

SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS NO ENTORNO DO EMISSÁRIO DE IPANEMA (RJ, BRASIL)

Marco Antônio Jardim Guerra
Universidade Estadual do Norte Fluminense.
CEP: 28013-600. Campos dos Goytacazes, RJ.
[E-mail: marco.oceanografo@ig.com.br](mailto:marco.oceanografo@ig.com.br)

Resumo

A qualidade das águas no entorno do emissário de Ipanema (Rio de Janeiro, RJ) foi pesquisada com ênfase no risco potencial à saúde pública. A descarga de esgotos através de tubulação submarina, atualmente servindo a cerca de 3 milhões de pessoas, tem ao longo de sua vida útil sete episódios de vazamentos intensos, causando poluição de praias da indústria turística. Informações foram obtidas em imagens do satélite Landsat-V e os dados utilizados foram sobre marés, correntes e batimetria. O monitoramento e a documentação foi feita através de imagens e de modelagem hidrodinâmica computacional. O modelo foi calibrado e teve sua validade obtida através de imagens de satélite. Os resultados incluem cartas das correntes marítimas, diagnóstico sobre poluição e inferência sobre causa de ruptura do emissário. Após diversos eventos de El Niño, em curto espaço de tempo, a praia de Ipanema estava erodida, expondo o emissário a ressacas. Risco efetivo foi documentado, quando de ruptura do emissário, a 1 km do litoral, permanecendo 5 meses para ser reparado, sendo que o resultado das simulações confirmam que a contaminação principal das praias ocorre devida a vazamentos. O geoprocessamento, associando a oceanografia por satélite com a modelagem hidrodinâmica, é uma nova metodologia eficaz no diagnóstico da influência de emissários.

Palavras-chaves: Modelagem numérica hidrodinâmica; Oceanografia por satélite; Impacto ambiental; Movimentos do mar; Geoambiente marinho; Administração costeira; Poluição e erosão na costa.

Abstract

The quality of seawater around the outfall at Ipanema (Rio de Janeiro, RJ) was searched with emphasis to public health risk. The discharge of domestic sewage, actually of 3 million people, throughout one pipeline had in its history 7 times ruptures that caused pollution on beaches of tourism industry. The data were images of satellite, tides, currents and bathymetry. The monitoring and documentation were done by images. The digital processing images mapped sewage plumes. Coupling images with simulations, the hydrodynamics model was calibrated and validated. The results include charts of marine currents, the diagnosis about pollution and public health risk on littoral and the cause that did the pipeline to break. During extreme of the ENSO (El Niño Southern Oscillation) phenomenon, some beaches had been with erosion and, the pipeline was exposed and broken. Effective risk was documented, when a rupture on pipe, 1 km off the littoral, remained 5 mounts to be repaired and confirm that contamination on beaches are due to ruptures. The geoprocessment associated with satellite oceanography and hydrodynamics modeling is a new methodology to diagnoses outfall influence.

Keywords: Satellite oceanography; Numerical hydrodynamics' modelling; Environmental impact; Coastal pollution and erosion; Sea movements; Geocology of the sea; Ocean administration program.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Relatório sobre o Meio Ambiente Mundial, publicado pelo PNUMA (ONU): “mais de ¾ da contaminação marinha se origina de esgotos e efluentes, sendo que, os oceanos recebem anualmente 300 milhões de toneladas de esgotos, que representam 20 vezes o aporte de sedimentos”.

Este é o caso da zona costeira da cidade do Rio de Janeiro, RJ (COSTA, 1998), que por diversas vezes tem estado sob a influência negativa do emissário submarino de esgotos em Ipanema. A utilização pública desta costa, que inclui a Área de Proteção Ambiental (APA) da Ponta do Arpoador e as ilhas do Parque Nacional Marinho do Arquipélago das Cagarras, vem sendo prejudicada pelo emissário, no que concerne a utilização para recreação de contato primário, secundário e outras, além da necessidade de manutenção da harmonia paisagística (CONAMA, 1986), atacada por espumas residuais no litoral (**figura 1**) e sólidos flutuantes ao largo. Em função do fluxo atual, maior do que $6 \text{ m}^3/\text{s}$, é esperado problema com gorduras.

O critério adotado no projeto de engenharia do emissário submarino em Ipanema (SURSAN, 1969) foi de que 80 % dos dias do ano as águas em torno dos despejos deste emissário devem ter qualidade suficiente para o uso a que se destinam (CONAMA, 1986), quer navegação, pesca, esportes náuticos, ou utilização das praias do litoral, o que tem deixado a desejar.

Dentre os objetivos específicos deste trabalho, pode ser citada a caracterização espaço-temporal da circulação marítima, a confecção de cartas de correntes de deriva e de marés controladas por imagens de satélite, o diagnóstico da poluição costeira e a influência do emissário.

