

## VI-047 - ANÁLISE DE CONTAMINAÇÃO DE ÁGUAS COSTEIRAS POR EMISSÁRIOS SUBMARINOS DE ESGOTOS

### **Renato Castiglia Feitosa<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Doutor em Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica pela COPPE/UFRJ. Pesquisador da Escola Nacional de Saúde Pública da Fundação Oswaldo Cruz – FIOCRUZ.

### **Paulo César Colonna Rosman<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Phd em Engenharia Oceânica – Massachusetts Institute of Technology - MIT, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica pela COPPE/UFRJ. Professor COPPE / UFRJ - Programa de Engenharia Oceânica.

### **Odir Clécio da Cruz Roque<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Doutor em Saneamento Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP) - FIOCRUZ. Pesquisador Titular da Fundação Oswaldo Cruz - FIOCRUZ.

### **Tatsuo Carlos Shubo<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Mestre em Saneamento Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP) - FIOCRUZ. Tecnologista da Fundação Oswaldo Cruz - FIOCRUZ.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Brasil 4365, Maguinhos, Rio de Janeiro – RJ CEP: 21040-900 – Brasil – Tel: (21) 2598-2576, Brasil - e-mail: [renatocf@ensp.fiocruz.br](mailto:renatocf@ensp.fiocruz.br)

## **RESUMO**

O lançamento através de emissários submarinos de esgotos tem sido o destino final de efluentes urbanos em virtude da alta capacidade oceânica na depuração da matéria orgânica. A avaliação do impacto ambiental e o atendimento às classes estabelecidas pela legislação aos corpos de água, segundo seus usos preponderantes está baseado na determinação das concentrações de bactérias do grupo coliforme em plumas de emissários. Este trabalho analisa a pluma de contaminação de coliformes dos emissários existentes na costa fluminense, considerando uma variação horária na taxa de decaimento em função da temperatura, salinidade e radiação solar. O estudo da circulação hidrodinâmica e do transporte da pluma de contaminantes, foi realizado pelo sistema de modelos SisBAHIA, desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ. Os resultados exprimem os níveis de concentração do contaminante em águas costeiras, que no presente estudo são retratados pelo NMP de Coliformes Fecais (CF)/100 ml. O modelo RSBWIN foi utilizado para determinação das características da pluma no campo próximo, tais como espessura, profundidade de confinamento e diluição inicial, que são imprescindíveis na quantificação dos níveis de radiação solar incidente sobre a pluma de esgotos, e, conseqüentemente, na degradação do contaminante no meio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissários submarinos,  $T_{90}$  variável, decaimento bacteriano, radiação solar.

## **INTRODUÇÃO**

Emissários submarinos de esgotos têm sido adotados como destino final de efluentes domésticos, devido à grande eficiência oceânica na depuração da matéria orgânica. A avaliação do impacto do lançamento esgotos no ambiente marinho é realizada com base na concentração de coliformes fecais (CF) da pluma efluente. Considerando o contaminante em questão como não conservativo, a quantificação da variação temporal de massa passa a ser uma importante premissa a ser determinada.

No ambiente marinho, a taxa de decaimento bacteriano depende principalmente de fatores como: temperatura ( $T$ ), salinidade ( $S$ ) e radiação solar ( $I$ ). Este último varia ao longo das horas do dia e ao longo dos dias do ano, sendo também função da localização (latitude) da região de estudo e das condições atmosféricas. Como ao longo do dia as variações  $T$ - $S$  não são significativas, apenas a radiação solar exercerá uma significativa influência sobre o decaimento bacteriano. A quantificação da radiação solar incidente na superfície livre se baseou na formulação proposta por Martin e McCutcheon (1999). A mitigação da radiação solar ocorre durante sua propagação pelo ar e pela água. Deste modo pode-se afirmar que a taxa de decaimento bacteriano

depende de condições meteorológicas, profundidade da pluma e turbidez ambiente. A profundidade de confinamento depende das variações verticais de densidade do ambiente marinho.

Através da análise comparativa realizada por Feitosa e Rosman (2007), a formulação proposta por Mancini (1978) é utilizada na determinação da taxa de decaimento. Essa taxa é representada pelo parâmetro  $T_{90}$ , que corresponde ao tempo necessário, em horas, para que ocorra uma redução de 90% na concentração inicial de coliformes fecais. A quantificação do decaimento é um dos principais parâmetros na modelagem de contaminantes em águas costeiras.

