

# **Modelagem matemática do baixo curso do rio São João para estudo de intrusão salina**

*Mathematical modeling of low course of São João river study of saline intrusion*

Gabriel Lima de Souza<sup>\*</sup>

Jader Lugon Jr.<sup>\*\*</sup>

Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues<sup>\*\*\*</sup>

Haydda Manolla Chaves da Hora<sup>\*\*\*\*</sup>

Maria Inês Paes Ferreira<sup>\*\*\*\*\*</sup>

## **Resumo**

Este trabalho mostra o resultado de simulação numérica por um período de 24 horas em situação de maré de sizígia do modelo proposto para o baixo curso do rio São João, localizado entre os municípios de Casemiro de Abreu (localidade de Barra de São João) e Cabo Frio (localidade de Tamoios). Esta modelagem tem o objetivo de verificar o alcance da intrusão salina para fornecer subsídios de usos para a região.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Intrusão.

## **Abstract**

This paper shows the results of numerical simulation during 24 hours in a situation of “sizígia” tide of the proposed model for the lower course of the river São João, located between the towns of Casemiro de Abreu ( Barra de São João location) and Cabo Frio (Tamoios location). This model aims to determine the extent of the intrusion of salt.

Key words: Modeling mathematics. Intrusion.

## **Introdução**

A modelagem matemática é uma ferramenta fundamental para estudos gerais e ambientais, pois com base nos resultados de um modelo bem calibrado e ajustado, é

<sup>\*</sup> Instituto Federal Fluminense / NUPERN – Mestrando em Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes/RJ - Brasil

<sup>\*\*</sup> Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé / NUPERN – Prof. Dr. em Modelagem Computacional. Mestre em Modelagem Computacional, Macaé, RJ - Brasil

<sup>\*\*\*</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro / Instituto Politécnico / IPRJ – Prof. Ph. D. Oceanografia. Mestre em Geoquímica, Rio de Janeiro - Brasil

<sup>\*\*\*\*</sup> Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé / NUPERN – Graduanda em Engenharia de Controle e Automação Industrial - Bolsista de Iniciação Científica CNPQ/PIBIC, Macaé, RJ - Brasil

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Instituto Federal Fluminense / *Campus* Macaé / NUPERN – Profa. Dr. em Ciência e Tecnologia de Polímeros, Macaé, RJ - Brasil

possível realizar prognósticos e relacionar causa e efeito de alguns impactos ambientais (MEDEIROS, 2003), servindo, dessa forma, à gestão ambiental (LIMA, 2010), hoje, bem definida na legislação brasileira (SERLA et al, 2001; ANA, 2009).

A modelagem aplicada em recursos hídricos pode envolver tanto o transporte de substâncias como a hidrodinâmica do próprio corpo hídrico. Um modelo dito hidrodinâmico é definido através de condições iniciais e de contorno, bem como pela geometria do corpo hídrico simulado. As informações de entrada do modelo hidrodinâmico devem ser as mais precisas possíveis, visando a minimizar os erros relativos a escalas e variações geométricas (INPE, 2008). Neste estudo, faz-se uso da plataforma MOHID, que é um software livre, fornecido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, que, dentre outros, tem dois grandes módulos: o GIS (Geographic Information System) e o GUI (Guide User Interface).

Neste trabalho, são apresentados os resultados da simulação, por um período de 24 horas, coincidente com uma maré de sizígia, da penetração da cunha salina na região estuarina do Rio São João, situado na costa norte fluminense. Dentre os diversos cenários possíveis para o corpo hídrico em questão, este foi o escolhido para procurar subsidiar a investigação da intrusão salina na região.

