (2010), “o mar acaba sendo o receptor final de praticamente todos os efluentes, inclusive da água pluvial, que é coletada pelos canais e, apesar de considerada ‘limpa’ por ser água de chuva, carrega os contaminantes presentes nas ruas, bueiros e resíduos sólidos”.

A água de chuva acaba carreando grande quantidade de poluição orgânica, de metais e material em suspensão que acaba atingindo os rios e mares, não sendo melhor que a de um efluente de tratamento secundário de esgotos (TUCCI, 2008). Assim, a água pluvial acaba sendo uma grande preocupação para o controle da qualidade balnear em praias urbanas.

Na área de estudo, a poluição difusa atinge os canais naturais do estuário e as praias de Santos por meio da abertura de comportas e descarga dos canais de drenagem que cortam a cidade de Santos. Como se sabe, no início do século passado, foi construída uma rede de canais abertos de drenagem que cruzam o município de Santos/SP em sua porção insular. Esses canais, concebidos pelo engenheiro Saturnino de Brito, atravessam o município contendo duas saídas opostas: uma para o estuário e outra para as praias na Baía de Santos. Esse sistema foi projetado para drenar as águas pluviais em direção à baía e ao estuário, permitindo através do movimento oscilatório de subida e descida da maré, sua lavagem hidráulica, afastando deste modo a poluição.

Atualmente, dos 7 canais principais, os canais 1 ao 6 são munidos de comportas localizadas no trecho final que drena em direção à baía (já na areia da praia, conforme indicação destacada na figura 1), de modo a impedir, em tempo seco ou de chuvas fracas, o escoamento da água em direção às praias. Ou seja, quando não chove, as comportas permanecem fechadas e a água drenada pelos canais segue por um ponto (tomada de água) chamado “admissão” para o interceptor oceânico, operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp, sendo posteriormente encaminhado à Estação de Pré-Condicionamento (EPC) e desta, lançado a 4,5 km da costa pelo o emissário submarino de Santos.

Quando ocorrem, em média, chuvas superiores a 10 mm (segundo informações dos operadores da Prefeitura Municipal de Santos) e/ou o nível de água no canal atinge o nível próximo ao do extravasor, a admissão é fechada e as comportas são abertas para evitar inundações na cidade, permitindo assim a drenagem da água diretamente para as praias. Vale destacar que esses canais possuem também comportas intermediárias que separam seus trechos com inclinação para a baía, da porção com inclinação para o estuário. Estas permanecem normalmente fechadas. Os canais são munidos ainda, de comportas no trecho com drenagem para o estuário, mas estas normalmente permanecem abertas. Monitoramentos da CETESB e monitoramentos realizados neste estudo, demonstram que as águas dos canais possuem a presença de contaminantes microbiológicos fecais em elevada concentração que, desta forma, quando lançados nas praias, prejudicam sua balneabilidade. Segundo trabalhos anteriores (LAMPARELLI e NERY, 2008; HARARI et al., 2013), os canais de drenagem são as principais fontes de impacto à qualidade balnear das praias de Santos.

Cabe destacar que as praias do litoral paulista, incluindo as do município de Santos, são monitoradas semanalmente pela CETESB, havendo no caso das praias de Santos, devido à forte influência da drenagem sobre a qualidade das praias, adicionalmente mais duas campanhas semanais de monitoramento realizadas a cargo da Secretaria de Meio Ambiente do município.

Neste estudo, com base no modelo de qualidade balnear, é apresentada uma análise comparativa de impactos estimados e efetivamente monitorados nas praias de Santos (mais especificamente nas praias do Boqueirão e Embaré, no entorno do lançamento do canal 4) em condições ambientais reais de maré, sendo avaliado o tempo necessário para a recuperação da qualidade da água balnear, comparando-se os resultados do modelo com o monitoramento em campo.

É esperado que diferentes condições ambientais propiciem diferentes tempos para a recuperação da qualidade da água balnear. Desta forma, o modelo numérico que hoje se encontra em modo operacional para a hidrodinâmica e qualidade microbiológica da Baía e Estuário de Santos, quando acoplado ao modelo de drenagem urbana, poderá propiciar um avanço no conhecimento e na gestão balnear, possibilitando - a partir de operações planejadas da rede de macrodrenagem urbana do município e suportadas pelo aperfeiçoamento e calibração do módulo de previsão de qualidade balnear das praias da região - seu uso como ferramenta auxiliar na gestão e otimização da operação de sistemas de drenagem e na priorização de empreendimentos de esgotamento sanitário para a região de influência (RIBEIRO et al., 2017).

METODOLOGIA UTILIZADA

O Sistema Tecnológico de Integração de Informações AquaSafe é uma ferramenta de suporte à tomada de decisão com uma ampla gama de aplicações – dentre as quais destaca-se no escopo deste estudo, a gestão da qualidade das águas balneares – que está sendo aplicado em Santos, no Brasil e na Europa com sucesso. Desenvolvido pela HIDROMOD, trata-se de uma plataforma computacional capaz de integrar, em tempo real,

dados e resultados de modelos para produzir informação em formato útil para gestores e já foi aplicada em diversas regiões costeiras (LEITÃO et al., 2013; LEITÃO et al., 2015; RIBEIRO, et al., 2016; SILVA et al., 2016). Na região de Santos e através do AquaSafe, foi implementado um sistema de alerta precoce (*Storm Surge Early Warning System*) para eventos meteoceanográficos extremos (RIBEIRO et al., 2019).

