



## II-305 - MODELAGEM COMPUTACIONAL DA PLUMA DE EFLUENTES DO EMISSÁRIO SUBMARINO DE FORTALEZA

**Silvano Porto Pereira<sup>(1)</sup>**

Biólogo, mestre e doutorando em Engenharia Civil, área de concentração saneamento ambiental, pela Universidade Federal do Ceará. Biólogo da Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE.

**Paulo César Colonna Rosman**

Engenheiro Civil, EE/UFRJ, M.Sc., COPPE/UFRJ e Ph.D., Massachusetts Institute of Technology. Professor adjunto da COPPE/UFRJ.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Tomás Lopes, 85 – Praia de Iracema - Fortaleza - CE - CEP: 60060-260 - Tel: (85) 3219-1835 e-mail: [silvanopereira@terra.com.br](mailto:silvanopereira@terra.com.br)

### RESUMO

Após remoção de areia e resíduos sólidos na estação de pré-condicionamento, os esgotos de parte da cidade de Fortaleza são encaminhados a um emissário submarino onde são liberados a uma profundidade de 16 m e a 3,3 Km de distância da costa por um conjunto de 120 difusores. Após o processo de diluição inicial, a pluma de dispersão estabelecida é advectada e difundida devido à turbulência oceânica. O presente artigo apresenta os resultados de uma modelagem computacional, usando o software SISBAHIA, da dispersão de *Escherichia coli* presente nos efluentes lançados pelo emissário submarino de Fortaleza. Nos dois cenários simulados (abril e outubro de 2008) verifica-se que a pluma de dispersão não atinge as praias da região, estando a cerca de 2 km a área mais próxima da costa sem condições de balneabilidade por influência do emissário.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissário submarino, disposição oceânica, modelagem ambiental, SISBAHIA.

### INTRODUÇÃO

O Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos de Fortaleza (SDOES) é responsável pelo tratamento e disposição dos esgotos de parte da cidade de Fortaleza, abrangendo as bacias hidrográficas da vertente marítima. Após remoção de areia e resíduos sólidos na estação de pré-condicionamento, os esgotos são encaminhados para o emissário submarino de Fortaleza onde são liberados a uma profundidade de 16 m e a 3,3 Km de distância da costa por um conjunto de 120 difusores.

O efluente lançado pelo emissário é ejetado horizontalmente como um jato flutuante através dos difusores. Por ser mais leve que a água do mar, o efluente, cuja massa específica é próxima da água doce, eleva-se na coluna d'água devido ao empuxo até alcançar um nível de flutuabilidade neutra ou a superfície. Neste ponto o mesmo passa a espalhar-se lateralmente criando uma camada de espalhamento horizontal. Se as águas marinhas possuírem estratificação térmica e, conseqüentemente, estratificação de densidade, a camada de espalhamento horizontal pode encontrar-se submersa. Enquanto se a coluna estiver homogênea ou fracamente estratificada, a pluma emergirá, espalhando-se ao longo da superfície da água.

Estes jatos turbulentos misturam-se com a água do mar circundante, resultando numa rápida diminuição na concentração do efluente. A intensa mistura que ocorre próximo à fonte deve-se à turbulência gerada pelo efluente lançado, causada pelo momentum e pelo empuxo. Esta região, onde se processa a mistura inicial, é conhecida como campo próximo ou zona de mistura inicial e a máxima diluição alcançada denominada de diluição inicial, a qual é bastante influenciada pelas características do difusor, particularmente profundidade, comprimento, diâmetro individual das portas e espaçamento entre elas e pelas características do corpo receptor.

Após o processo de diluição inicial, a pluma de dispersão estabelecida é advectada e difundida devido à turbulência oceânica. A região onde tal difusão ocorre é denominada campo afastado. Este campo de mistura é bastante homogêneo e, dependendo do perfil vertical de densidade das águas receptoras, formar-se-á próximo à superfície marinha. À medida que este campo de mistura se afasta, devido às forças horizontais das correntes marinhas, ele se alarga sob efeito de uma propriedade que as águas marinhas apresentam, denominada de difusividade em vórtice. Esta difusividade faz com que qualquer concentração de substâncias presentes nas



águas marinhas tenda a ser difundida horizontalmente, proporcionando as características homogêneas que as águas marinhas apresentam localmente, embora possam variar de uma área para outra nos oceanos.