Este trabalho analisa aspectos relativos ao transporte de plumas efluentes dos emissários submarinos de esgotos da Barra da Tijuca (ESEBT) e Ipanema (ESEI) localizados, respectivamente, na zona oeste e sul do município do Rio de Janeiro, juntamente com o emissário de Icaraí (ESEIC) localizado no município de Niterói. O sistema de modelos SisBaHiA (Rosman, 2000), desenvolvido na Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica da COPPE/UFRJ foi empregado na determinação do padrão de correntes e nos processos de advecção e difusão do contaminante no meio. O modelo RSBWIN (Roberts, 1989) foi utilizado para determinação das características da pluma no campo próximo, como a espessura e a profundidade de confinamento, imprescindíveis na quantificação da radiação solar incidente sobre a mesma.

Os resultados apresentam os níveis de concentração de contaminante no meio sob diferentes cenários onde é avaliada a influência dos níveis de radiação solar na degradação do contaminante

## PROCESSOS DE MISTURA ENTRE O CONTAMINANTE E O MEIO

O processo inicial de mistura do esgoto com a água ambiente apresenta duas regiões marcadamente distintas. O campo próximo que ocorre nas imediações da linha difusora do emissário, na chamada zona de mistura ativa, região de intensa turbulência, onde a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação difusora. Na medida em que se afasta da linha difusora, a pluma ejetada se mistura com a água ambiente, até tornar-se neutra. Na segunda região, então chamada de campo afastado ou zona de mistura neutra, a pluma neutra é transportada passivamente pelas correntes oceânicas. Devido às diferenças nos padrões de escoamento entre as zonas de mistura ativa e passiva, são adotadas metodologias de modelagem específicas para cada zona.

Em geral, no caso de emissários submarinos de esgotos, os efluentes de densidade inferior são lançados em águas oceânicas através de tubulações difusoras. O jato efluente originado em cada orifício desta linha difusora possui velocidade muito superior à velocidade do escoamento ambiente. Deste modo há, portanto, uma grande diferença na quantidade de movimento entre o jato efluente e as correntes ambientes. A diferença na quantidade de movimento caracteriza o típico escoamento da região de campo próximo. Como a massa específica do efluente é inferior à da água do mar, o cone de mistura então formado irá se elevar em direção à superfície livre, podendo atingi-la ou não, dependendo do perfil de densidades entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície. Após este processo inicial de mistura, tem-se uma pluma neutra sendo transportada passivamente pelas correntes oceânicas, caracterizando o transporte no campo afastado, ou na zona de mistura passiva.

A dinâmica do campo próximo pode ser resolvida através de modelagem computacional, onde são determinadas as principais características da pluma na região do campo próximo: comprimento da zona de mistura, diluição inicial, elevação do centro e espessura da pluma. Estas características dependem fortemente da intensidade e direção das correntes incidentes sobre a tubulação difusora e do perfil de densidades entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície livre. Quanto maior for esta variação de densidade, menor será a diluição e a elevação alcançada pela pluma. A determinação deste último fator é o principal responsável no decaimento de bactérias do grupo coliforme, uma vez que a radiação solar incidente na pluma de contaminantes depende fortemente da profundidade em que a pluma se encontra estabelecida.

Em uma determinada distância do ponto de lançamento inicia-se a zona de mistura passiva. A pluma contaminante comporta-se neutramente em relação à água receptora e não interfere mais na hidrodinâmica ambiente. Isto ocorre uma vez que as diferenças entre as quantidades de movimento do efluente e do fluido receptor se anulam. Nesta região a pluma é transportada passivamente pelas correntes oceânicas, e a distribuição de concentrações no corpo d'água receptor da pluma de contaminantes dependerá principalmente dos seguintes processos, em geral altamente variáveis no tempo e no espaço:

