

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

GABRIEL LIMA DE SOUZA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO ESTUDO DA INTRUSÃO
SALINA NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO JOÃO

MACAÉ
2011

GABRIEL LIMA DE SOUZA

MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO ESTUDO DA INTRUSÃO
SALINA NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO JOÃO

GABRIEL LIMA DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
do Instituto Federal de Educação Ciência
e Tecnologia Fluminense - IFF

Orientador:. Jader Lugon Junior, D.Sc/UERJ.

MACAÉ
2011

S729m

Souza, Gabriel Lima de.

Modelagem matemática aplicada ao estudo da intrusão salina no baixo curso do rio São João/
Gabriel Lima de Souza. – Macaé, RJ: [s.n.], 2011.
89 f.: il. color.

Orientador: Jader Lugon Junior.

Dissertação (mestrado). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Macaé, RJ, 2011.

Bibliografia: f. 73-76.

1. Água - Poluição. 2. São João, Rio (RJ). 3. Avaliação de riscos ambientais. I. Lugon Junior, Jader, orient. II. Título.

CDD 363.739463098153

Dissertação intitulada Modelagem Matemática Aplicada ao Estudo da Intrusão Salina no Baixo Curso do Rio São João, elaborada por Gabriel Lima de Souza, apresentada publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração Sustentabilidade Regional, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em: _____.

BANCA EXAMINADORA:

Dsc, Prof. Jader Lugon Junior
Doutor em Modelagem Computacional da Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ.
Mestre em Modelagem computacional e Professor do Instituto Federal Fluminense –
Orientador.

Dsc, Profª Maria Inês Paes Ferreira
Doutora em Ciência e Tecnologia de Polímeros pela Universidade Federal do Rio de Janeiro -
UFRJ, Professora do Instituto Federal Fluminense –

Phd, Prof. Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues
PhD pela School of Marine and Technology, Professor da Universidade Estadual do Rio de
Janeiro - UERJ.

Aos meus filhos. Bruna, Eduardo e
Celeste e aos filhos de todos nós, que
são tudo de melhor que poderemos
“ter” em nossa vida.
Que este trabalho possa tonar tornar
melhores suas vidas.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos integrantes do programa de Engenharia Ambiental do IFF, pela oportunidade e confiança depositada em mim, ao disporem da vaga para que eu pudesse elaborar este trabalho, que não foi realizado a apenas duas mão, mas à mão de todos os que contribuíram com seus conhecimentos (ministrando aulas), aconselhamentos (por meio de orientações), em procedimentos ambientais (no respeito a controle de secretaria, local sadio e agradável para estudos) e exemplo pessoal dado por cada um do programa. Foi de fato uma satisfação que em palavras fica impossível externar o sentimento de sucesso em ter concluído os estudos por esta instituição. Um forte abraço fica para os professores, Maria Inês, Roberta Ramalho, José Augusto, Paulo Rogério, Marcos, Pinedo e Hélio, que com a transmissão de seus conhecimentos fizeram que a visão sobre o objeto de estudo ficasse mais ampla, a FAPERJ, por apoiar as pesquisas do IFF. Agradecer em especial ao professor orientador Jader, pela paciência e orientação dada para que o projeto fosse seguido até o fim, seu exemplo de dedicação e paciência ficará para sempre marcado na memória das reuniões e estudos voltados para desenvolver o modelo adequado para o objeto de estudo proposto.

Aos amigos Leonizia, Tarsila, Henriques, Hayda e José Henrique que a todo o momento foram verdadeiros companheiros na solução de problemas e novas ideias e apoio em momentos difíceis.

Aos meus familiares que apesar de não compreender aceitaram a minha opção e deram todo o incentivo necessário para a conclusão deste trabalho.

Um abraço todo especial é para a minha avó e pai que a todo tempo com seus exemplos pessoais de caráter e trabalho, forjaram a minha personalidade e me mantiveram longe dos atalhos da vida que são muito sedutores, porém fatais.

“Toda imagem no espelho refletida
Tem mil faces que o tempo ali prendeu
Todos têm qualquer coisa repetida
Um pedaço de quem nos concebeu
A missão de meu pai já foi cumprida
Vou cumprir a missão que Deus me deu
Se meu pai foi o espelho em minha vida
Quero ser pro meu filho espelho seu”

(JOÃO NOGUEIRA)

RESUMO

Estudos ambientais de rios e estuários são ferramentas fundamentais para a busca de um completo entendimento da situação na qual se encontram estes importantes corpos hídricos, não limitados a estudos de ecossistemas aquáticos, os estudos ambientais são algo bem maior, pois destes, diversas outras áreas do ambiente são impactadas em decorrência de seu mau uso. Diversas metodologias podem ser utilizadas na pesquisa exploratória. Neste trabalho optamos pela metodologia da modelagem matemática ambiental.