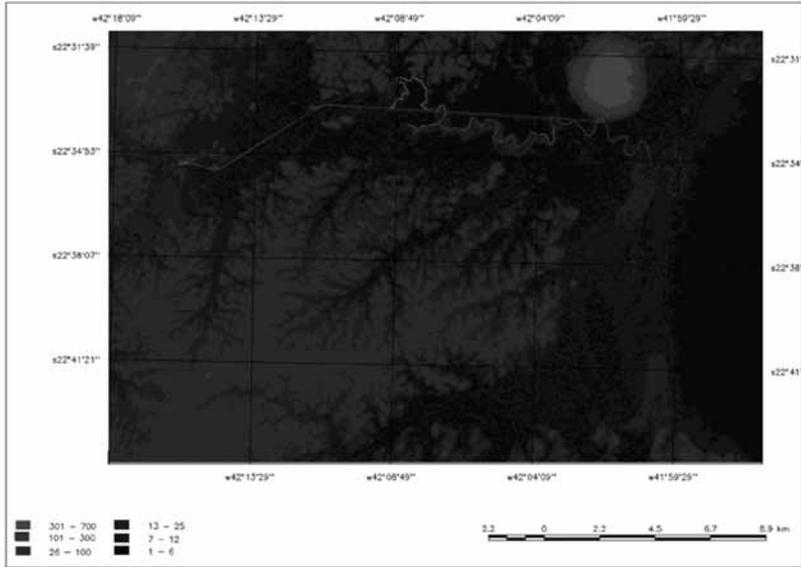
### **Revisão da literatura**

Diversos estudos são desenvolvidos com o objetivo de prever o comportamento dos corpos hídricos frente a um impacto. Dentre muitos, podemos citar Amaral (2004), que estudou a intrusão da cunha salina no rio Macaé, utilizando dados pretéritos de Rosman (2002), fazendo uso do Software de modelagem SisBahia; Medeiros (2003), que avaliou a influência da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu.; Macuiane (2003), que avaliou o impacto da intrusão salina no rio Incomati em Moçambique sobre a atividade agrícola ribeirinha; Alegria (2006), que avaliou a dispersão de poluentes em um trecho do rio Caxipó (MT); Sarmiento (1997), que utilizou a modelagem matemática para determinar a capacidade de assimilação de efluentes domésticos e industriais, do canal da passagem em Vitória/ES; Godoy (2009), que elaborou um modelo hidrológico-hidrodinâmico da lagoa da Conceição – SC, utilizando técnicas de sensoriamento remoto para elaboração do mapa topográfico associado com as medições de campo, para criar a hipsometria da região.

### **Materiais e métodos**

Um mapa que delimita toda a região de interesse foi construído no Spring (Programa de geo-processamento gratuito disponível no site do INPE). Esse mapa é mostrado na Figura 1.

**Figura 1:** Mapa da região de interesse

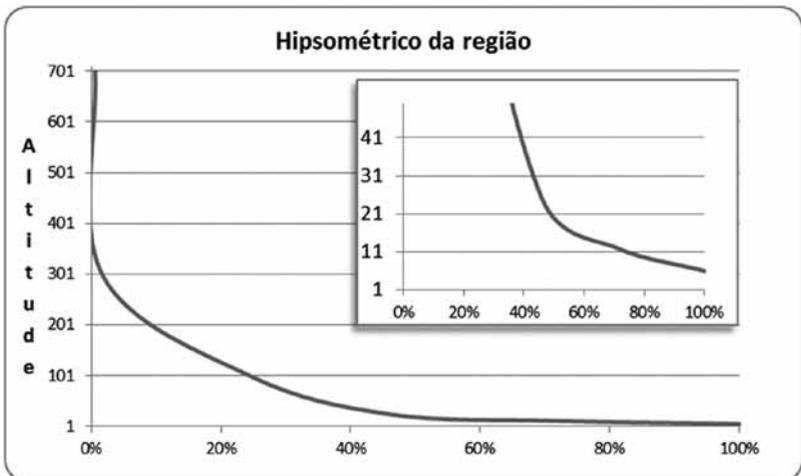


Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software Springs

Como neste estudo pretendeu-se avaliar a penetração da cunha salina na região estuarina, especial atenção foi dada à altimetria e hipsometria da região de interesse, que também podem ser percebidas na Figura 1.

A Figura 2 apresenta a curva hipsométrica da região. É possível verificar que cerca de 50% encontra-se abaixo de 10m de altitude, fato destacado no detalhe apresentado na figura.