A revisão da literatura foi feita em trabalhos como ABBOTT & BASCO (1989), BLUMBERG ET ALLII (1999), CHOI ET ALLII (2003), CONAMA (1986), COSTA (1998), GUERRA (1997, 1999, 2000), GUERRA E CHAMBEL LEITÃO (1998), MESQUITA (1997), MOOERS ED. (1999), SURSAN (1969), dentre outros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O monitoramento no mar foi feito sobre rede de pontos amostrais, controlados por GPS e ecobatímetro; foram utilizados disco de Secchi, termômetro, busca-fundo, equipamento fotográfico, etc. No litoral o monitoramento gerou série temporal de fotografias em pontos de controle, levantamento de níveis de erosão, etc.

As imagens do satélite Landsat-V continham as bandas do visível e do infra-vermelho. Os computadores pessoais (PCs) em rede, com *softwares* diversos, geoprocessaram dados de 9 marégrafos no Rio de Janeiro (DHN, 1998).

Outros dados processados foram de ventos (DHN, 1990), correntes (DHN, 1975), etc. O relevo submarino e o litoral foram discretizados e geoprocessados, formando matrizes. O pré-processamento dos dados de profundidade foi feito a partir de cartas náuticas, com o uso de mesa digitalizadora. Uma sub-rotina de interpolação matemática geoprocessou os valores de profundidade para rede de coordenadas geográficas de elementos quadrados, com nós equidistantes de 200 m e, outra sub-rotina fez a transformação das coordenadas para o sistema métrico (SI).

Coordenadas do litoral e das ilhas digitalizadas em mesa serviram no Sistema Geográfico de Informação (SGI) para correção da distorção geométrica das imagens de satélite.

O pós-processamento dos resultados do modelo hidrodinâmico, feito por *software* programável, serviu para a construção de cartas e gráficos.



Fig. 1. Risco potencial à saúde pública na Ponta do Arpoador. Espuma residual de odor desagradável durante transporte proveniente do emissário (SSO). Poderia ser um, dois ou três dias após rompimento do emissário, quando as técnicas de análise em uso ainda não teriam comunicado o problema.

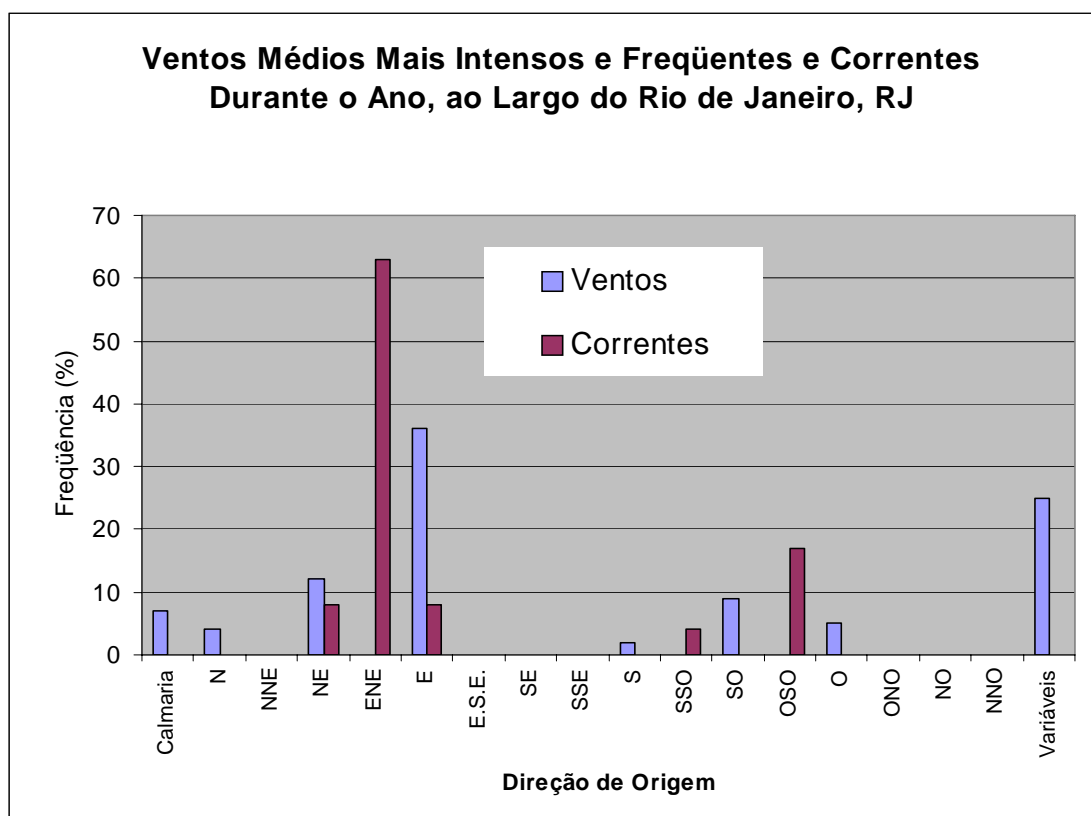


Fig. 2. Ventos observados na Ilha Rasa e correntes oceânicas de meso-escala.