A modelagem matemática ambiental é uma forma de estimar o resultado de determinada ação sobre o meio ambiente, por meio de equações matemáticas que procuram descrever tanto o comportamento passado desta ação como a expectativa futura.

Devido ao elevado número de variáveis e de equações sucessivas, *softwares* cada vez mais potentes são desenvolvidos para aplicação ambiental. Graças a esses *softwares* ações preventivas podem ser elaboradas, simulando cenários e avaliando os diversos impactos ao meio ambiente, desta forma é possível criar ações impeditiva e/ou mitigadoras.

O rio São João é um importante corpo hídrico para a região, a área de nosso foco de estudo, o baixo curso do rio São João, e o extravasor das águas acumuladas em um enorme reservatório de águas da região (Juturnaiba) e dele é retirada a água para agropecuária e abastecimento público da região. Poucos estudos foram realizados na região, fato inquietante que deve colocar a sociedade em estado de alerta, pois o desconhecimento das características deste corpo hídrico/sistema ambiental pode acarretar no mau uso de suas potencialidades, tendo como consequência a depleção de sua capacidade. Outro fator muito importante que deve ser verificado é de não existir estação/sistemática específica de monitoramento de análise da água deste corpo hídrico, tornando assim o baixo curso do rio São João uma “Caixa Preta”, tanto para a sociedade quanto para o poder público.

Este estudo tem o objetivo analisar as condições hidrológicas do sistema do baixo curso do rio São João. Em particular estamos tratando a intrusão salina no estuário. Com a criação de bases de dados sólidas, de forma a propiciar o prosseguimento dos estudos deste rio, diverso e importante estuário.

Palavras-chave: Água- poluição. Avaliação dos riscos ambientais.

ABSTRACT

Environmental studies of rivers and estuaries are fundamental tools for seeking a complete understanding of the situation in which we find these important water bodies, not limited to studies of aquatic ecosystems, environmental studies are something far greater, because these, several other areas of environment are impacted as a result of misuse. Several methodologies can be used in exploratory research. In this work we chose the method of mathematical modeling environment.

Mathematical modeling environment is one way to estimate the result of determined action on the environment by means of mathematical equations that attempt to describe the past behavior of this action as future expectations.

Due to the large number of variables and equations successive increasingly software powerful are developed for environmental applications. Because of these software we can have been developed, simulating scenarios and evaluating the various impacts on the environment, so is possible to create an impediment actions and / or mitigation.

The São João River is an important water body in the region, the area of our focus of study, the lower course of the river São João, its extravasor of water held in a huge reservoir of waters in the region (Juturnaíba) and it is withdrawn water for public supply and agriculture in the region. Few studies have been conducted in the region, unsettling fact that should place society on alert, because the lack of knowledge of characteristics of this water body / environment system can result in misuse of their capabilities, resulting in depletion of its capacity. Another very important factor that should be checked is that there is no station / monitoring specific systematic of analysis of the water body of water, thus making the lower course of the river São João a "Black Box", both for society and for the public.

This study aims to start a series of studies on the actual system conditions. In particular we are treating the seawater intrusion in the estuary. By creating a solid database, to allow further studies of this rich, diverse and important estuary.