**Figura 2:** Curva hipsométrica da região

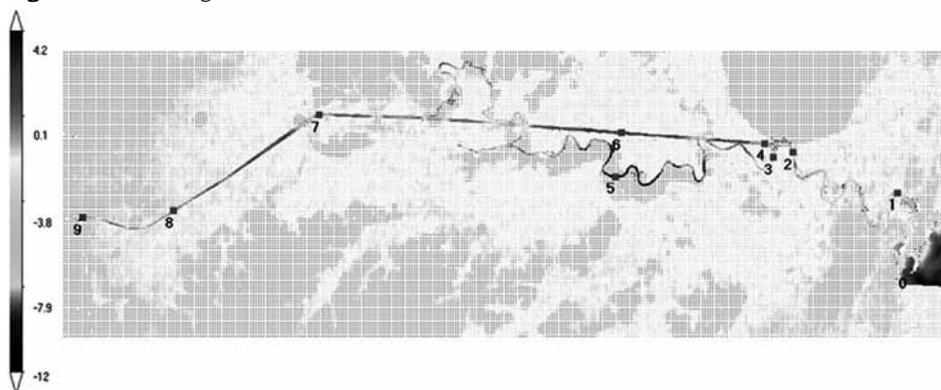


Fonte: Elaborado pelo Autor

## MOHID GIS

Neste módulo do MOHID, são tratadas as informações geográficas a serem utilizadas na implementação do modelo, sendo que, antes de serem criados os planos de informação, é necessário se fazer um tratamento prévio dos dados. Com o cruzamento dos planos de informação Batimétrico e Altimétrico (e mais algumas interpolações) foi possível a criação do terreno digital, bem como a batimetria do domínio simulado, mostrada na Figura 3. Os números dispostos, ao longo do rio, representam estações virtuais criadas no modelo.

**Figura 3:** Terreno digital criado no MOHID



Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software MOHID.

Esse modelo digital foi empregado na geração do Grid batimétrico que foi utilizado no modelo dinâmico. Na Figura 3, é possível verificar que entre os pontos 05 e 06, há um aumento abrupto de profundidade, sendo que para as demais regiões, essa variação ocorre de forma mais suave.

## MOHID GUI

Neste módulo, são implementados os modelos de transporte e hidrodinâmico, bem como, são geradas as simulações. Através dele, são manipulados alguns arquivos de entrada a serem utilizados na modelagem, como os que definem condições de contorno, iniciais, tempo de simulação e valores para alguns parâmetros de relevância.

Na definição dos possíveis cenários a serem avaliados neste estudo, foram consideradas variáveis não só de natureza física e ambiental, mas também aspectos políticos e sociais que poderiam, de alguma forma, ser influenciados por alterações no regime de escoamento do Rio São João em sua região estuarina. No Quadro 1, são especificados alguns desses aspectos.

**Quadro 1:** Cenários possíveis de avaliação hidrológica

Código	Cenário	Fonte	Motivação teórica
A1	Retirada de água	1. Controle fluvial pela barragem; 2. Agricultura; 3. Uso a montante.	1.1. alteração dos parâmetros operacionais da operadora das barragens; 1.2 consumo excessivo pela operadora da barragem; 2.1. áreas agrícolas paralelas as margens; 2.2. uso inadequado da água na agricultura; 3.1 desvio do curso de água para obras nos municípios a montante.
A2	Despejo de efluente	1. Indústrias paralelas a margens; 2. Agricultura paralela às margens.	1.1. Serviços sugro-alcoleiro; 1.2. Políticas de desenvolvimento local; 1.3. Livre iniciativa como estratégia de contornar as dificuldades estatais; 2.1. descarte de defensivos agrícolas.
A3	Aquinoicultura	1. Uso das águas para proposta de aquinoicultura; 2. Derrame acidental de alevinos ou espécies criadas em tanques de pesca.	1.1. Livre iniciativa como estratégia de contornar as dificuldades estatais; 2.1. Falta de técnicas especialistas para a região; 2.2. Relação custo X benefício desfavorável para a importação de técnicas.
E1	Regime eólico	1. Spray marinho; 2. Retenção das águas no curso do rio (alteração do regime de fluxo).	1.1. Empobrecimento e exposição do solo desnudo; 2.1 Variações do regime eólico, causando modificação dos parâmetros hidrodinâmicos
E2	Velocidade reduzida	1. Alteração das características geomorfológica da região.	1.1. Margens desnudas; 1.2. Obstrução de canais.
E3	Regime de Chuva	1. chuvas intensas, causando careamento de sedimentos para o rio; 2. Lixiviação do solo.	1.1 áreas desnudas; 2.2 matéria orgânica despejada diretamente no solo

Fonte: Elaborado pelo Autor.

## Resultados e discussão

As informações hipsométricas, batimétricas, características climáticas, área de drenagem da região de interesse, uso do solo (obtidos através de classificação não supervisionada) foram importantes para a avaliação do cenário estudado.

Dos cenários apresentados no Quadro 1, foi proposta a simulação que recebeu denominação de A1, pois, para a avaliação dos demais, seria necessário maior refino do modelo (trabalho futuro e/ou continuado). Além disso, o cenário A1 contempla os possíveis reflexos do manejo incorreto sobre a penetração da cunha salina na região

estuarina do Rio São João, a ser avaliada através da modelagem aqui proposta.