- Advecção promovida pelas correntes oceânicas responsáveis pelo transporte do contaminante em questão, dependente da qualidade do modelo hidrodinâmico que gera o campo de correntes que adveccta a pluma.
- Difusão turbulenta do contaminante gerada por tensões de atritos internos na massa d'água, tensões de atrito do fluido com o fundo e atrito de vento na superfície livre. Em geral o transporte de plumas passivas é dominado pela advecção, mas a difusão turbulenta também é de fundamental importância. E, como no caso da advecção, também depende da qualidade do modelo hidrodinâmico, neste caso da qualidade do modelo de turbulência adotado.
- Reações cinéticas de produção ou decaimento do contaminante no meio receptor. No caso de esgotos sanitários, tendo coliformes fecais como contaminantes de referência, são consideradas reações de decaimento de primeira ordem. Como ao longo do dia na região em estudo, não ocorrem variações significativas de salinidade e temperatura, a variação na taxa de decaimento bacteriano será praticamente função da intensidade de radiação solar incidente.

## DECAIMENTO BACTERIANO NO AMBIENTE MARINHO

A distribuição e a quantidade de bactérias de origem entérica, indicadoras de contaminação fecal no ambiente marinho, dependem da advecção e dispersão promovidas pelas correntes oceânicas e por fatores responsáveis pelo decaimento ou crescimento das populações bacterianas.

Os principais fatores influentes nas concentrações de bactérias podem ser convenientemente classificados em três categorias: físicos, físico-químicos, bioquímico-biológicos. Entretanto, além destes fatores podem ocorrer sinergias de efeitos osmóticos e foto-oxidação, e interferências, tais como sedimentação versus foto-oxidação. Na modelagem numérica de bactérias indicadoras, a taxa de decaimento é comumente representada pelo parâmetro  $T_{90}$ , que corresponde ao tempo necessário para que ocorra uma redução de 90% na população original de bactérias.

A quantificação do decaimento de bactérias indicadora de contaminação fecal é de extrema importância na determinação dos níveis de concentração destes microrganismos em águas costeiras. Vários estudos de campo e laboratório têm sido realizados no intuito de se determinar as taxas de decaimento de microrganismos indicadores de contaminação no ambiente marinho. No entanto, a conclusão que tem sido obtida destes estudos, é a dificuldade de se reconhecer ou mensurar os diversos fatores responsáveis pela degradação bacteriana em águas marinhas. Entretanto, Feitosa & Rosman (2007) verificaram através de uma compilação de estudos divulgados na literatura, a correlação do decaimento bacteriano com variações de radiação solar (I), temperatura (T) e salinidade (S).

A equação proposta por Mancini (1978) fornece a taxa de decaimento bacteriano em função da variação simultânea dos parâmetros mencionados acima.

$$k = [0,8 + 0,006.(% \text{ água salgada})] 1,07^{(t-20)} + \bar{I}$$

Com base na avaliação realizada por Feitosa e Rosman (2007) em diferentes formulações matemáticas que quantificam o decaimento de coliformes fecais, verificou-se que a formulação de Mancini (1978) fornece boas estimativas das taxa de decaimento destes microrganismos no ambiente marinho.

## CARACTERÍSTICAS GERAIS

A Figura 1 a seguir ilustra a localização dos emissários submarinos da Barra da Tijuca (ESEBT), Ipanema (ESEI) e Icará (ESEIC). As vazões empregadas no presente estudo correspondem respectivamente a 5,1, 7,5, 0,97 m<sup>3</sup>/s. Em função das épocas distintas em que os emissários foram concebidos, são consideradas concentrações de coliformes fecais de 4,2.10<sup>7</sup> NMP/100 ml para o ESEBT e ESEIC e 7.10<sup>7</sup> para o ESEI. Isto se deve a exigência atual de que lançamentos de efluentes domésticos em águas costeiras devam ser precedidos de tratamento primário, cuja eficiência considerada na remoção de coliformes fecais foi da ordem de 40%.



Figura 1: Localização da região de estudo.

A batimetria e a discretização do domínio modelado são apresentados na Figura 2 e na Figura 3 seguintes. Os dados de batimetria, foram obtidos de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, sendo também utilizada a carta Rio de Janeiro nº SF 23-Z-B-IV em escala 1:100.000 obtida a partir de imagem de satélite de 1992. A discretização do domínio modelado é composta por um conjunto de 1656 elementos finitos (7030 nós). No módulo 3D foram definidos 21 níveis de profundidade ao longo da coluna d'água, formando um conjunto com 21×7030 pontos de cálculo.