No presente estudo, estão sendo aplicados e integrados à plataforma em Santos, o sistema de modelos numéricos MOHID para a hidrodinâmica (RIBEIRO et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016) e para a qualidade da água, o modelo SWAN para ondas (RIBEIRO et al., 2016) e o sistema SWMM (*Storm Water Management Model*), para os canais de drenagem. O sistema de previsão da qualidade das águas balneares para as praias da região de Santos, materializado na plataforma AquaSafe, está sendo desenvolvido pela equipe do Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas (NPH) da Universidade Santa Cecília (UNISANTA). De forma similar ao descrito no estudo de RIBEIRO et al. (2017):

“Foi implementado um conjunto de modelos numéricos hidrodinâmicos para simular e prever a circulação na região de estudo com base na técnica de *downscaling*. Esta técnica consiste na transferência de informação de modelos de larga escala para modelos de escala local, assim a circulação é simulada não só considerando efeitos locais, como por exemplo os efeitos da geomorfologia de fundo, mas também efeitos de larga escala, ex.: maré meteorológica.”

Visando uma avaliação do projeto que incluiu a realização de campanhas de monitoramento para calibração dos modelos hidrodinâmico e de qualidade da água, neste trabalho são apresentados os resultados das simulações numéricas das descargas da rede de drenagem nas praias em Santos. Simplificadamente, neste cenário foram simulados os episódios de chuvas e abertura de comportas dos canais de drenagem. Para fins de validação, os resultados das simulações foram comparados com os resultados das campanhas de monitoramento realizadas por ocasião do evento, quando foram medidas a vazão de descarga do canal 4 após evento de chuvas, assim como a qualidade da água por ele descarregada na praia, considerando a concentração de *Enterococcus*, indicador de contaminação fecal considerado no monitoramento da qualidade balnear das praias, conforme Resolução Conama nº274/2000 (BRASIL, 2000). Da mesma forma, nesse evento foram coletadas e analisadas amostras de água descarregadas pelos canais adjacentes ao 4, ou seja, dos canais 3 e 5 (figura 3). Essas amostras foram analisadas pelo Laboratório de Controle Sanitário da Sabesp, pertencente à Unidade de Negócio da Baixada Santista.

Foram também coletadas e analisadas amostras de água na praia (a 1 m de profundidade, como recomendado pelo órgão ambiental) em frente ao canal 4 (ponto P3), a 100 m tanto à direita quanto à esquerda do ponto de lançamento (pontos P4 e P2, respectivamente), e a 200 m à direita e à esquerda do lançamento (pontos P5 e P1, respectivamente). Estes dois últimos pontos coincidem com os pontos de monitoramento da CETESB e da Secretaria de Meio Ambiente do Município de Santos, que efetivamente monitoram e avaliam a qualidade balnear das praias santistas (pontos indicados na figura 3).

Além disso, para refinar uma melhor representação do sistema de drenagem, foram efetuados levantamentos topográficos dos canais 4 a 7, ficando ainda pendentes, os levantamentos dos canais 1 a 3. Nos canais de drenagem 1 a 3, e 5 a 7 não ocorreu a medição de vazão e consequente calibração do modelo chuva-vazão. Assim, foram admitidas as vazões com base em suas áreas de influência de drenagem (modelo chuva-vazão).

As condições de circulação na região dos canais naturais e na Baía de Santos são resultantes do modelo hidrodinâmico implementado e validado com as medições efetuadas por equipamentos instalados em estações e boias operadas pela Praticagem de São Paulo, no Canal do Porto de Santos (RIBEIRO et al., 2019).

Desta forma, no presente estudo, foram efetuadas duas simulações, considerando as seguintes informações:

A. Simulação 1: Evento chuvoso (dias 15 e 16 de junho de 2015)

- Medição da vazão de lançamento do canal 4 (drenagem urbana) em Santos, durante evento de precipitação com abertura de comporta para as praias do Boqueirão e do Embaré. Para tanto, foi utilizado um medidor ultrassônico portátil (ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler). A medição foi realizada por equipe técnica de Gestão de Recursos Hídricos da Unidade de Negócio de Produção de Água da Metropolitana.- MA/Sabesp.
- Monitoramento da qualidade das águas de drenagem durante a abertura da comporta do canal 4, sendo as amostras coletadas a cada 15 min., até o fechamento da comporta. As amostragens se deram

próximas à comporta que dá acesso à praia (Figura 1), e enviadas para análise em laboratório certificado. Nos pontos na saída dos canais foram analisados os parâmetros: DQO, DBO, sólidos suspensos, Cloretos, pH, Temperatura, coliformes totais, *E. coli* e *Enterococcus*. No presente estudo apresentaremos as análises microbiológicas (*E.coli* e *Enterococcus*) para avaliação das condições balneares, apenas.