Adotando-se uma vazão de 100m<sup>3</sup>/s, foram obtidos os valores do Quadro 2, onde é possível verificar que, em ciclo de sizígia, a intrusão salina no estuário é intensa, comprometendo até 50% do rio (baixo São João) com traços salinos. Os grifos vermelhos e amarelos são relativos aos valores limites encontrados.

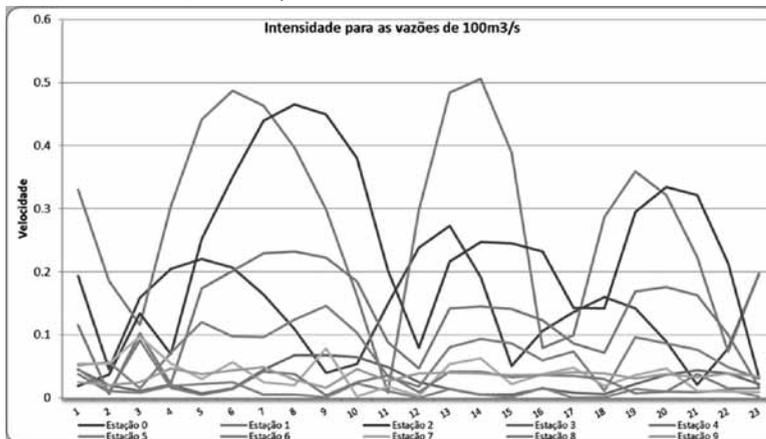
**Quadro 2:** Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão máxima

	Velocidade			Salinidade	
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
	Estação 0	0.273	0.021	0.140	30.84
Estação 1	0.505	0.008	0.283	26.41	15.76
Estação 2	0.465	0.019	0.230	24.47	14.66
Estação 3	0.067	0.005	0.028	25.76	16.82
Estação 4	0.232	0.006	0.129	23.70	16.02
Estação 5	0.046	0.0002	0.011	26.98	16.24
Estação 6	0.146	0.010	0.073	20.62	11.05
Estação 7	0.097	0.002	0.037	5.58	0.50
Estação 8	0.092	0.004	0.027	0.78	0.00
Estação 9	0.048	0.016	0.035	0.73	0.00

Fonte: Elaborado pelo Autor

Na Figura 4, é apresentado o comportamento da velocidade simulada nas estações apresentadas na Figura 3. Como era de se esperar, as estações mais próximas à foz foram mais sensíveis à variação da maré, embora em nenhuma delas tenha sido verificada inversão da velocidade para o sentido foz-cabeceira. A distribuição das máximas e mínimas de velocidade por estação é mostrada na Figura 5, enquanto a mesma avaliação é feita para a salinidade na Figura 6.

**Figura 4:** Velocidade em função do tempo, m/s



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 5:** Resultados dos valores máximos de velocidade em m/s por estações

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 6:** Concentração salina nas estações, em PSU

Fonte: Elaborado pelo Autor

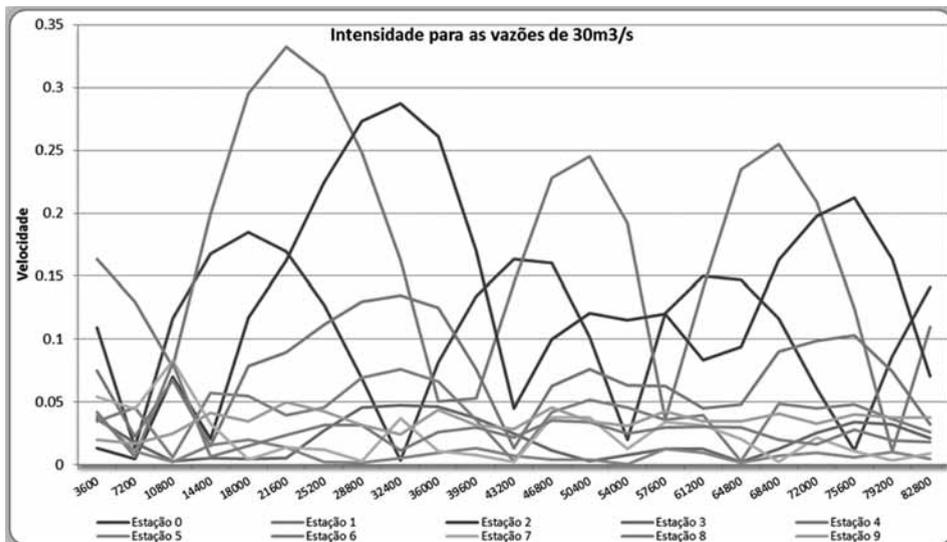
O Quadro 3 resume os resultados das simulações nas quais foi adotada uma vazão de 30m<sup>3</sup>/s. Comparando com o obtido para uma vazão de 100m<sup>3</sup>/s, percebe-se uma considerável elevação dos níveis de concentração salina em todas as estações. Entretanto, o modelo não gerou uma maior penetração da cunha salina, como era de se esperar como resposta a uma acentuada redução da vazão adotada, de 100m<sup>3</sup>/s para 30m<sup>3</sup>/s. Algumas explicações podem ser especuladas para justificar esses resultados gerados pelo modelo, mas o mais provável é que, nas condições prescritas nas simulações de baixa vazão, haja a formação de uma cunha salina com a água mais densa e salina se movendo, principalmente, durante a enchente da maré, sob uma água menos densa e salina. Como o modelo aqui adotado é integrado na vertical, assumindo completa homogeneização na coluna d'água, ele não foi capaz de capturar tal estratificação.