No modelo de simulação hidrodinâmica, em uma primeira aproximação, as equações de governo do fluido foram integradas ao longo da profundidade, gerando um modelo bidimensional horizontal. Neste modelo, as equações diferenciais parciais (GUERRA, 2000) são resolvidas através do método das diferenças finitas, com precisão de segunda ordem (ABBOTT e BASCO, 1989). Este modelo permitiu a simulação da circulação a partir de diferentes agentes *forçantes*, tais como: os ventos, inclinação da superfície livre e as marés.

A calibração e validação do modelo numérico foi feita através de imagens de satélite, do conhecimento de campo e da literatura.

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS CORRENTES MARÍTIMAS

O vento local gera o que foi denominado de *corrente associada ao vento*. O vento pode reger as alterações transientes da corrente, alterações sobrepostas às médias mensais estáveis da circulação oceânica, descritas abaixo. Foi observado que a corrente pode responder de imediato ao soprar de ventos locais, mesmo ventos com intensidades menores do que 7 nós.

A corrente associada ao vento somada à influência da Corrente do Brasil produz o que foi denominado de *corrente de deriva pura*.

Outra componente local é a *corrente de marés*. Esta corrente atua especialmente em função do efeito de bombeamento e jato que a variação do nível da maré no interior da Baía de Guanabara impõe às proximidades de sua desembocadura.

A interação entre as componentes de deriva pura e de marés foi denominada *corrente resultante*.

3.1.1. Estatística das Correntes Oceânicas ao Largo da Cidade do Rio de Janeiro

A estatística da circulação é proveniente de dados climatológicos regionais, definidos como valores médios, basicamente mensais, obtidos ao longo de dez ou mais anos (DHN, 1975), além dos valores sazonais (MESQUITA, op. cit.) ou anuais.

Na zona costeira, ao largo da cidade do Rio de Janeiro, do ponto de vista da estatística (GUERRA, 2000), **figura 2**, são importantes as *correntes médias mensais de deriva pura ou de contorno em mar aberto* provenientes de:

1. Este-Nordeste (ENE) – direção estrita que ocorre com frequência de 63% ao ano, sendo que, varia de intensidade entre 0.5 e 1.5 nó. Durante os meses de janeiro e fevereiro, o intenso vento sudeste pode produzir corrente de ENE com média de 1.5 nó, sendo que esta direção ainda ocorre em média nos meses de março a junho, em setembro, outubro e dezembro. As direções E em agosto (8% ao ano) com 0.7 nó e NE em novembro (8% ao ano) com 0.8 nó podem ser aglutinadas como variantes do fluxo ENE, somando a frequência total de 79% ao ano, podendo ocorrer com frequência ainda maior durante anos de El Niño. Estas direções resultam da influência da Corrente do Brasil sobre a plataforma e estão associadas aos ventos locais predominantes de leste (**figura 2**) e ao bom tempo atmosférico;
2. Oeste-Sudoeste (OSO) – direção que ocorre com frequência de 17% ao ano, com intensidades de 0.4 a 1.0 nó, em abril, maio e julho. Corresponde a parte relativa à reentrância ou arco sudeste brasileiro da Contra-Corrente Costeira, sendo comum com mau tempo atmosférico;