- Também foram monitoradas a qualidade das águas de drenagem dos canais 3 e 5 antes, durante e depois da abertura das respectivas comportas. Só não foram monitorados os pontos de praia em frente a esses canais, sendo apenas modelados, admitindo-se uma vazão estimada para os lançamentos dos canais na praia após abertura de suas comportas (com base no modelo chuva-vazão, como já exposto). Da mesma forma, os outros 4 canais existentes em Santos, tiveram suas vazões e concentrações microbiológicas estimadas, admitindo-se serem similares às concentrações microbiológicas ocorridas no canal 4. As bases de referência para a estimativa das vazões foram: a precipitação ocorrida e as áreas de influência dos respectivos canais de drenagem (Figura 2). A calibração se deu apenas a partir da medição efetiva realizada com ADCP no canal 4 (usado como referência). O local de medição do ADCP no canal 4 e as áreas de drenagem são apresentadas na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente.
- Monitoramento de 5 pontos nas praias: dois na praia do Embaré, dois na praia do Boqueirão e um em frente a saída do canal 4 (Figura 3). Como já informado, os pontos monitorados na praia foram coletados a cerca de 1 m de profundidade, sendo o ponto P3 em frente à descarga do canal, dois pontos (P2 e P4), sendo um à esquerda e outro à direita do ponto P3, distantes 100 m dessa referência, e os pontos P1 e P5, a 200 m do P3 (à sua esquerda e direita, respectivamente). Vale destacar que esses pontos P1 e P5 coincidem com os pontos de monitoramento da Prefeitura Municipal de Santos e da CETESB do Programa de Monitoramento da Balneabilidade. Nesta data esses pontos foram amostrados antes da abertura das comportas e 90 minutos após a abertura das comportas e, os parâmetros analisados em amostragens na praia foram: *E. coli*, *Enterococcus*, condutividade, sólidos suspensos totais (SST), temperatura e turbidez. No dia seguinte, 16 de junho, no período da manhã, 23 horas após a abertura da comporta e no início da tarde, 27 horas depois da abertura da comporta, foram monitorados novamente os pontos de praia (P1 ao P5) para fins de acompanhamento do decaimento e recuperação da qualidade balnear. No dia 17, foram utilizados os dados de monitoramento da CETESB (P1 e P5, apenas) para avaliar a aderência do modelo, bem como o comportamento/recuperação da qualidade balnear após o evento de chuva nas condições meteorológicas e ambientais do período.

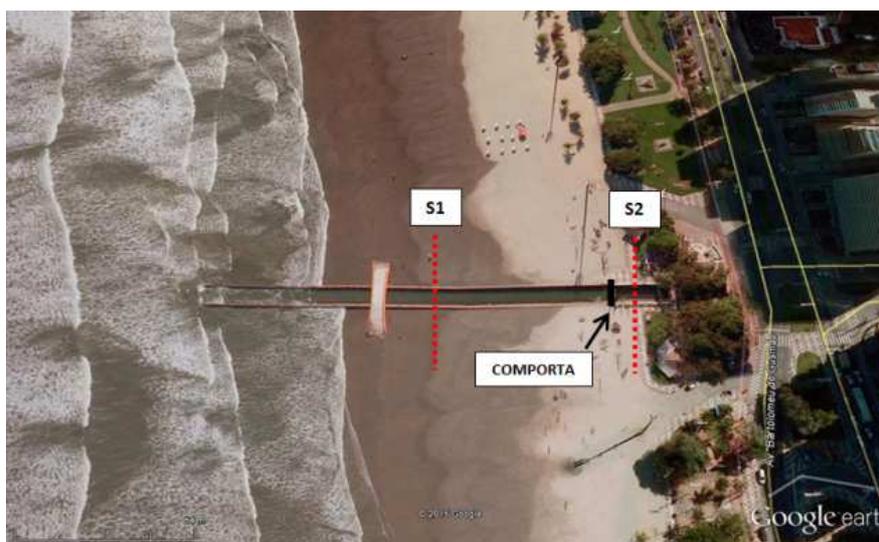


Figura 1: Pontos de medição de vazão no lançamento do Canal 4 para a praia, em evento chuvoso (dia 15/06/2016). Fonte: Sampaio et al. (2016).



Figura 2: Definição das áreas de drenagem (amarelo) dos 7 principais canais artificiais de Santos (C1 a C7 da esquerda para a direita). Fonte: Estudo hidrológico preliminar de Santos/SP (RAMOS JÚNIOR, 2014). Em verde e azul, trechos dos canais que drenam para a Baía e Estuário, respectivamente.



Figura 3: Localização dos pontos de monitoramento nos canais de drenagem (C3, C4 e C5), no lançamento do Canal 4 à praia (P3) e no entorno do lançamento do Canal 4, praia de Boqueirão (P1 e P2) e Embaré (P4 e P5) – Santos/SP.

B. Simulação 2: Cenário hipotético considerando as comportas intermediárias permanentemente abertas no evento pluviométrico do dia 15 de junho.

Simular a manobra das comportas intermediárias dos canais (mantê-las abertas), com o objetivo de avaliar a viabilidade e as vantagens em promover, sempre que possível, a inversão de seu fluxo, direcionando o

lançamento das águas de drenagem (sob determinados limites de precipitação para evitar-se inundações na ilha), prioritariamente para o estuário e não para a Baía de Santos, de modo a minimizar lançamentos nas praias.

Com as manobras, há a expectativa de discreta melhora com a redução no tempo para a recuperação da qualidade balnear após evento moderado de chuva. Tal melhora esperada se daria mais por conta da hidrodinâmica e diluição da concentração do que pelo decaimento bacteriano, posto que o tempo de detenção entre o lançamento das águas dos canais de drenagem no estuário e sua chegada à baía é insuficiente para o decaimento bacteriano necessário.

Espera-se que essas e outras manobras e ações possam ser testadas por meio da simulação numérica em implantação, auxiliando na gestão da qualidade balnear e na priorização tanto de empreendimentos quanto de programas e ações em geral.

Os cenários simulados através do SWMM estão resumidos no quadro da Figura 4.