Keywords: Water – Pollution. Environmental risks assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Dimensões de um projeto ambiental.....	17
Figura 02: Desequilíbrio entre as forças atuante no projeto ambiental/ecológico.....	17
Figura 03: Uso das margens para agricultura.....	21
Figura 04: Ocupação das margens.....	21
Figura 05: Descarte de efluente.....	21
Figura 06: Barcos de pesca utilizados no rio São João.....	22
Figura 07: Comportamento dos tipos de fluidos de acordo com sua natureza.....	24
Figura 08: Identificação da área de interesse.....	30
Figura 09: Rebatimento da bacia de drenagem sobre o espigão principal.....	32
Figura 10: Estações próximo a região de interesse.....	34
Figura 11: Distribuição das chuvas ao longo da Bacia Hidrográfica 06.....	38
Figura 12: Imagem 3D criada com os dados altimétricos do projeto SRTM e a imagem sintética do satélite CBERS 2.....	46
Figura 13: Mapa da região de interesse.....	46
Figura 14: : Imagem das informações lamina de agua medida.....	49
Figura 15: Plano de informação que representa a inclinação do Rio.....	49
Figura 16: : Terreno digital criado no MOHID.....	50
Figura 17: Detalhe do terreno digital criado no MOHID.....	50
Figura 18: Mapa da região de interesse.....	51
Figura 19: Mapa da região de interesse.....	60
Figura 20: Terreno digital criado no MOHID.....	61
Figura 21: Atores de um projeto ambiental orbitando pelo ambiente.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 01: Importância do município para a bacia.....	31
Grafico 02: Importancia da bacia para o município.....	32
Gráfico 03: Fator de dispersão geo-espacial.....	33
Gráfico 04: Distribuição dos ventos em Arraial do Cabo.....	34
Gráfico 05: Distribuição dos ventos em Macaé.....	34
Gráfico 06: Distribuição dos ventos em Nova Friburgo.....	35
Gráfico 07: Temperatura caracteristica do região no periodo entre agosto – outubro.....	35
Gráfico 08: Direção do vento caracteristica do região no periodo entre agosto – outubro.....	36
Gráfico 09: Intensidade do vento caracteristica do região no periodo entre agosto – outubro.....	36
Gráfico 10: Altura acumula das chuvas nos meses de agosto até outubro.....	39
Grafico 11: Curva hipsométrica da região.....	47
Gráfico 12: Marégrafo modelado.....	48
Gráfico 13: Marégrafo DHN.....	48
Gráfico 14: Curva hipsométrica da região.....	51
Gráfico 15: Variação da maré no porto de Imbetiba durante os meses de fev e mar de 2010.....	53
Gráfico 16: Variação da maré no porto do Forno durante os meses de fev e mar de 2010.....	53
Gráfico 17: Variação da duração das marés no porto de Imbetiba durante os meses de fev e mar de 2010.....	53
Gráfico 18: Curva hipsométrica da região.....	60
Grafico 19: Velocidade em função do tempo.....	63
Gráfico 20: Resultados dos valores máximos por estações.....	63
Gráfico 21: Concentração salina nas estações.....	64
Grafico 22: Velocidade em função do tempo.....	65
Gráfico 23: Resultados dos valores máximos por estações.....	65
Gráfico 24: Concentração salina nas estações.....	65
Gráfico 25: Condutividade em função da distancia da Foz.....	66
Gráfico 26:Comportamento da maré proposta pelo maregrafo utilizado.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Classificação conforme CONAMA 274/00.....	20
Quadro 02: Correlação e regressão dos dados entre as estações do Forno e Imbetiba.....	53
Quadro 03: Cenários possíveis de avaliação hidrológica.....	62
Quadro 04: Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão máxima.....	63
Quadro 05: Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão menor.....	64

LISTA DE TABELA

Tabela 01: Impactos possíveis no objeto de estudo.....	27
Tabela 02: Macro informações da bacia hidrográfica.....	31
Tabela 03: Valores paramétricos para as variações de maré nos portos de Imbetiba e Forno.....	52

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas;
APA – Área de Proteção Ambiental;
CBERS 2B - Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres;
CCD – *Couple Change Device*, um dos sensores acoplados ao satélite CBERS 2B que captura 5 bandas de frequência com resolução espacial de 20 m;
DPC – Diretoria de Portos e Costa, diretoria da Marinha do Brasil responsável pela regulamentação das atividades náuticas e tráfego naval;
DHN – Departamento de Hidrografia Naval, Área da marinha responsável por estudos navais.
GE – Google Earth;
GIS – Sistema de geo-processamento;
ICM-Bio – Instituto Chico Mendes da biodiversidade;
IDH-M – Índice de desenvolvimento Humano, medido tendo como referência os municípios;
INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais;
MOHID – Modelo hidrodinamico;
MPS – Material particulado suspenso;
MNT – Modelo numérico do terreno;
PIB – Produto Interno Bruto. Os valores de PIB deste trabalho são referentes aos do PIB nominal, ou seja, não são atualizados a valores correntes;
SIG – Sistema de informações geográficas;
SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) – Satélites para modelagem de terreno, programa entre as agencias espaciais americana e alemã, que mapeou a superfície da terra durante 11 dias em fevereiro de 2000 e tornou estes dados públicos para pesquisa, sendo vedada a aplicação comercia.