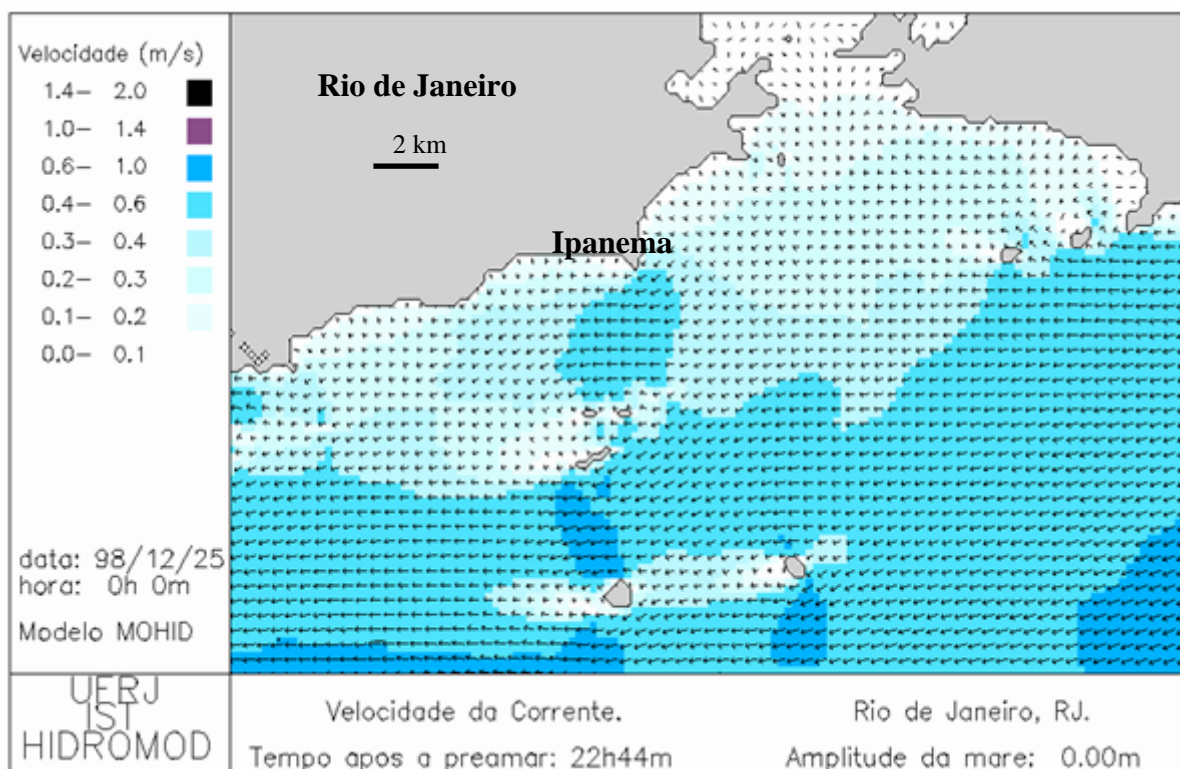


Fig. 3. Corrente de deriva pura proveniente de ENE ao largo (79% ao ano), comum com bom tempo.

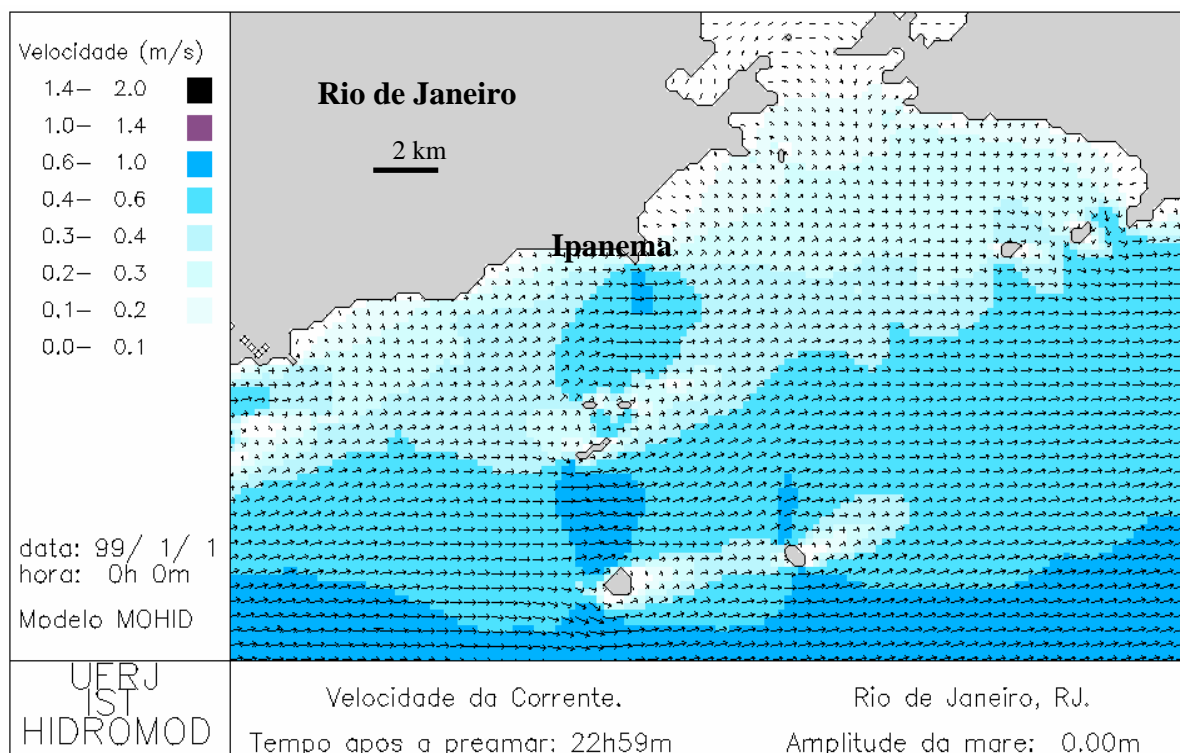


Fig. 4. Corrente de deriva pura de OSO aproximadamente (21% ao ano), comum com mau tempo.

3. Sul-Sudoeste (SSO) – direção que ocorre com frequência de cerca de 4% ao ano, em junho, com intensidade média igual a 1.0 nó e alternando com a direção de ENE. É uma variação da Contra-Corrente OSO, com intensificação da componente sul, pelo transporte devido aos ventos sudoeste ($f = 4$) que atingem 13% em frequência, na quadrícula com latitudes entre 20° e 25° sul e longitudes de 40° a 45° oeste.

3.1.2. Corrente Predominante de ENE

Nas proximidades da costa do Rio de Janeiro, a corrente estatisticamente predominante ao longo do ano, proveniente de ENE (**figura 3**), tem velocidade média anual de 0.9 nó. Esta direção ocorre estatisticamente sem interrupção média mensal de setembro até março (primavera e verão).