CENÁRIOS	Comporta Orla	Comporta Intermediária	Comporta Estuário
Cenário 1	Abertura	Permanentemente fechada	Permanentemente aberta
Cenário 2	Abertura	Permanentemente aberta	Permanentemente aberta

Figura 4: Cenários simulados através do SWMM.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Simulação 1 – Evento chuvoso

Apesar de limitações, como a ausência de dados topográficos dos canais 1 a 3, prejudicando a estimativa da drenagem nos mesmos, as campanhas de monitoramento realizadas dias 15 e 16 de junho de 2015, demonstram boa concordância dos resultados do modelo às condições verificadas em campo (Figura 5). Vale destacar que a vazão de descarga foi efetivamente medida apenas no canal 4 e estimada nos demais, sendo esta uma das limitações do estudo.

Os resultados do modelo SWMM aplicado para simular a descarga da drenagem do canal 4 mostraram boa proximidade com os dados coletados em campo. A vazão média calculada pelo modelo antes do evento de abertura de comporta foi de 0,19 m³/s, e o ADCP mediu uma vazão de 0,15 m³/s. Essa vazão é função do extravasamento por sobre a comporta, ocorrido por cerca de quatro horas antes da abertura da mesma (a equipe da prefeitura municipal, responsável pela operação das comportas aguardou a chegada da equipe da Sabesp, responsável pela medição de vazão). A vazão média medida com a comporta aberta foi de 2,06 m³/s e o modelo calculou uma vazão de 2,01 m³/s. A figura 5 apresenta a comparação entre ambas as séries temporais. Esses resultados são referentes ao canal de drenagem, denominado canal 4, na ocasião o único com dados topográficos e vazão de descarga efetivamente medida.

Os resultados da comparação entre os dados médios medidos (monitorados) e os dados simulados pelo módulo de qualidade da água do sistema de modelos MOHID foram satisfatórios, a concentração de *Enterococcus* simulada apresentou boa aderência com os dados medidos, no geral com ambos na mesma ordem de grandeza. Sendo a concentração medida antes da abertura da comporta de 815 UFC/100ml e o resultado do modelo foi de 991 UFC/100ml; após a abertura o medido foi 5.377 UFC/100ml de e o simulado foi de 1.522 UFC/100ml; 23h após a abertura os resultados foram 481 e 1.098 UFC/100ml; e 27 horas após 488 e 443 UFC/100ml, respectivamente (Figura 6).

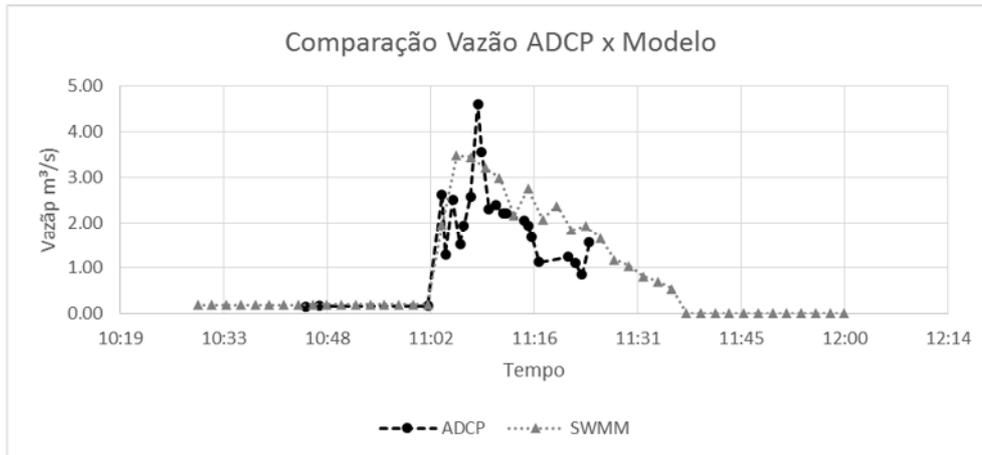


Figura 5: Comparação das vazões medidas pelo ADCP e modelada na abertura da comporta do Canal 4, praias do Boqueirão e Embaré – Santos/SP, no evento de 15/06/2015.

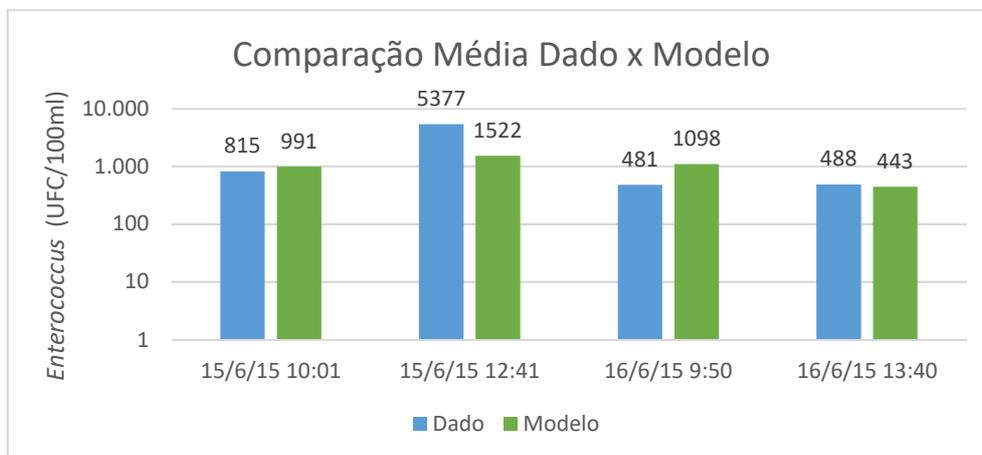


Figura 6: Comparação entre os resultados do modelo de qualidade de água (em verde) com os dados (em azul) da concentração de *Enterococcus* (UFC/100ml), coletados antes (15/06 10:01) e após (15/06 12:41) a abertura de comporta e no dia seguinte ao evento (16/06 9:50 e 13:40).