LISTA DE SÍMBOLOS

g	= aceleração da gravidade
h	= profundidade do estuário em relação ao nível médio
n	= coeficiente de Manning
s	= salinidade
t	= dimensão temporal
t'	= dimensão temporal em coordenada transformada
u	= velocidade longitudinal
w	= velocidade vertical
x	= dimensão longitudinal
x'	= dimensão horizontal em coordenada transformada
z	= dimensão vertical
A_H	= coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal
A_V	= coeficiente de viscosidade turbulenta vertical
B	= largura do estuário
H	= profundidade total da coluna d'água ($h + \eta$)
K_H	= coeficiente de difusão turbulenta horizontal
K_V	= coeficiente de difusão turbulenta vertical
R_i	= número de Richardson
R_{ic}	= número de Richardson crítico
α, β	= coeficientes da equação de estado
η	= elevação da superfície
k	= coeficiente de atrito no fundo e laterais
k_1	= coeficiente de ajuste
ρ	= densidade
ρ_0	= densidade de referência
σ	= dimensão vertical em coordenada transformada
τ_F	= tensão de atrito no fundo
Δx	= intervalo de discretização espacial longitudinal
Δt	= intervalo de discretização temporal
Δz	= intervalo de discretização espacial vertical
$\Delta \sigma$	= intervalo de discretização espacial vertical em coordenada transformada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	ASPECTOS DO USO DA ÁGUA.....	19
2	MODELAGEM MATEMÁTICA	24
2.2	MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE.....	25
3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	28
4	OBJETIVOS	30
4.1	OBJETIVO GERAL	30
4.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	30
4.3	REGIÃO DE ESTUDO	30
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
6	ARTIGO CIENTÍFICO: OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ENTRADA PARA A MODELAGEM DA INTRUSÃO SALINA NO BAIXO CURSO DO RIO JOÃO	44
6.1	RESUMO.....	44
6.2	ABSTRACT.....	44
6.3	INTRODUÇÃO.....	45
6.4	REVISÃO DA LITERATURA.....	45
6.5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
6.5.1	Batimetria	46
6.5.2	Altimétrico	47
6.5.3	Marés	49
6.6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
6.6.1	Batimetria	50
6.6.2	Altimétricos	53
6.6.3	Marés	54
6.7	CONCLUSÕES.....	58
6.8	BIBLIOGRAFIA.....	58
7	ARTIGO CIENTÍFICO: MODELO DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO JOÃO, COM FOCO NA INTRUSÃO SALINA, POR UM PERÍODO DE 24H EM MARÉ DE SIZIGIA	61
7.1	RESUMO.....	61

7.2	ABSTRACT.....	61
7.3	INTRODUÇÃO.....	62
7.4	REVISÃO DE LITERATURA.....	62
7.5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
7.5.1	Mohid GIS	65
7.5.2	Mohid GUI	65
7.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
7.7	CONCLUSÕES.....	72
7.8	BIBLIOGRAFIA.....	73
8	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXO A	82

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) define como fundamental que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo da água. Os usos prioritários são o fornecimento humano e dessedentação de animais, e outras situações de uso devem sempre privilegiar esta às demais formas de utilização (Lazer, Irrigação, Paisagismo, etc.). Um rio que apresenta altos níveis de poluição para a maioria dos parâmetros (DBO, Salinidade, pH, DQO, MPS, nutrientes inorgânicos), não permitindo a utilização humana e manutenção da vida aquática, carece prioritariamente de maiores investimentos e prazos para sua despoluição (ANA, 2009).

As afirmações acima demonstram que estamos diante de situação em que precisamos atuar de forma a promover esta despoluição/adequação para uso dos recursos hídricos. O processo de despoluição/adequação de uso para um corpo hídrico não é somente uma simples ação que se resolve com investimentos e obras. Para corrigirmos tal cenário é necessário um projeto adequado, levando em consideração todas as dimensões do nosso problema/caso. Como investir, onde investir, qual a nossa equipe, como fazer, a quem interessam tal projeto, quem irá financiar tal projeto, a quem não interessam o projeto, quais as vantagens e desafios aliados as expectativas futuras e atuais, são alguns questionamentos que cercam o processo de despoluição/adequação de uso do corpo hídrico, neste trabalho não entendido com apenas um corpo hídrico/objeto de modelagem, mas um sistema complexo, com diversas dimensões.