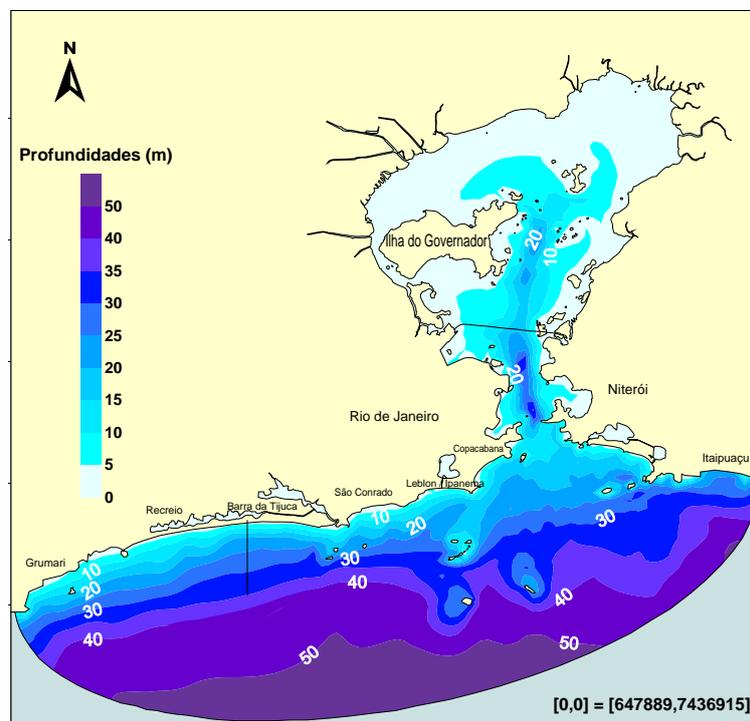
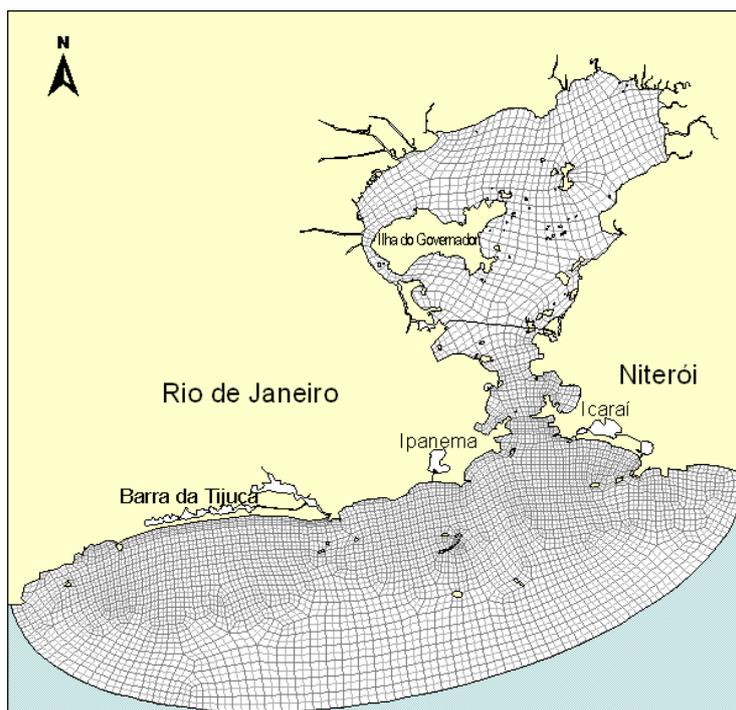


Figura 2 - Batimetria da região em estudo



**Figura 3: Malha de discretização do domínio modelado.**

Os elementos da malha são subparamétricos, com funções de forma lagrangeanas lineares para definir a forma do elemento (quadrangular ou triangular), e quadráticas para aproximar as variáveis hidrodinâmicas e ambientais. A discretização espacial é feita por elementos finitos quadrangulares biquadráticos que possuem 9 nós, um em cada vértice, definindo sua geometria linear, um no meio de cada lado além de um no centro do elemento, definindo funções biquadráticas para as demais grandezas. Os elementos quadrangulares, por utilizarem tais funções, fornecem melhores aproximações do que os triangulares.