Simultaneamente a estes dois fenômenos, um terceiro passa a ocorrer. A concentração de microrganismos patogênicos lançados na água marinha decresce no meio, por ser este um ambiente adverso a sua sobrevivência. Este processo de inativação bacteriana, genericamente denominado de decaimento bacteriano e representado pelo parâmetro  $T_{90}$ , é função da radiação solar, salinidade, temperatura, predação e parasitismo, sedimentação e presença de substâncias bacteriostáticas e bactericidas. O presente artigo apresenta os resultados de uma modelagem computacional, usando o software SISBAHIA, da dispersão de *Escherichia coli* presente nos efluentes lançados pelo emissário submarino de Fortaleza.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os modelos utilizados para modelagem da hidrodinâmica e do transporte do contaminantes na região de interesse fazem parte do SisBaHiA<sup>®</sup> - Sistema Base de Hidrodinâmica. Detalhes sobre o SisBaHiA<sup>®</sup> no site [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

### Região modelada

A região modelada foi digitalizada de imagens georeferenciadas do *Google Earth*, convertida posteriormente para o Datum Córrego Alegre, zona 24S. A batimetria e rugosidade do domínio de interesse foram obtidos a partir das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil - DHN: nº 701, escala 1:13.0000 e nº 710, escala 1:50.000, atualizada até 2001.

### Cargas poluentes

Foram utilizados os valores de vazão variáveis ao longo do dia, correspondentes às médias horárias obtidas dos registros da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) no mês de novembro de 2008, conforme mostrado na Tabela 1. Para todos os horários foi considerado o valor médio da concentração de *E. coli* presente no efluente de  $4 \times 10^7$  NMP/100mL, obtido a partir de análises mensais realizadas pela própria companhia durante o ano de 2007.

### Decaimento bacteriano

Dentre os agentes responsáveis pelo decaimento bacteriano, a foto-oxidação induzida pela radiação solar se mostra como o mais importante. A morte celular pela radiação UV é causada, principalmente, por sua ação sobre o DNA, sendo a faixa de 260nm a mais efetiva. Neste trabalho o decaimento bacteriano foi considerado variável ao longo do dia, empregando-se a metodologia usada por FEITOSA e ROSMAN, 2007, que utiliza o modelo proposto por MANCINI 1978, levando em consideração a radiação solar incidente. Tal radiação foi calculada pelo método proposto por MARTIN e MCCUTCHEON, (1999). No cálculo, foi suposto cobertura de nuvem variável obtida a partir dos dados de radiação solar medida por uma Plataforma de Coleta de dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), mostrados na Figura 1. A profundidade de Secchi (usada para estimar o coeficiente de extinção da luz na água) de 4 m. Desta metodologia resultaram nos valores de  $T_{90}$  mostrados na Tabela 1.



**Tabela 1: Condições operacionais do emissário submarino de Fortaleza usadas em ambos os cenários de modelagem e condições ambientais médias dos valores usados.**

Hora do dia	Vazão	Conc. de E. coli	Cobertura de Nuvens (%)		Radiação solar na superfície (cal/cm <sup>2</sup> )		T90 (horas)	
			Out	Abr	Out	Abr	Out	Abr
1	2.1	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
2	1.7	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
3	1.5	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
4	1.2	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
5	1.0	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
6	1.2	4 x 10 <sup>7</sup>	16	64	7.4	4.8	9.4	12.0
7	1.6	4 x 10 <sup>7</sup>	36	97	21.9	9.4	4.5	8.8
8	2.2	4 x 10 <sup>7</sup>	33	90	39.0	18.6	2.8	5.9
9	2.3	4 x 10 <sup>7</sup>	36	89	52.3	26.7	2.1	4.8
10	2.5	4 x 10 <sup>7</sup>	23	88	66.0	32.7	1.7	4.1
11	2.8	4 x 10 <sup>7</sup>	19	87	72.8	35.6	1.5	3.9
12	3.1	4 x 10 <sup>7</sup>	16	85	73.6	37.3	1.5	3.6
13	2.9	4 x 10 <sup>7</sup>	13	76	67.9	39.3	1.6	3.2
14	2.9	4 x 10 <sup>7</sup>	14	75	56.6	33.2	1.9	3.7
15	2.9	4 x 10 <sup>7</sup>	16	76	40.5	23.7	2.6	4.6
16	2.8	4 x 10 <sup>7</sup>	23	73	21.5	13.2	4.5	6.6
17	2.7	4 x 10 <sup>7</sup>	66	85	0.0	0.0	22.7	21.6
18	2.6	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
19	2.6	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
20	2.6	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
21	2.5	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
22	2.5	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
23	2.4	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6
24	2.3	4 x 10 <sup>7</sup>			0.0	0.0	22.7	21.6