Tal situação pode ser considerada, para além de uma mera ação ou processo organizacional do poder público ou privado, e sim considerado como projeto (VARGAS, 2009), e sendo tratadas como tal, diversas áreas do saber têm de estar envolvida em seu planejamento, controle, execução e finalização. O tratamento e manejo de um corpo hídrico/sistema ambiental amplo, não é limitado a um projeto ecológico, mas sim um projeto maior com dimensões ambiental, social e econômica, conforme figura 01.

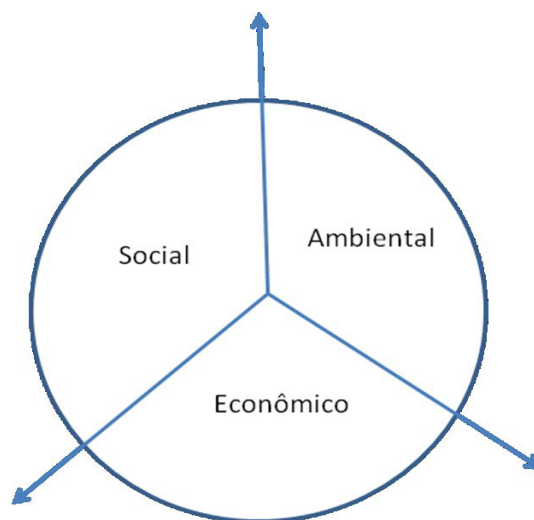


Figura 01: Dimensões de um projeto ambiental.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A figura 01 apresenta as principais forças envolvidas na tríade do manejo ambiental, social e econômico, ou seja, somente com estas três “forças” devidamente distribuída é possível promover a sustentabilidade do sistema. Em geral, os projetos “ambientais” podem ser esquematizados conforme a figura 02, onde só os interesses aliados a uma das forças prevalecem fazendo o projeto acontecer. Seguramente o equilíbrio proposto na figura 02 não promove a sustentabilidade do meio, só unicamente alguns interesses econômicos imediatos ou não.

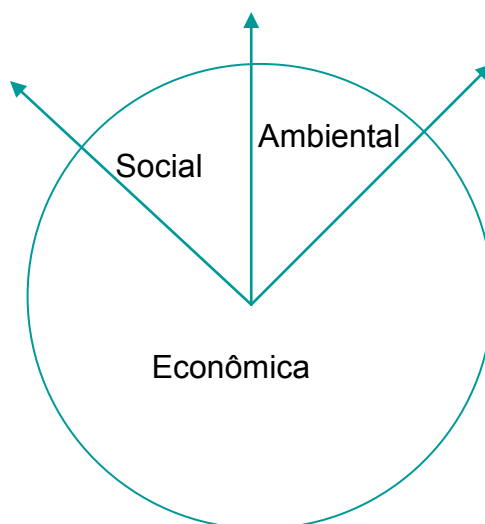


Figura 02: Desequilíbrio entre as forças atuante no projeto ambiental/ecológico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Principais fatores alinhados a cada força:

- Ambiental: Importância ecossistêmica, Manutenção da qualidade da água, bem estar/conforto ambiental;
- Econômica: VPL, TIR, Valor agregado, Lucro;
- Social: Emprego, Saúde, Segurança, Prevenção de catástrofes.

De acordo com o Guia de boas práticas de projeto (PMBOK) os fatores ambientais devem ser levados em consideração para a elaboração de um projeto (não confundir os fatores ambientais descritos no PMBOK, com meio ambiente), ou seja, para a ocorrência de um projeto ambiental/ecológico (iremos utilizar esta notação para evitar a confusão entre as notações do PMBOK e Meio-ambiente), necessariamente devemos estar alinhados com os interesses ambientais da nossa empresa (seja um órgão público, iniciativa privada ou terceiro setor).

A caracterização da empresa (neste sentido estamos considerando a administração pública como empresa) e sua característica ambiental (PMBOK, 2009) é um dos pilares para o sucesso de um projeto, esta afirmação garante o sucesso do projeto e não o sucesso dos produtos/serviços ao longo do tempo ou que mesmo um projeto bem sucedido a luz do PMBOK, agregue valor ao Ambiental, Social e Econômico, simultaneamente, entretanto a algum destes meios certamente será agregado valor de acordo com os seus interesses particulares, cabendo à empresa, a gestão dos interesses e conflitos. Uma estratégia de mitigação ou anulação dos interesses difusos em um ambiente corporativo é a adoção de estratégias correlacionadas (MANKIW, 2010), entretanto estas estratégias são de médio em longo prazo, fato que deve ser observado quando da proposição de tais estratégias e o ambiente na qual a mesma se insere.