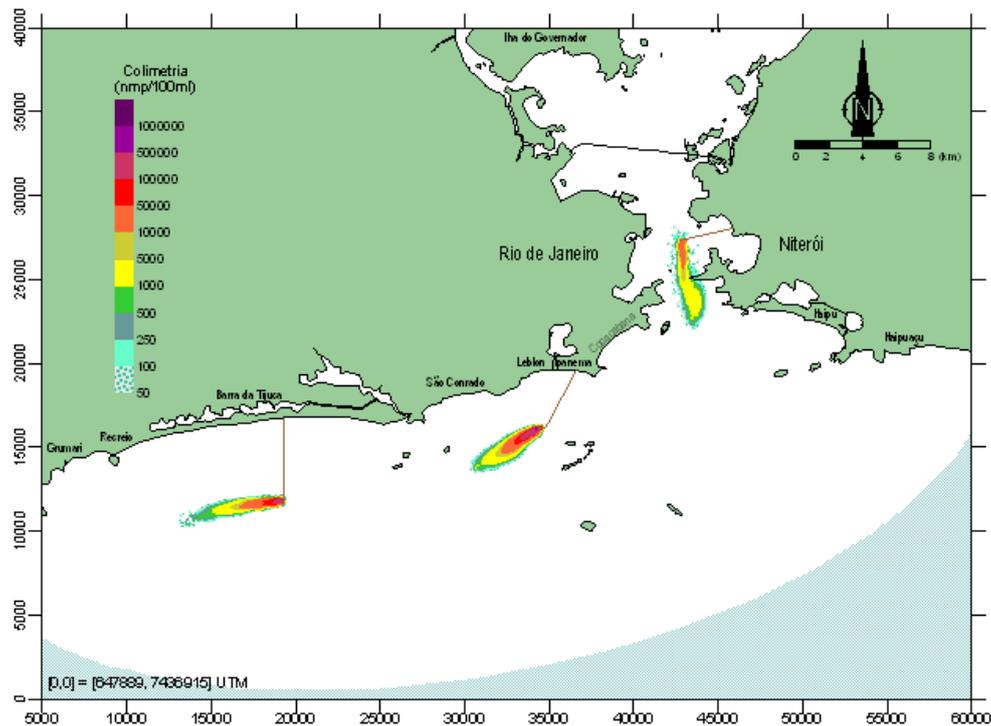
A radiação solar incidente sobre a pluma depende da profundidade em que esta se encontra estabelecida. A profundidade de Secchi adotada, que quantifica o grau de penetração dos raios de luz na massa líquida foi de 8m nas regiões adjacentes ao ESEI e ESEBT. Na região em torno do ESEIC, devido ao menor nível de turbidez das águas da Baía de Guanabara foi adotada uma profundidade de Secchi de 4m. Os valores de salinidade e temperatura da água, supostos constantes, foram respectivamente iguais a 35‰ e 24°C.

As condições hidrodinâmicas na região costeira são dominadas por forçantes remotos. Nas condições de bom tempo há uma predominância de correntes rumando para oeste. Sob ação de sistemas frontais há uma inversão das correntes que passam a atuar rumo a leste. Entretanto, na região na embocadura da Baía de Guanabara há dominância das correntes de maré, que se dirigem para o interior da Baía durante a enchente, e para o exterior na vazante.