**Quadro 3:** Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão menor

	Velocidade			Salinidade	
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
	Estação 0	0.185	0.004	0.107	33.44
Estação 1	0.332	0.011	0.172	29.31	18.25
Estação 2	0.287	0.005	0.134	26.79	16.87
Estação 3	0.048	0.002	0.021	28.34	19.38
Estação 4	0.135	0.013	0.074	25.87	18.44
Estação 5	0.039	0.0004	0.009	29.17	18.30
Estação 6	0.076	0.003	0.042	22.87	13.35
Estação 7	0.083	0.002	0.023	5.58	0.00
Estação 8	0.081	0.006	0.027	0.00	0.00
Estação 9	0.050	0.017	0.035	0.00	0.00

Fonte: Elaborado pelo Autor

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam, para vazão de 30m<sup>3</sup>/s, os resultados análogos aos apresentados nas Figuras 4, 5 e 6(vazão de 100m<sup>3</sup>/s).

**Figura 7:** Velocidade em função do tempo, em m/s

Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 8:** Resultados dos valores máximos por estações, em m/s



Fonte: Elaborado pelo Autor

**Figura 9:** Concentração salina nas estações, em PSU

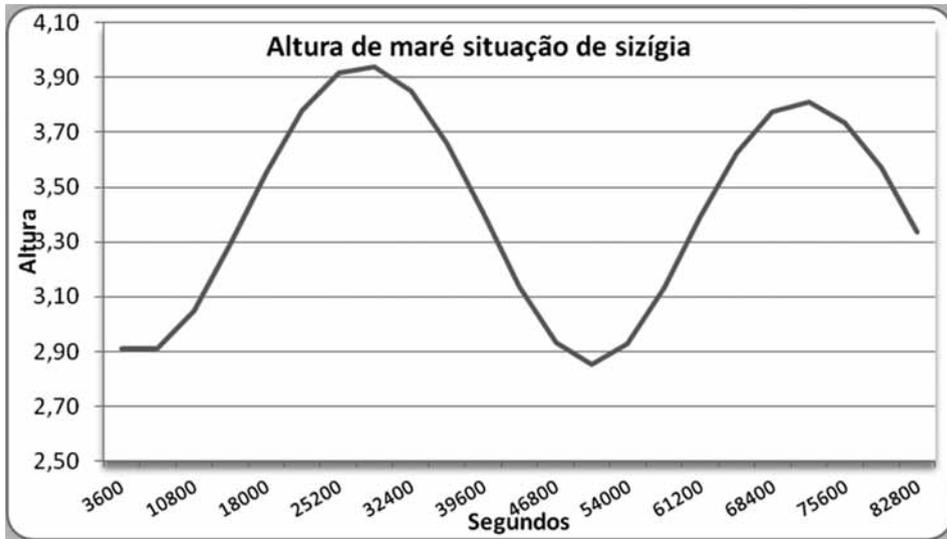


Fonte: Elaborado pelo Autor

Todos os resultados aqui apresentados foram obtidos de simulações geradas em modelo implementado no MOHID, tendo-se verificado a coerência dos resultados de velocidade nas estações ao longo do rio. Para fins de comparação, foram realizadas algumas medições de salinidade em campo, que podem ser observadas. Não foram estudados os aspectos relativos à correlação entre os dados de condutividade medida nas campanhas de campo e os valores de salinidades obtidos. A figura 8 mostra uma referência à condutividade medida no campo, durante a segunda campanha de tomada de dados no campo.