Através dos resultados obtidos com a modelagem de qualidade da água, foi possível observar que as maiores concentrações ocorreram nas regiões mais rasas, próximas às praias e a dispersão ocorreu paralelamente à linha de costa, com marcada influência da ação da maré. Cabe ressaltar que são necessárias mais campanhas de monitoramento em eventos de pluviosidade e também nos demais canais de drenagem e canais naturais para uma calibração satisfatória do modelo. Entretanto, esses resultados são promissores, dada sua aderência às condições medidas no evento.

Simulação 2 - Cenário hipotético de abertura da comporta intermediária

Na Figura 7 são apresentadas as vazões estimadas nas comportas localizadas no canal 4, para os cenários simulados através do SWMM. Com a abertura da comporta intermediária há uma redução do volume de água afluente às praias, inclusive não ocorrendo o extravazamento antes da abertura da comporta, pois uma parte do volume passa a ser direcionado para o estuário. Enquanto o pico da vazão no cenário 1 foi de 3,5m³/s, no cenário 2 esse pico foi inferior a 2,0m³/s (picos em vermelho na figura 7), e o pico da vazão direcionada à porção interior do estuário no cenário 1 foi de aproximadamente 0,6m³/s e no cenário 2 foi superior a 1,0m³/s.

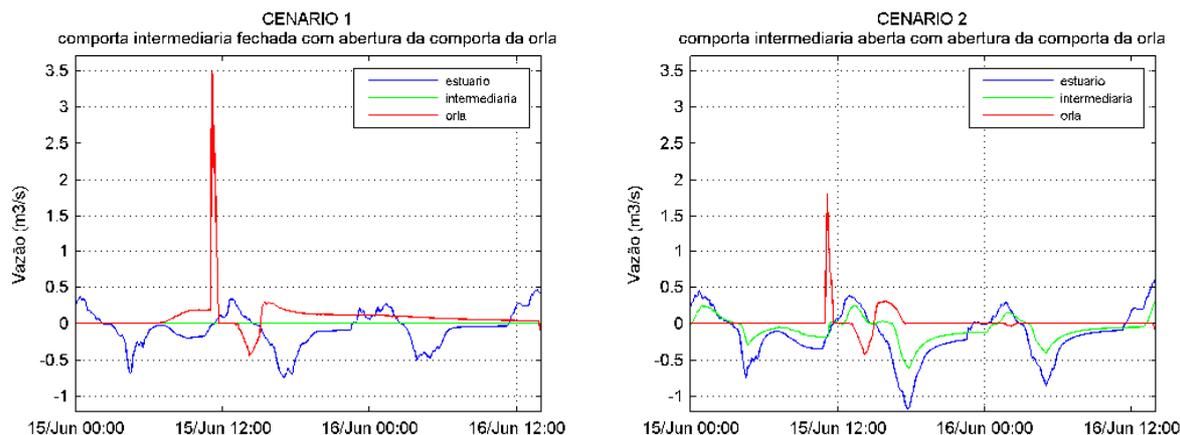


Figura 7: Simulação das vazões através das comportas do canal 4 para os cenários 1 e 2. Obs.: Para Vazão>0, fluxo segue no sentido da orla. Para Vazão<0, fluxo segue no sentido do estuário.

Na Figura 8 é apresentada a comparação dos resultados médios monitorados em campo (evento 1), com os resultados das simulações dos cenários 1 e 2. Devido ao menor volume de água afluyente às praias simulado no cenário 2, o modelo estimou a recuperação da qualidade balnear da água na praia em praticamente 23h apresentando concentrações de *Enterococcus* inferiores a 100 UFC/100ml ($\text{Log}_{10} 2$), sendo que no cenário 1 (situação real) a recuperação da qualidade balnear nessa região foi em torno de 50 horas após a abertura da comporta.

Cabe destacar ainda, que no cenário 1, mesmo antes da abertura das comportas, as praias já estavam impróprias devido ao extravasamento lateral às comportas dos canais, pelo fato dos níveis estarem elevados, aguardando apenas a chegada da equipe da Sabesp que faria a medição da vazão durante a abertura das comportas. Enquanto que no cenário 2, antes da abertura da comporta, as concentrações foram da ordem de 10 UFC/100ml ($\text{Log}_{10} 1$).

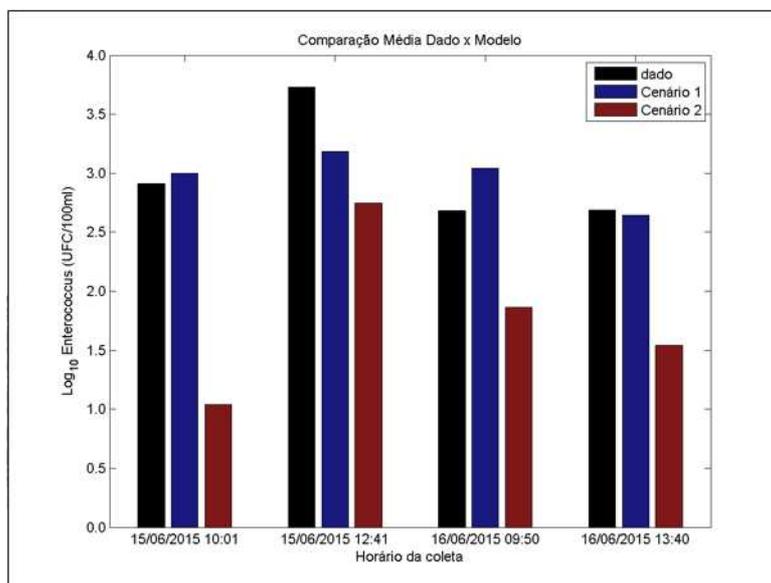


Figura 8: Comparação dos resultados de concentração de *Enterococcus* (UFC/100 mL) monitorados no evento 1 (em preto), com os estimados pelo modelo nos cenários 1 (real, em azul) e 2 (hipotético, em bordô).