3.1.3. Correntes de Outono e Inverno

De abril a junho, nas proximidades da costa sul do Estado do Rio de Janeiro, a direção de corrente proveniente de ENE ocorre de forma alternada com a Contra-Corrente Costeira de OSO a SSO, ocasião em que a direção da Corrente do Brasil ocorre mais afastada da costa, entre Cabo Frio e Cabo de Santa Marta. A direção ENE nas proximidades da costa somente não aparece na média do mês de julho, quando ocorre somente a direção OSO (GUERRA, 2000).

A Contra-Corrente Costeira (**figura 4**) na região sudeste está associada à deriva produzida pela maior frequência de ventos intensos provenientes de sudoeste e de oeste, durante os meses de outono e inverno, associados à penetração de ciclones extra-tropicais.

3.1.4. Correntes de Marés e Resultantes

As correntes de marés foram mapeadas inicialmente em separado (**figura 5**), sendo possível observar que uma maré de sizígia contribui com até cerca de 0.3 m/s, nas proximidades do emissário. Posteriormente, foi iniciado o processamento com as correntes resultantes (**figuras 7 e 8**).

3.2. INFLUÊNCIA DO EMISSÁRIO

3.2.1. Diagnóstico de Causa de Impacto Ambiental

Algumas das vezes que foi observada a área sobrejacente aos difusores, a cerca de 3.6 km do litoral, pode ser constatada a presença de sólidos flutuantes, látex, etc., cuja densidade de sólidos é função da estratificação do mar e da velocidade das correntes marítimas.

Durante a pesquisa, foi obtida uma imagem com intenso impacto ambiental sobre o litoral, **figura 6**. Nesta imagem-documento, pode ser encontrada uma pluma de turbidez muito intensa e próxima do litoral (pluma 1), que colocava em risco os banhistas, já que a distância relativa ao T-90 (tempo em que 90% da população de coliformes morre, em contato com a água salgada), neste caso 60 minutos, não estava sendo cumprida para corrente acima de 0.5 nós, se direcionada ao litoral. Esta pluma tinha origem distante dos difusores, local onde ocorria outra pluma de intensidade quase desprezível na imagem (pluma 2).

A partir da simulação hidrodinâmica, para condições oceano-meteorológicas (marés e ventos) relativas àquela passagem do satélite (**figura 6**), foi feita a pesquisa das plumas com o modelo, através do uso de traçadores lagrangeanos, lançados a cada 10 minutos, nos pontos-fonte de poluição. Uma simulação foi feita com traçador lançado do ponto de origem da pluma mais intensa (**figura 7**) e, outra simulação realizada com traçador lançado dos difusores (**figura 8**).