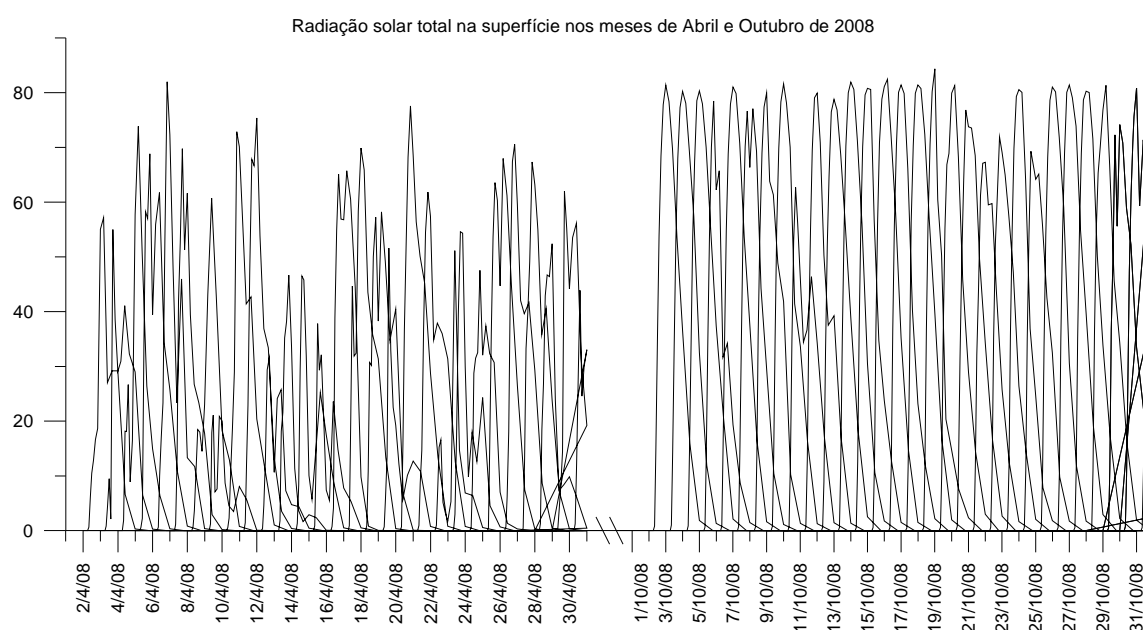
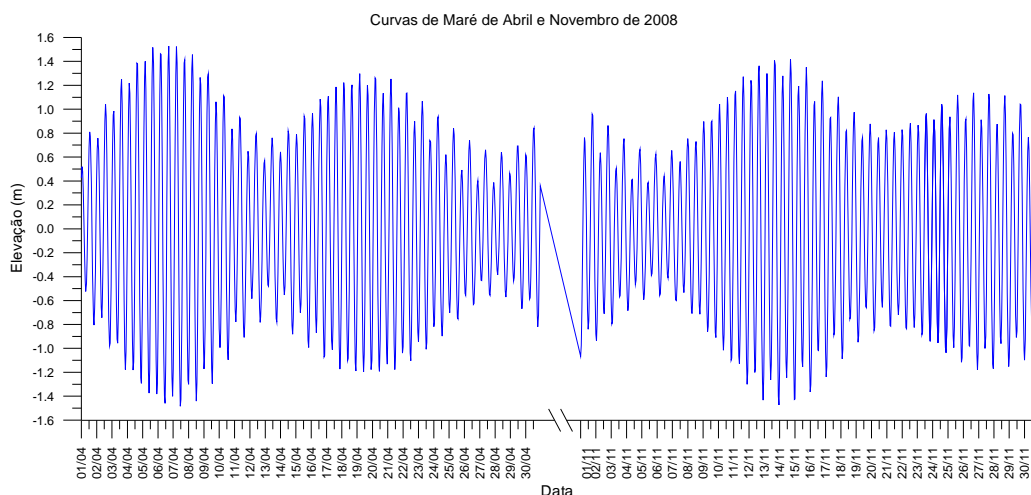