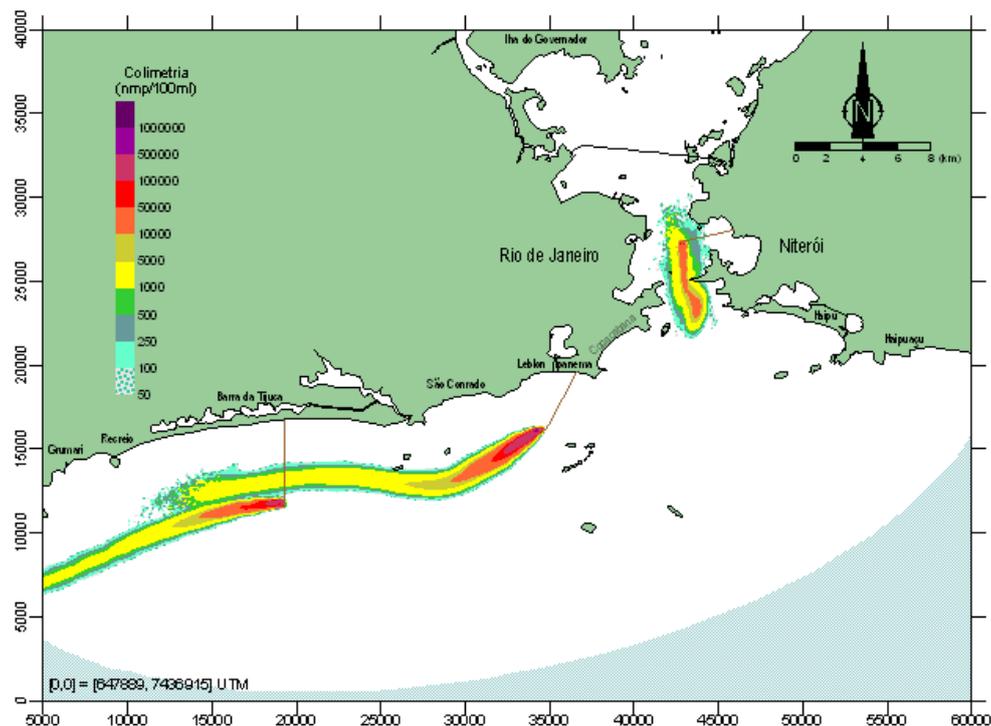
## RESULTADOS

Os resultados são apresentados em plumas representando isolinhas de concentrações de coliformes fecais no meio sob diferentes cenários, que comparam a influência da radiação solar em condições hidrodinâmicas e meteorológicas distintas.

A Figura 4 e a Figura 5 mostram a influência das condições meteorológicas nas taxas de decaimento bacteriano em um campo de correntes orientado de leste para oeste. As condições meteorológicas são representadas pelo percentual de cobertura de nuvens no mesmo instante de simulação onde é comparada a condição de céu claro (5%) com céu totalmente nublado (100%). Nestas figuras podem ser observados maiores comprimentos da pluma de contaminantes, como consequência de uma taxa menor de decaimento bacteriano decorrente da maior atenuação da radiação solar na situação de céu totalmente nublado. Em função do decaimento reduzido ocorre praticamente a superposição das plumas dos emissários da Barra da Tijuca e Ipanema.



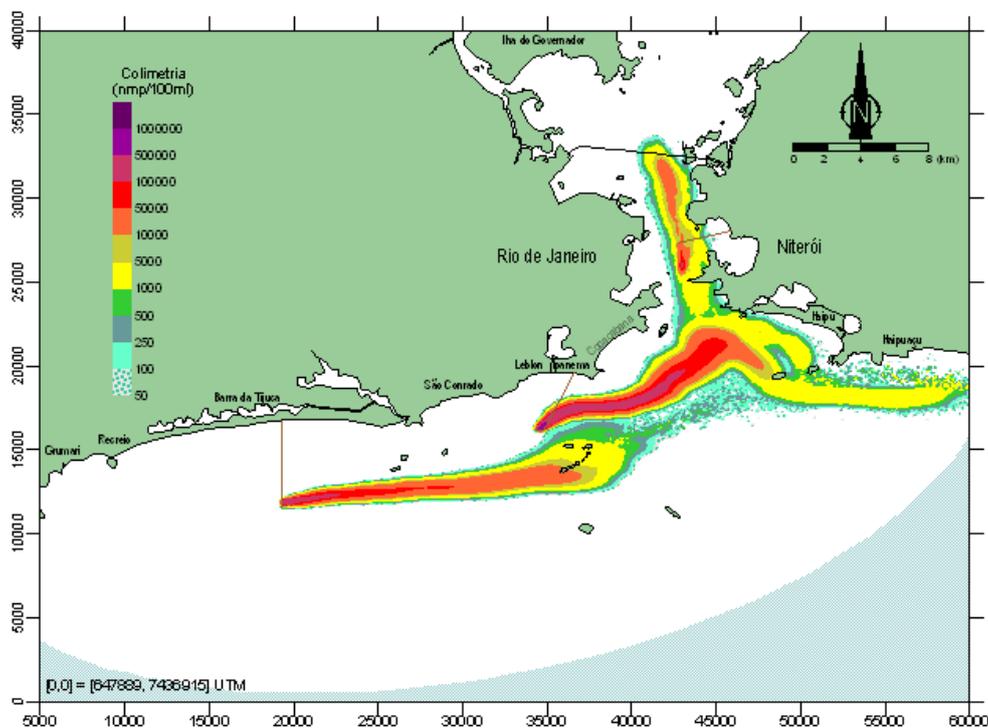
**Figura 4: Isolinhas de concentração da pluma de coliformes fecais para a condição de verão com céu claro, sob ação de correntes de leste para oeste. Parte superior da pluma atingindo a superfície livre com espessura aproximada de 15 metros. Intensidade de radiação solar correspondente às 14:00.**