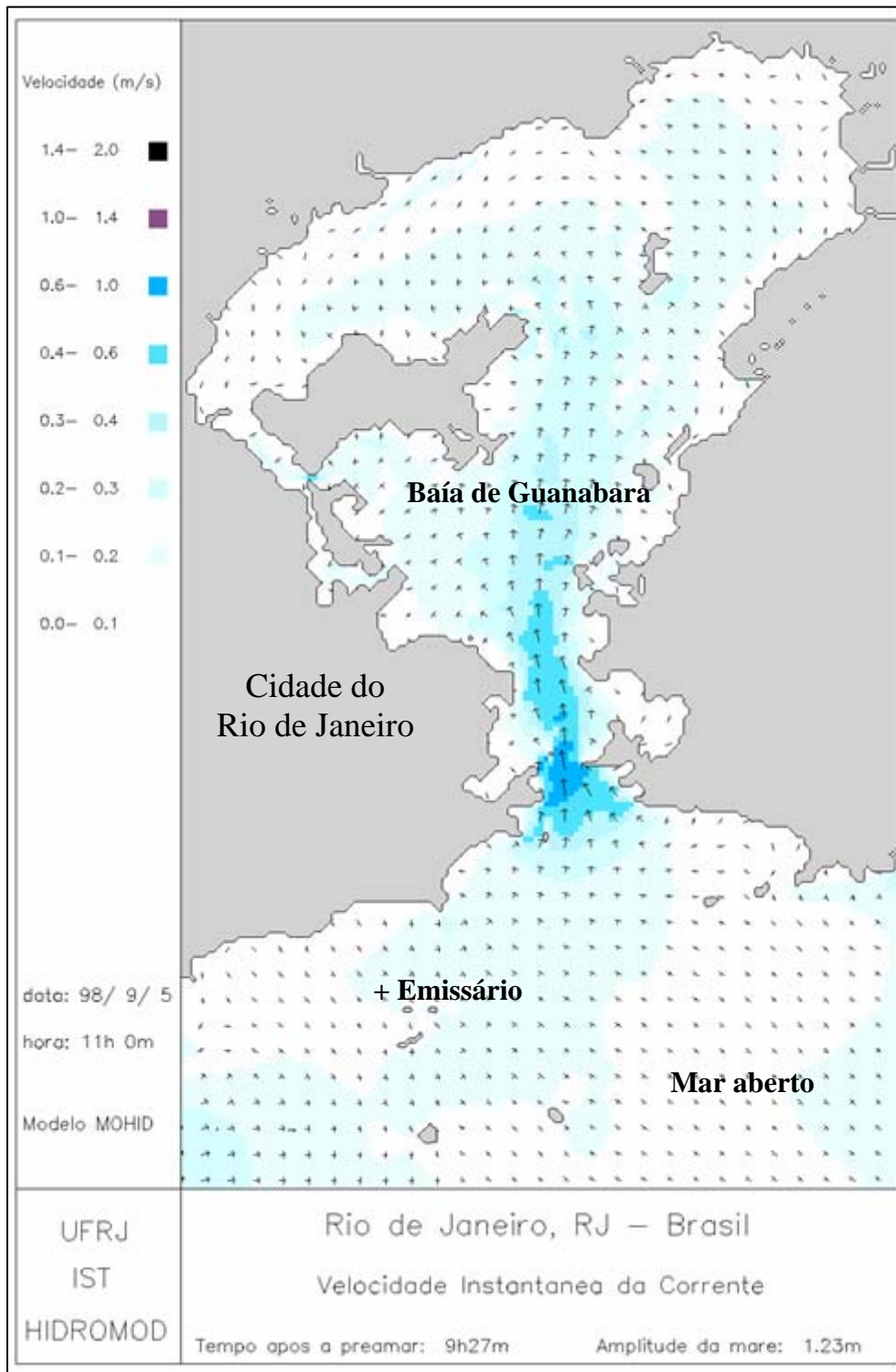


Figura 5. Corrente de maré pura, durante enchente. As águas ao largo de Ipanema se deslocam em direção à desembocadura da baía.

Na **figura 7**, com o lançamento de traçador a partir do ponto de ruptura (pluma 1), pode ser observado que a contaminação transpassou a APA da Ponta do Arpoador e foi para norte, em direção à praia de Copacabana, tendo sido represada próxima do litoral, durante pelo menos 3 períodos de maré enchente, somente após o que, passou a ser dirigida para fora da costa. Comparando esta simulação da dispersão, com este modelo de advecção bidimensional sem difusão, com a imagem de satélite (**figura 6**), foi possível inferir a existência de ruptura no emissário e que, esta era a causa do impacto naquele litoral.

Na **figura 8**, pode ser observado que o traçador proveniente dos difusores (pluma 2) rapidamente foi afastado do litoral, com 2 pequenas inflexões na curva, devido a 2 períodos de maré enchente.

Após pesquisa nos arquivos do Jornal do Brasil (1999), a ruptura do emissário foi confirmada, com vazamento já noticiado a cerca de 5 meses antes desta imagem de satélite (**figura 6**).

3.2.2. Erosão: Possível Causa de Ruptura do Emissário

Ao longo de mais de 40 anos, que o autor acompanha ou monitora freqüentemente a praia de Ipanema, foi possível observar diversos ciclos erosionais, com retorno da sedimentação ora natural, ora com manipulação antrópica sobre o cordão de praia (GUERRA, 1999).

Durante os anos de observações relativas a este trabalho, houve flutuações do transporte costeiro ao largo de Ipanema, em função de flutuações climáticas de escalas global e regional, tais como, as relativas à freqüência do fenômeno El Niño e, a anomalia da temperatura no Atlântico Sul.

A erosão intensa em Ipanema está documentada na **figura 9**, onde podem ser vistos anéis do emissário que normalmente ficam enterrados por uma camada de areia de cerca de 2 metros. Não obstante, obtive informação que mar adentro esta erosão prosseguia, expondo o emissário e suas estruturas submarinas ao ataque direto de ondas, evidenciando, desta forma, uma possível causa para o rompimento que novamente veio a ocorrer ao final deste intenso ciclo erosivo.

4. DISCUSSÃO: VALIDAÇÃO DO MODELO

O coligir, entre as imagens de satélite e as figuras relativas às simulações, sob condições oceanográficas relativas aos momentos de captação das imagens, serviu de validação do modelo hidrodinâmico.

5. CONCLUSÕES

Do resultado das simulações, pode ser confirmado que a poluição litorânea, devida ao emissário, tem seus episódios mais graves relacionados à seqüência de vazamentos intensos ocorridos ao longo dos anos de funcionamento.

Não obstante, em certa ocasião no mar, foi observada contra-corrente proveniente de SO, em sub-superfície, nas proximidades dos difusores do emissário e ventos locais de sudeste, o que compunha um transporte de *material flutuante* em direção ao norte, para o litoral. Nesta ocasião, no litoral de Ipanema podia ser visto espuma de cor castanha a pêssego, sem odor e, muitas aguapés, provenientes de oeste, das lagunas da Barra da Tijuca.