As simulações tiveram o mesmo *timing* do mareógrafo, simulando situação de sizígia (situação de maior amplitude de maré). A Figura 10 exprime o comportamento do mareógrafo utilizado.

**Figura 10:** Comportamento da maré proposta pelo mareógrafo utilizado



Fonte: Elaborado pelo Autor

Comparando a Figura 10 com as Figuras 5 e 7, é possível perceber que as velocidades mais intensas são produto de momento de subida de maré e os de menor intensidade são os pequenos períodos de estofa de maré. O importante na avaliação do gráfico é a amplitude da mesma.

### Conclusões

Do cenário simulado no trabalho, é possível verificar que cerca de 50% do rio sofre processo de salinização em função da variação de maré. Entretanto, o trecho onde os meandros originais do rio foram preservados tem elevada capacidade de retenção das águas, fato que pode ser associado à baixa velocidade neste trecho, associada à baixa altitude deste do sistema como um todo. No estágio em que se encontra o modelo, não se pode inferir, a partir de simulações por ele gerada, quais seriam os impactos de possíveis intervenções que, por exemplo, restituíssem os seus meandros naturais. Futuros desdobramentos deste trabalho devem envolver a confrontação entre observação e simulação.

## Referências

- BIDEGAIN, Paulo; MARTINS PEREIRA, Luiz Firmino. Plano das Bacias Hidrográficas da Região dos Lagos e do rio São João. Rio de Janeiro: CILSJ, 2005. 153 p
- CARDOSO DA SILVA. Estuários – Critérios para uma classificação ambiental. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, p. 25 – 35, 2000.
- CUNHA, Sandra Batista. Impactos Ambientais das Obras de Engenharia sobre o ambiente biofísico da bacia do Rio São João. UFRJ, Prefeitura de Silva Jardim, 1994.
- FIGUEIREDO, Nélia Maria Almeida de. Método e metodologia na pesquisa científica. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Yendis, 2010. 237p.
- GODOY, Fabio Bertini. Modelagem Hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. 2009 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC. Florianópolis, SC, Brasil.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. (Brasil). Introdução ao SPRING – versão 5. São Jose dos Campos/SP – 2008.
- MACHADO, M. B. 2006. Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios. Tese (Doutorado) - Unicamp, Campinas, SP, Brasil.
- MACUIANE, M. A. Intrusão salina no estuário do rio Incomáti. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Física) - Universidade Eduardo Mondlane. Maputo, Moçambique, 2003.
- MEDEIROS, A. D. Influência da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. KJERFVE, B. Princípios da Oceanografia de Estuários. São Paulo: EDUSP, 2002. 414p.
- NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.
- PEREIRA FLHO, J.; SPILLEERE, L. C.; SCHETTINI, C. A. F. Dinâmica de nutrientes na região portuária do estuário do rio Itajaí-Açu, SC. Atlântica, Rio Grande, p. 11 – 20, 2003.

ROSMAN, Paulo Cesar Colonna. Referência técnica do SisBahia. Rio de Janeiro, 2011. 241p. Disponível em: <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V85.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V85.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2011.

SANTIAGO, M. F.; PASSAVANTE, J. Z. de O.; SILVA-CUNHA, M. da G. G. da ; NEUMANN-LEITAO, S.; PENNA, O. M. DE L.; NUNES, A. A. Estuário do rio Pisa Sal (Galinhas, Rio Grande do Norte, Brasil): análise multivariada na perspectiva ecológica para a distribuição nictemeral da biomassa microfitoplanctônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 2., 9 a 12 de outubro 2003, Vitória/ES. 3p.

SARMENTO, R.; SERAFIM, A. J.; DORIGUETO, J. M.; DONATELLI, M. R. Determinação da capacidade de assimilação dos corpos de água para a disposição final dos efluentes domésticos e industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., set. 1997, Foz do Iguaçu. p. 2044 – 2052.

SERLA, Fundação Secretaria de Rios e Lagos. Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses. Rio de Janeiro, Projeto Planagua. SEMADS, 2001. 74p.

XAVIER DA SILVA, Jorge; ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento & Análise Ambiental. 15. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2011. 363p.

ZAMBRONI DE SOUZA, A. C.; PINHEIRO. C. A. M. Introdução a modelagem, simulação de sistemas dinâmicos. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 166p.

*Artigo recebido em: 21 jun. 2012*

*Aceito para publicação em: 1 abr. 2013*