Figura 1: Valores de radiação solar total na superfície (em cal/cm<sup>2</sup>), obtidos da FUNCEME

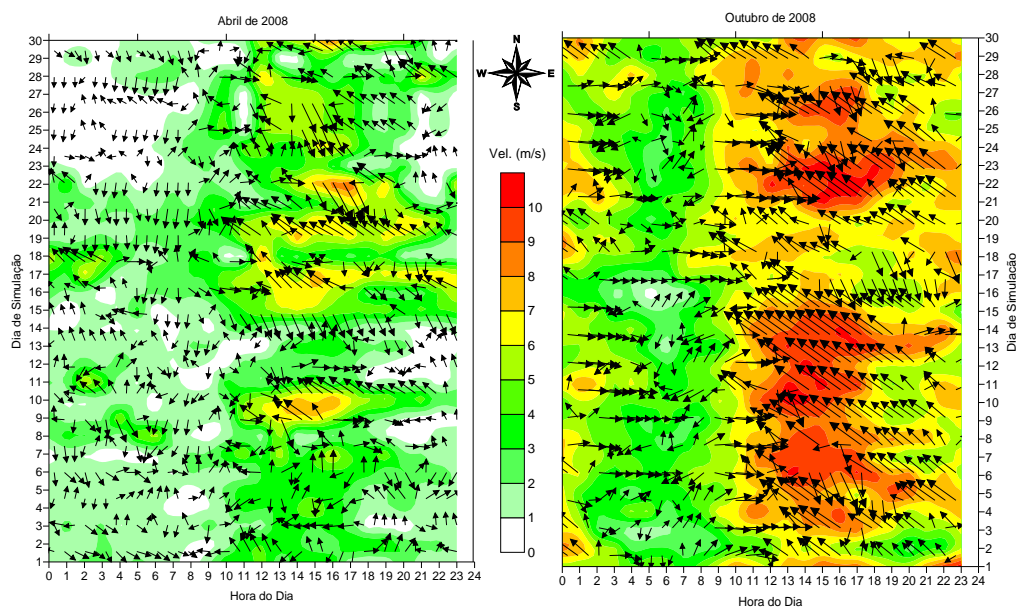
## Dados de maré e de vento

Para as simulações do modelo foram consideradas, ao longo das fronteiras de mar, elevações de maré geradas pelas constantes harmônicas obtidas a partir dos dados produzidos pelo marégrafo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) instalado no porto do Mucuri. A Figura 2 ilustra as curvas de maré típicas que foram usadas como condições de contorno para as simulações realizadas.

Utilizou-se dados de vento coletados a cada 10 minutos por uma estação meteorológica DAVES, modelo Weather Wizard III, instalada há quinze metros do mar e há 500 m do início do emissário (coordenadas 551221 e 9589241, Datum Córrego Alegre), de propriedade do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR). Na Figura 3 pode-se observar a série temporal de ventos usada para alimentar o modelo, nota-se grande constância dos ventos Sudeste durante o dia, havendo mudanças durante a noite em função da brisa terrestre.



**Figura 2:** Curvas de maré geradas pelas constantes harmônicas obtidas a partir da análise de maré dos dados produzidos pelo marégrafo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) instalado no porto do Mucuri.



**Figura 3:** Gráfico da série temporal de ventos fornecida ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e sentido do vento são indicados pelas setas, em relação à rosa de pontos cardeais.