Nas Figuras 9 a 12, são apresentados esses resultados na forma de mapas, evidenciando a propagação das plumas, considerando os cenários 1 e 2, para os tempos: (a) “antes” da abertura das comportas para a orla, (b) 30 minutos após a abertura das comportas, (c) 23 horas após a abertura das comportas e (d) 28 horas após a abertura das comportas.

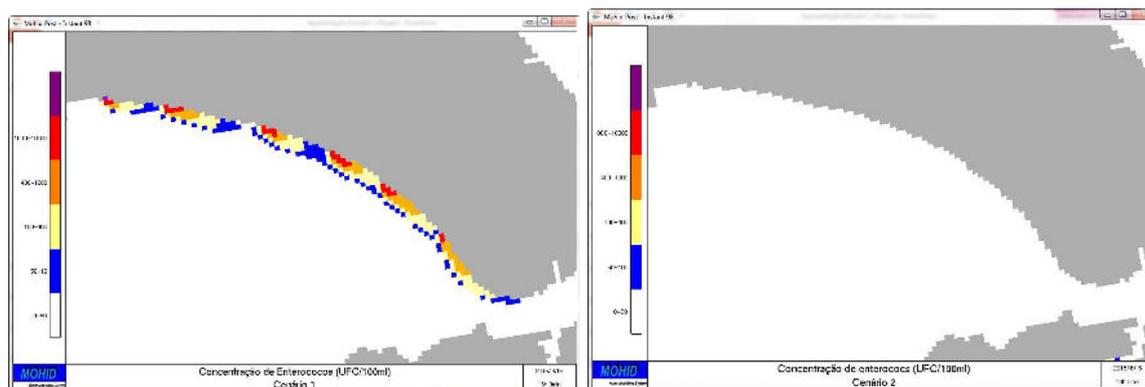


Figura 9: (a) Visualização dos resultados modelados para os cenários 1 (à esquerda) e 2 (à direita). Na presente visualização, as comportas para a orla estão fechadas, mas no cenário 1 as elevadas concentrações de *Enterococcus* devem-se a extravasamentos laterais à comporta (fato real verificado em campo). Os resultados estão expressos em concentração de *Enterococcus* (UFC/100 ml).

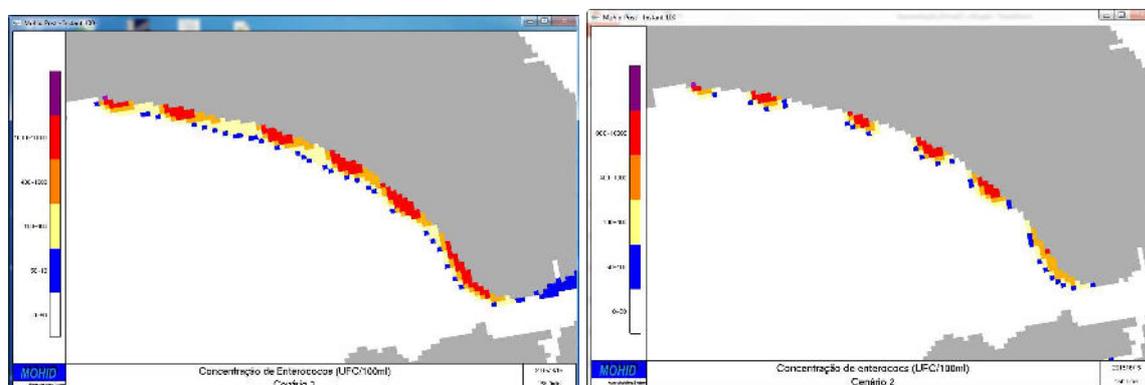


Figura 10: (b) Visualização dos resultados modelados para os cenários 1 (à esquerda) e 2 (à direita) 30 minutos após a abertura da comporta para a orla. Os resultados estão expressos em concentração de *Enterococcus* (UFC/100 ml).

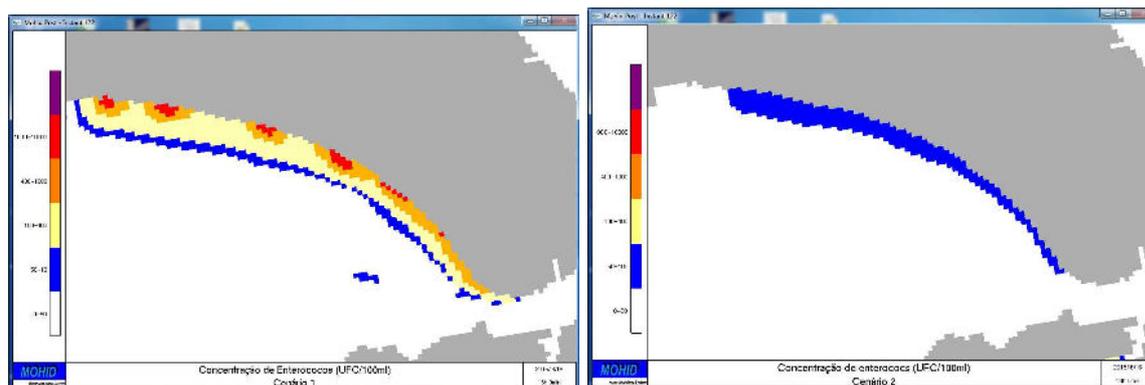


Figura 11: (c) Visualização dos resultados modelados para os cenários 1 (à esquerda) e 2 (à direita) 23 horas após a abertura da comporta para a orla. Resultados expressos em concentração de *Enterococcus* (UFC/100 ml).