**Figura 5: Isolinhas de concentração da pluma de coliformes fecais para a condição de verão com totalmente nublado, sob ação de correntes de leste para oeste. Parte superior da pluma atingindo a superfície livre com espessura aproximada de 15 metros. Intensidade de radiação solar correspondente às 14:00.**



A Figura 8 seguinte ilustra sob o padrão de correntes de oeste para leste as isolinhas de concentração de coliformes fecais na ausência de radiação solar. Neste cenário são observados os maiores domínios de concentração de coliformes, devido ao baixo decaimento bacteriano que ocorre ao longo do período noturno. Isto acarreta o impacto nas regiões adjacentes a embocadura da Baía de Guanabara.



**Figura 8: Isolinhas de concentração da pluma de coliformes fecais para a condição de verão com totalmente nublado, sob ação de correntes de oeste para leste. Parte superior da pluma atingindo a superfície livre com espessura aproximada de 15 metros. Ausência de radiação solar correspondente às 5:00.**

## CONCLUSÕES

O estudo do transporte de contaminantes, considerando coliformes fecais como contaminantes de referência, depende fortemente das condições ambientais simuladas. Em linhas gerais a radiação solar mostrou o maior efeito deletério na mitigação das concentrações de coliforme fecais no ambiente marinho. Temperatura e salinidade são fatores secundários e relevantes apenas na ausência de radiação solar. A diminuição dos níveis de radiação solar reflete na diminuição das taxas de decaimento bacteriano, e, conseqüentemente remete a maiores níveis de concentração do contaminante no meio.

A utilização de modelos de campo próximo é de grande relevância na determinação da profundidade de submersão e espessura da pluma, que são reguladas pelo gradiente de densidade entre o ponto de lançamento do efluente e a superfície livre. O posicionamento da pluma regula a quantidade de radiação solar incidente sobre a mesma. No estudo da contaminação da pluma de coliformes, recomenda-se à utilização de taxa de decaimento  $T_{90}$  variável, na tentativa de simular condições reais. A adoção de um  $T_{90}$  fixo na modelagem de plumas de emissários submarinos de esgotos só é razoável em situações onde não há incidência de radiação solar sobre a pluma, quando em condições de extrema submersão e turbidez ambiente.

As maiores concentrações de coliformes são observadas imediatamente antes do amanhecer, em virtude da atenuação do decaimento bacteriano durante o período noturno. Sob elevados níveis de radiação solar o aumento das taxas de decaimento bacteriano é responsável pelos menores índices de concentração no meio, diminuindo consideravelmente a dimensão da região impactada.

O emprego de modelagem computacional na avaliação do impacto provocado pelo lançamento de esgotos domésticos por emissários submarinos se apresenta como uma ferramenta de grande valia, auxiliando a

tomada de decisões quanto ao ponto de lançamento ideal, e delimitando as áreas impactadas pelo o lançamento do efluente.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FEITOSA, R. C.; ROSMAN, P. C. C. Emissários Submarinos de Esgotos: Aspectos de Qualidade de Água e Modelagem Computacional, in Métodos Numéricos em Recursos Hídricos ed. ABRH, v.8, p. 1–170, 2007
2. MANCINI, J.L. Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates Under Various Conditions. Journal Water Pollution Control Fed., v.50, n.11, p. 2477-2484, nov. 1978.
3. MARTIN, J.L., McCUTCHEON S.C. Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling. Florida, Lewis Publishers, Inc., 1999
4. ROBERTS, P.J.W., SNYDER W.H, and BAUMGARTNER D.J. Ocean Outfall I: Submerged Wastefield Formation”. Journal of Hydraulics Engineering, ASCE, v. 115, n. 1, p. 1-25, Jan 1989.
5. ROSMAN, P.C.C. SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – Documentação de Referência Técnica. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.