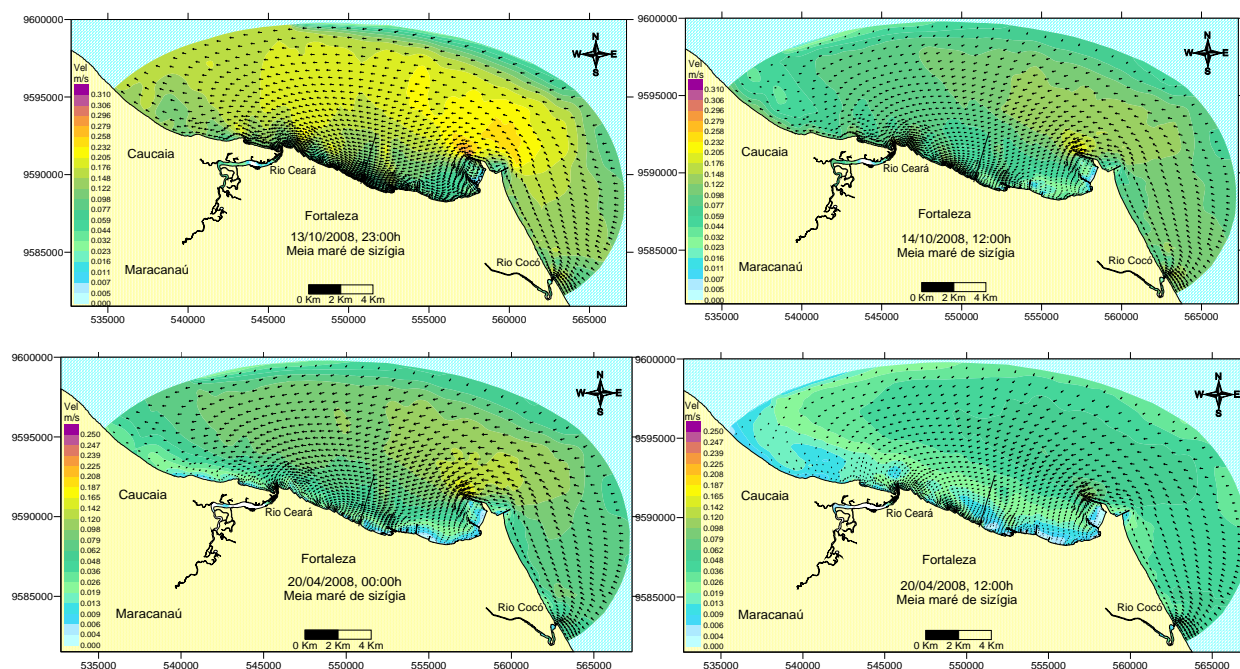


## RESULTADOS

A circulação na área de estudo é dominada pelas das ações das marés e dos ventos. Por ser uma região de pequenas profundidades, com correntes de maré relativamente fortes, ventos frequentes e inexistência de gradientes de densidade da coluna d'água, os padrões de circulação são barotrópicos, ou seja os gradientes horizontais de pressão devido a declives da superfície livre são muito maiores que os devidos às variações horizontais de densidade..