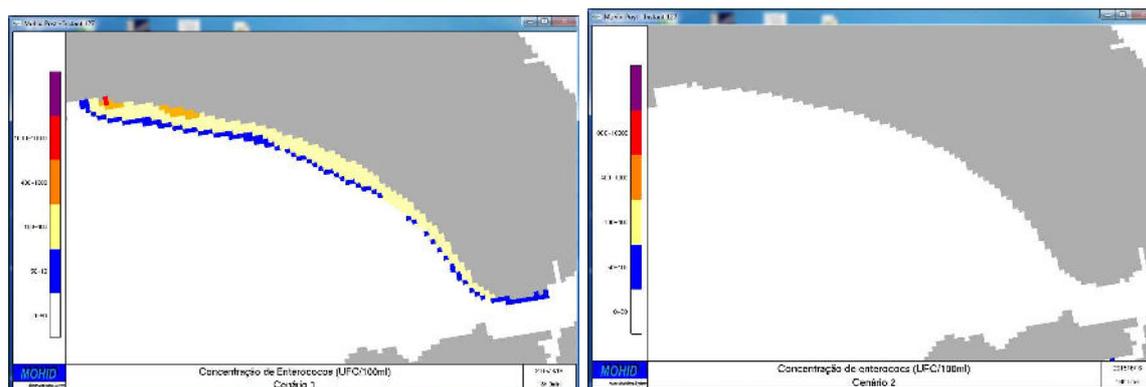


Figura 12: (d) Visualização dos resultados modelados para os cenários 1 (à esquerda) e 2 (à direita) 28 horas após a abertura da comporta para a orla. Resultados expressos em concentração de *Enterococcus* (UFC/100 ml).

CONCLUSÕES

Os resultados demonstram a potencialidade do sistema preditivo como ferramenta de gestão, dada sua aderência às condições verificadas em campo, podendo futuramente suas simulações serem utilizadas para complementar o monitoramento, especialmente quando há um intervalo de tempo entre a amostragem da qualidade da água e obtenção de resultados, principalmente durante períodos de elevada precipitação e consequente, abertura de comportas com descarga da água de drenagem urbana às praias.

Com relação à otimização da operação das comportas dos canais incluindo as comportas intermediárias abertas (cenário 2), embora o modelo tenha sinalizado como situação favorável após evento de chuva (evento do dia 15 de junho de 2015), recuperando as condições balneares nas praias em tempo sensivelmente menor do que no cenário 1 (situação atualmente praticada na operação das comportas dos canais de drenagem em Santos), faz-se necessário sua validação a partir de amostragens e monitoramento em campo, pois o sistema de comportas encontra-se em reforma. Através de campanhas adicionais para a confirmação com dados de campo, tal manobra poderá ser utilizada para otimizar a gestão da qualidade das águas balneares nas praias de Santos, considerando as condições e previsões meteorológicas e de altura de maré. Desta forma, é esperado que em se reduzindo os volumes de água lançados pelos canais de drenagem diretamente às praias, haja consequente redução no tempo em que as praias permanecem impróprias para banho. Há que se considerar ainda, a possibilidade de, em eventos de chuvas um pouco mais fracas, sequer haver a necessidade de abertura de comportas para as praias, otimizando o tempo em que as praias santistas permanecem próprias para banho durante o ano.

De qualquer forma, os resultados são promissores e abrangentes em termos de possibilidades de aplicação na gestão balnear, na gestão dos sistemas de drenagem urbana e de saneamento básico nas zonas costeiras. Isso reforça a importância de se ter um modelo bem calibrado para a hidrodinâmica e a qualidade da água, como ferramenta complementar ao monitoramento em campo, e a partir da operacionalização do modelo, que ele possa se tornar uma ferramenta adicional para a disseminação de informações seguras quanto às previsões das condições das águas balneares.

RECOMENDAÇÕES

Dada a potencialidade já identificada do sistema preditivo, recomenda-se a continuidade do estudo com refino da calibração do modelo e verificação em campo, dos resultados simulados no cenário hipotético 2 de operação, considerando abertura das comportas intermediárias nas operações de descargas dos canais de drenagem de Santos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMBROZEVICIUS, Andrea Pimenta. Poluição aquática em Santos (SP): uma abordagem interdisciplinar. Dissertação de mestrado. Interunidades em Ciência Ambiental. USP. São Paulo, 2010.

- Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-23112011-090931/pt-br.php>
Acessado em 09/05/2019.
- BRASIL. MMA. CONAMA. Resolução nº 274, de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre os critérios de balneabilidade em águas. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, poder Executivo, Brasília, DF, nº 18, de 25 de janeiro de 2001, Seção 1, páginas 70-71.
 - GUTIÉRREZ, E.; MALGRAT, P.; SUÑER, D.; OTHEGUY, P. Real Time Management of Bathing Water Quality in Barcelona. Novatech. 2010.
 - HARARI, J., FERREIRA, F. R., DEGASPARI, F. A., SARTOR, S. M. Modelagem numérica da hidrodinâmica e da dispersão de esgoto na Baía de Santos, SP. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 1, p. 205-214, 2013.
 - KAY, D., BARTRAM, J., PRÜSS, A., ASHBOLT, N., WYER, M. D., FLEISHER, J. M., REES, G. Derivation of numerical values for the World Health Organization guidelines for recreational waters. Water Research, 38(5), 1296-1304, 2004.
 - LAMPARELLI, C. C. e NERY, D. Estudo da Influência da implantação de Emissários Submarinos na Qualidade das Praias. In: Anais do 18º Simpósio Nacional de Estatística. Águas de São Pedro, 2008.
 - LEITÃO, J., LEITÃO P., SILVA, A., GALVÃO, P., RIBEIRO, J., MALHADAS, M., SANTOS, H. e AIRES, E. Sistema Aquasafe nos portos de Leixões e Viana do Castelo. In: Anais da 8ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. Lisboa, 2013.
 - LEITÃO, P., LEITÃO, J., RIBEIRO, R., SAMPAIO, A., GALVÃO, P., RIBEIRO, J., e SILVA, A. Serviços de previsão de alta resolução de condições meteo-oceanográficas e de eventos de poluição costeira. In: Anais do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Aveiro, 2015.
 - LEITÃO, P., MALGRAT, P., OTHEGUY, P., GALVÃO, P., BRAUNSCHWEIG, F., SILVA, A. E NEVES, R. Previsão de episódios de contaminação fecal em praias inseridas em meio urbano. Seminário de Risco – IST. Lisboa, 2009. Disponível em: <ftp://ftp.mohid.com/MohidPapers/Risk_Seminar_IST_2009/ComunicacaoCowamaRisco_Final.doc>.
 - LYONNAISE DES EAUX. Press release. Disponível em: <http://www.epresspack.net/suez-environnement/download/?id=2668&pn=656731-pdf>. Acessado em 10/05/2019.
 - RAMOS JÚNIOR, F. C. Estudo hidrológico preliminar de Santos-SP. Relatório Interno. Sabesp. 2014.
 - RIBEIRO, R. B.; SAMPAIO, A. F. P.; LEITAO, P. M. C. F. L.; LEITAO, J. M. C. F. L. e PUIA, H. L. Modelagem numérica operacional do nível do mar e correntes para o Estuário de Santos. In: Anais do XI Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite. Arraial do Cabo, 2015.
 - RIBEIRO, R. B.; LEITÃO, J. M. C. F. L.; LEITÃO, P. M. C. F. L.; PUIA, H. L. e SAMPAIO, A. F. P. Integration of high-resolution meteocean forecast and observing systems at Port of Santos. In: Proceedings of IX PIANC-COPEDEC. Rio de Janeiro, 2016.
 - RIBEIRO, Renan; SAMPAIO, Alexandra; LEITÃO, José; LEITÃO, Paulo; RODRIGUES, João. Sistema de previsão da qualidade das águas balneares como ferramenta de gestão. Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. 13 SILUSBA. Porto/Portugal. Setembro/2017.
 - RIBEIRO, R. B.; SAMPAIO, A. F. P.; RUIZ, M. S.; LEITÃO, J. C.; LEITÃO, P. C. First Approach of a Storm Surge Early Warning System for Santos Region. In: NUNES L., GRECO R., MARENGO J. (eds) Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options. Springer, Cham. 2019. p. 135–157.
 - SAMPAIO, A. F. P., CHERBAKIAN, E. H., RIBEIRO, R. B., RAMOS JUNIOR, F. C. Novas ferramentas para previsão e gestão da qualidade balnear. Palestra apresentada na ABES – Subseção Baixada Santista. Santos, 2016.
 - SILVA, A.; LEITÃO, J. C.; GALVÃO, P.; LEITÃO, P. C.; MALHADAS, M. S.; SANTOS, H., RIBEIRO, J., AIRES, E.; BARTOLOMEU, S. e RODRIGUES, J. Projecto AMOS - serviço de previsão para suporte à navegação e atividade portuária. In: Anais da 4ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 2016.
 - SUEZ. Lyonnaise des Eaux, a subsidiary of SUEZ ENVIRONNEMENT, rolls out innovative solutions to monitor bathing water quality. Press Release, 2014. Disponível em: <http://www.epresspack.net/suez-environnement/download/?id=2668&pn=656731-pdf>. Acessado em 10/05/2019.
 - SUÑER, David; MALGRAT, Pere; GUTIÉRREZ, Enrique; CLOCHARD, Bertrand. COWAMA (Coastal Water Management) Integrated and Real Time Management System of Urban Water Cycle to Protect the Quality of Bathing Waters. NOVATECH, 2007. SESSION 8.3. Disponível em: http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/25323/1689_078suner.pdf?sequence=1. Acessado em 10/05/2019.

20. TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados, [s. l.], v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
21. USEPA. National Beach Guidance and Required Performance Criteria for Grants, 2014 Edition. EPA-823-B-14-001. Julho, 2014.
22. USEPA. Predictive Tools for Beach Notification Volume I: Review and Technical Protocol. EPA-823-R-10-003. November, 2010.
23. USEPA. Six Key Steps for Developing and Using Predictive Tools at Your Beach. Office of Water 820-R-16-001. March, 2016.
24. USGS Beach monitoring FAQ. Ohio Water Science Center. http://oh.water.usgs.gov/beach_faq.htm Acessado em 04/02/2019.
25. VIEGAS C. N., NUNES, S., FERNANDES, R. e NEVES, R. Streams contribution on bathing water quality after rainfall events in Costa do Estoril – a tool to implement an alert system for bathing water quality. Journal of Coastal Research, Special Issue 56, p. 1691-1695, 2009.