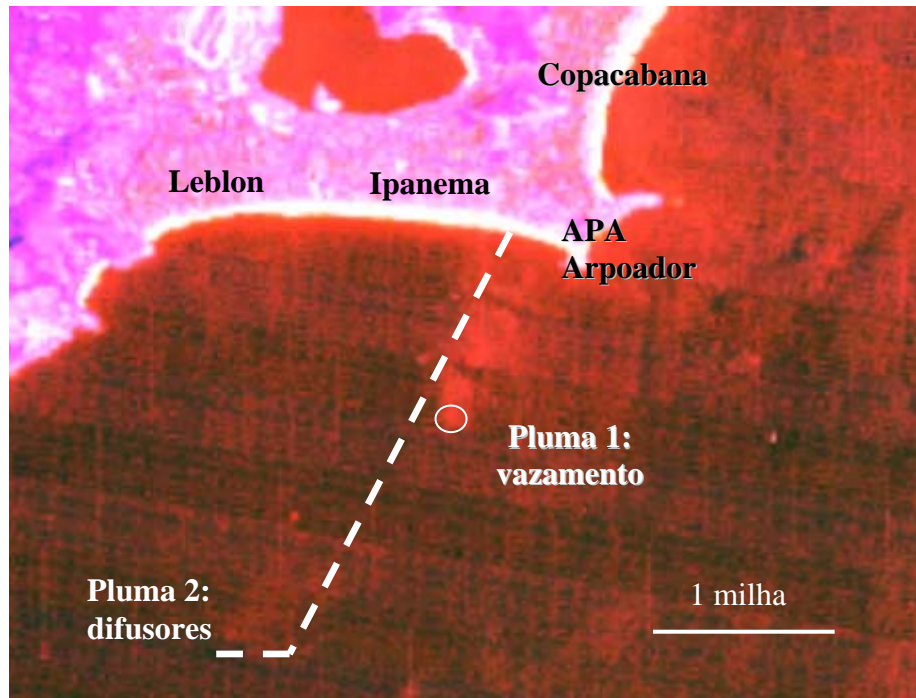


Fig. 6. Imagem-documento sobre vazamento intenso do emissário, impactando os litorais de Ipanema até Copacabana e pluma 2 sobre os difusores. Imagem TM/Landsat-V. Vento norte.

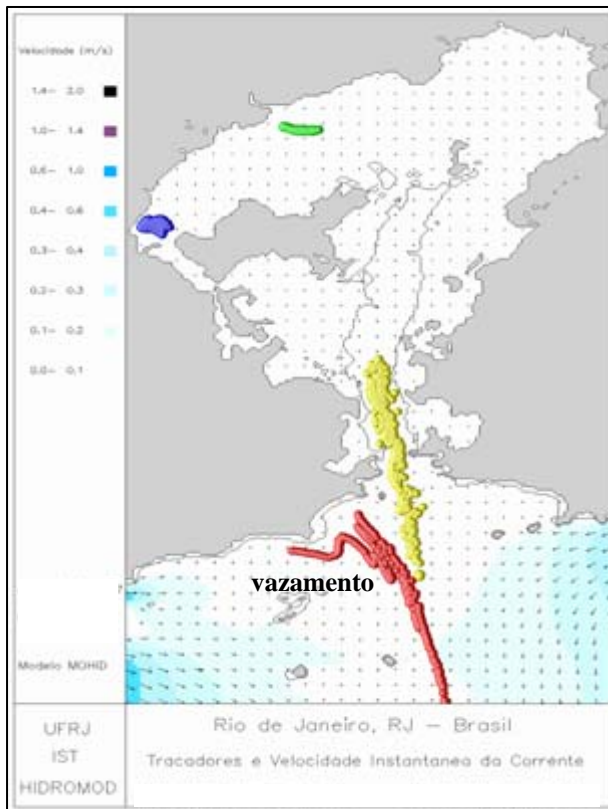


Fig. 7. Simulação dos despejos a partir da ruptura do emissário. Condições oceanográficas e meteorológicas da passagem do satélite.

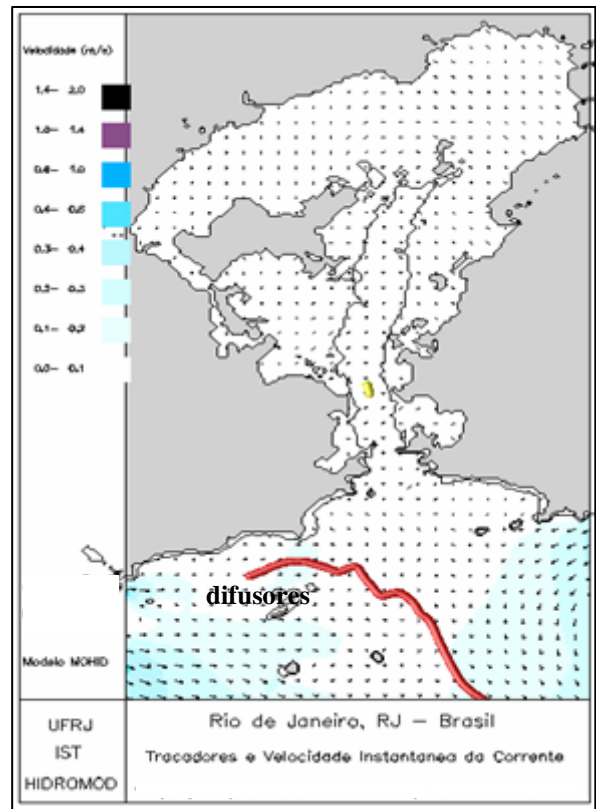


Fig. 8. Simulação com traçador a partir dos difusores do emissário, utilizando as mesmas condições oceanográficas da figura 7.