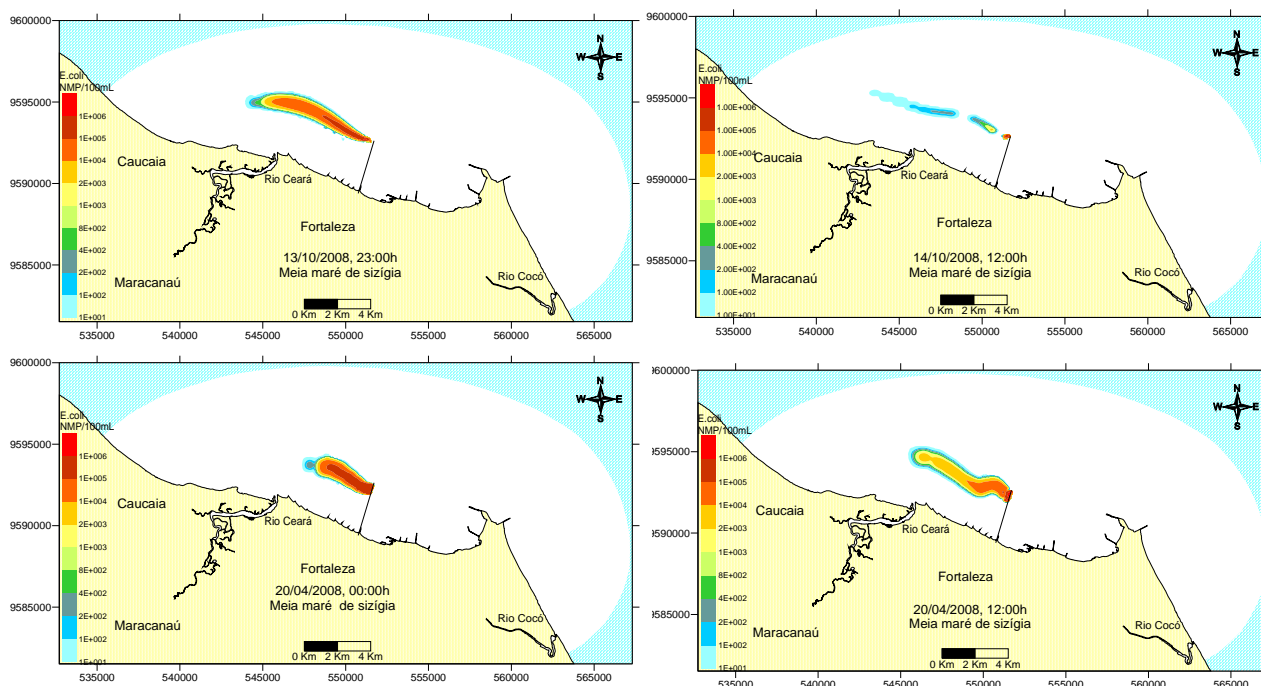
Na Figura 4 mostra-se uma sequência de mapas caracterizando padrões de correntes médias na vertical, em uma maré de sizígia. Para o mês de outubro as correntes médias na coluna d'água próxima aos difusores do emissário estiveram entre de 0,12 e 0,13 m/s. Já para o cenário de abril as correntes encontradas foram bem menores, estando entre 0,01 e 0,12 m/s, com média igual a 0,04 ms. Conforme se observa na Figura 4, as correntes observadas para o cenário do mês de abril são bem menores em virtude da mudança do comportamento dos ventos na região; como se observa na Figura 3.

Considerando medições realizadas na área pelo Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), as simulações do cenário de janeiro de 2008 mostraram-se coerentes com a realidade local, pois em junho de 2006 as correntes médias na coluna d'água da área variaram de 0,18 a 0,23 m/s, enquanto em abril de 2007 a média registrada foi de 0,17 m/s. Contudo para o cenário de abril de 2008 os valores obtidos foram bem inferiores às médias acima citadas, havendo necessidade de avaliação de dados de vento de outra estação próxima para o mesmo período. Tais dados estão sendo levantados de uma estação meteorológica da Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), instalada a 10 km da área de estudo.



**Figura 4: Caracterização da circulação hidrodinâmica em situação típica de maré de sizígia dos meses de abril e outubro de 2008. A direção das correntes é, predominantemente no sentido leste-oeste, havendo diminuição da intensidade de das mesmas em abril em função da diminuição das intensidades de vento mostradas na Figura 1.**





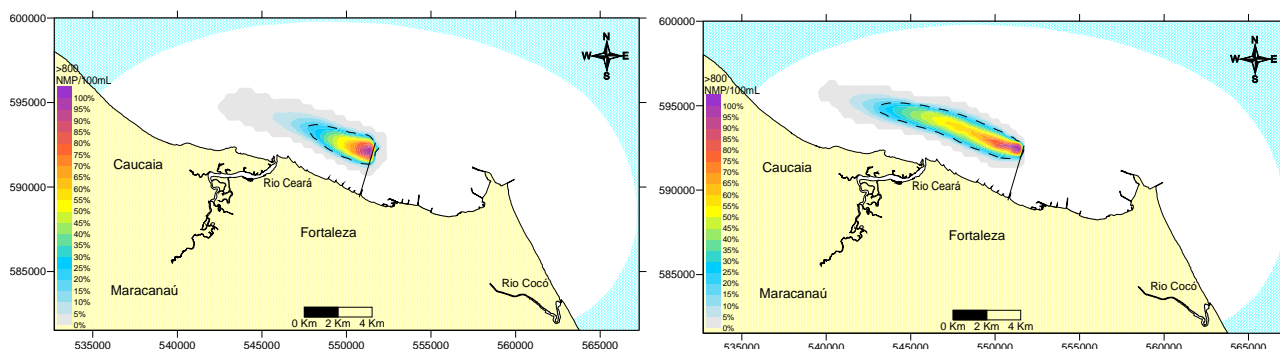
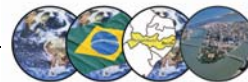
**Figura 5: Pluma de dispersão e *E. coli* no efluente do emissário em horários noturno e diurno nos meses de abril e outubro de 2008, correspondentes às condições de correntes marinhas mostradas na Figura 2.**