Fig. 9. Intensa erosão relacionada à ENSO expôs estruturas e, ressaca de sudeste produz o rompimento do emissário.

Esta observação mostra a complexidade do transporte observado *in situ* e sugere o aprimoramento da modelagem, com uso de modelo tridimensional (BLUMBERG ET ALLII, 1999; MOOERS, 1999) e equacionamento da difusão.

O uso desta moderna ferramenta de análise, modelagem numérica computacional associada a imagens de satélite, é uma experiência inovadora, de relativo baixo custo, extremamente eficiente e vem atingindo precisão e confiabilidade cada vez maiores, com o desenvolvimento da modelagem e dos computadores de última geração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ABBOTT, M. B. & BASCO, D. R. (1989). Computational fluid dynamics. Longman Scientific and Technical. Essex, England. 425 p.
- (2) BLUMBERG, A. F.; KHAN, L. A.; SAINT JOHN, J. P. (1999). Three-dimensional hydrodynamic model of New York harbor region. Journal of Hydraulic Engineering. Agosto 1999. P. 799-816.
- (4) CHOI, B. H.; MUN, J. Y.; KO, J. S. (2003). Simulation of summertime suspended sediments in the Yellow Sea. In: Workshop on Hydro-Environmental Impacts of Large Coastal Developments. P. 305-333.
- (5) CONAMA. (1986). Resolução n. 20 de 18 de junho de 1986. Brasília, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente, Min. do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente.
- (6) COSTA, H. (1998). Uma avaliação da qualidade das águas costeiras do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ: Gov. do Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Est. de Meio Ambiente, SEMA, Proj. PLANAGUA SEMA / GTZ de Coop. Tec. Brasil-Alemanha, FEMAR. 261 p.

- (7) DHN. (1975). Atlas de cartas piloto. Rio de Janeiro, RJ: Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e Navegação. + anexo: Tab. Beaufort.
- (8) DHN. (1990). Estatística mensal e anual Marsden 376 e Ilha Rasa: observações. Niterói, RJ: Mar. do Brasil/Diretoria de Hidrografia e Navegação. (Relatório)
- (9) DHN. (1998). Componentes harmônicas de marés do Rio de Janeiro, RJ. Niterói, RJ: Mar. do Brasil/Diretoria de Hidrografia e Navegação/Banco Nacional de Dados Oceanográficos. Disquete.
- (10) GUERRA, M. A. J. (1997). Sensoriamento remoto orbital e impacto ambiental devido a emissário submarino na zona costeira da cidade do Rio de Janeiro. In: SEMANA NACIONAL DE OCEANOGRAFIA, 10. Itajaí, SC: UNIVALE, out. 1997. Anais. 3 p.
- (11) _____ (1999). Monitoring of Erosion of Ipanema, Arpoador and S. Conrado Beaches, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Rio de Janeiro, RJ: In REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY. IAG & UGB. Vol. Abstracts-Coastal Geomorphology. P. 43.
- (12) _____ (2000). Caracterização espaço-temporal do ambiente costeiro na área do emissário submarino de Ipanema. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (Tese de Doutorado). 242 pp + anexos.
- (13) _____ & CHAMBEL LEITÃO, J. (1998). Impactos Ambientais na Costa do Rio de Janeiro, RJ – Observações Através de Satélites, Simulação das Correntes Marítimas com Modelo Matemático Computacional e Monitoramento no Mar e no Litoral. In XI SEMANA NACIONAL DE OCEANOGRAFIA. Rio Grande, RS, Brasil: FURG, Out. 1998. 3 p.
- (14) JORNAL DO BRASIL. (1999). Acidente no Emissário assusta Ipanema. Rio de Janeiro, RJ: Arquivo/ Sistema JB/ Centro de Documentação. 15 de janeiro de 1999.
- (15) MESQUITA, A. R. (1997). Marés, circulação e nível do mar na costa sudeste do Brasil. São Paulo, SP: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Documento para FUNDESPA. Dezembro de 1997. 36 p. Disponível na Internet (IOUSP).
- (16) MOOERS, C. N. K. Ed. (1999). Coastal Ocean Prediction. Coastal and Estuarine Studies, 56. American Geophysical Union. Was. D. C. 523 pp.
- (17) SURSAN. Oceanographic studies.(1969). In: Marine sewage disposal system for Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, GB: Governo do Estado da Guanabara/ Superintendência de Urbanização e Saneamento/ Depto. de Saneamento.