Na Figura 5 é apresentado os resultados relevantes dos impactos dos lançamentos de efluentes do emissário submarino de Fortaleza nos diferentes cenários de modelagem. Conforme se observa a extensão da pluma dos efluentes do emissário, em termos de *E. coli*, é sensivelmente influenciada pelas condições de insolação e intensidade/direção das correntes marinhas.

Durante o dia, a radiação UV, presente na forte radiação solar incidente na superfície (Tabela 1 e Figura 1), elimina rapidamente grande parte dos organismos presentes na água. Contrariamente a esta situação, durante a madrugada e primeiras horas do dia, a ausência ou pouca incidência da radiação permite a persistência destes organismos, os quais nestes momentos são afetados apenas pelas condições de salinidade, temperatura e predação do meio marinho.

No mês de abril, em virtude da diminuição da intensidade das correntes na área (Figura 4), o comprimento da pluma se restringiu havendo porém uma maior dispersão lateral da mesma e maiores concentrações dentro da área atingida. Observando-se o mapa de ocorrência de concentrações acima do limite de balneabilidade (800 *E. coli*/100mL) ao longo do mês de janeiro e abril (Figura 6), esta conformação se repetiu.

Com relação ao risco de toque da pluma na praia, nota-se pela Figura 6 que não houve registro desta ocorrência nos cenários simulados; estando a área mais próxima da costa sem condições de balneabilidade distante a cerca de 2 km.



**Figura 6: Percentual de ocorrência de *E. coli* acima do padrão de balneabilidade (800 NMP/100 mL), durante o mês de abril e outubro de 2008, com registros a cada meia hora. Linha pontilhada demarca a área com percentual aceitável de até 20 % acima do referido padrão. Distância mínima da costa a esta área equivale a 2 km.**

## CONCLUSÕES

O resultados das simulações dos lançamentos de efluentes pelo emissário de Fortaleza, para os cenários de abril e outubro de 2008, permitem concluir que:

- não houve toque da pluma na costa;
- a área imprópria ao banho, como consequência do emissário, está a pelo menos a 2 km de distância da costa;
- as correntes obtidas para o mês de outubro são condizentes com valores observados.

Ressalta-se, porém, que os parâmetros de calibração do modelo para as condições locais não foram ainda levantados. Com isto, embora os resultados da modelagem computacional tenham sido produzidos a partir de variáveis ambientais e operacionais da área de estudo e das condições de operação do emissário, tais resultados refletem uma aproximação da realidade local, sendo ainda necessária a calibração e a validação do modelo adotado para uma adequada confiabilidade dos resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FEITOSA, R.C. e ROSMAN, P.C.C, 2007, *Emissários Submarinos de Esgoto: Aspectos de Qualidade de Água e Modelagem Computacional – Métodos Numéricos em Recursos Hídricos* – 8, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Cap. 1, 209 pp, ([www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br)).
2. LABOMAR. Monitoramento e estudo de correntes na área marinha do sistema de disposição oceânica dos esgotos sanitários de Fortaleza – SDOES. Relatório de Pesquisa, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 2006.
3. MANCINI, J.L., 1978 “Numerical Estimates of Coliform Mortality Rates Under Various Conditions.” *Journal Water Pollution Control Fed.*, v.50, n. 11, pp. 2477-2484.
4. MARTIN, J.L., McCUTCHEON, S.C., 1999, *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. 1 ed. Florida, Lewis Publishers, Inc.