A região do estudo em questão é classificada por alguns autores como Petro-rentista (SERRA, 2006) e nela podemos observar todas as contradições/características existentes neste cenário, a economia/arranjo produtivo desta região ao longo dos anos vem passando por significativas modificações de uma produção sugroalcooleira de larga escala a recebedora de infinitos (do aspecto valor, dinheiro) recursos associados a suas reservas minerais (royalties), com um interstício de estagnação da atividade econômica no entre estes dois grandes momentos econômicos. Recentemente os focos de toda a sociedade tem se voltado para esta região em razão da especulação em torno da proposta de emenda constitucional 357, projeto de lei 5.938 de 2009, também conhecida como emenda Ibsen (projeto de Emenda Constitucional que prevê uma nova distribuição para

os royalties). O fato é que a região não é capaz de gerar aptidões de desenvolvimento local, uma vez que recurso proveniente dos royalties tem aplicação exclusiva já definida por lei, dado tal cenário a sociedade se vê na necessidade de procurar formas e maneiras alternativas para promover sua subsistência (posto que os recursos dos royalties, não atinge todas as camadas da sociedade), então retorna aos recursos naturais para extrair o seu sustento, como ocorre na região do baixo São João que serve de recurso pesqueiro para cerca de 50 famílias (dados da Associação dos Livres Aquinocultores do Rio São João). A falta de políticas de geração de emprego e renda associados a projetos de alteração de meio ambiente que focavam só o aspecto econômico, faz com que hoje o baixo curso do rio São João seja uma luta constante ente o homem e a natureza, pois este recurso natural esta apresentando sinais de depleção, e a sociedade de entorno esta almejando seus recursos e de maneira bem humilde como terceiro setor, procurando elaborando alternativa para a promoção do bem estar social.

1.1 ASPECTOS DO USO DA ÁGUA.

No aspecto Ambiental, a Agencia Nacional das Águas – ANA em sua publicação de 2009 expõe a situação dos rios e faz uma reflexão a respeito dos aspectos que devemos ter em mente quando estamos pensamos em corpos hídricos. Abaixo segue trecho desta publicação.

“O enquadramento de rio ou de qualquer outro corpo d’água deve considerar três aspectos principais:

- o rio que temos;
- o rio que queremos;
- o rio que podemos ter.

O “rio que temos” representa a condição atual do corpo d’água, a qual condiciona seus usos. Nesse caso, pode-se ter as seguintes situações:

- o rio apresenta boa condição de qualidade, sendo capaz de atender a todos os usos da água atuais ou previstos. Nesse caso, devem ser tomadas ações que evitem sua degradação, para garantir seu uso múltiplo no futuro;
- o rio apresenta alguns parâmetros de qualidade da água que impedem alguns usos da água, sendo necessárias ações específicas de controle das fontes de poluição;
- o rio apresenta altos níveis de poluição para a maioria dos parâmetros, não permitindo a maioria dos usos, principalmente os mais exigentes, como a preservação da vida aquática. Nesse caso, são necessários maiores investimentos e prazos para sua despoluição.

O “rio que queremos” representa a vontade da sociedade, expressa pelos usos que ela deseja para o corpo d’água, geralmente sem consideração das limitações tecnológicas e de custos. Em outras palavras, o “rio que queremos” representa “visão de futuro” para a bacia.

Em rios com pouca poluição, “o rio que temos” pode já apresentar as condições do “rio que queremos”. Nesse caso, o enquadramento funciona como instrumento de prevenção de futuras degradações da qualidade da água. Em rios com níveis pouco elevados de poluição, ações de controle das fontes deverão ser realizadas para fazer que o rio “que temos” se transforme no “rio que queremos”.

Nos rios altamente poluídos, a sociedade pode desejar que o rio esteja limpo o suficiente para permitir a recreação e a pesca, apesar de hoje ele possuir nível de poluição que impede tais usos. No entanto, mesmo ao realizar altos investimentos e ao utilizar a melhor tecnologia disponível, pode não ser possível alcançar os objetivos desejados. Nesses casos, os objetivos devem ser revistos para adequar-se ao “rio que podemos ter”.

O “rio que podemos ter” representa visão mais realista, que incorpora as limitações técnicas e econômicas existentes para tentar transformar o “rio que temos” no “rio que queremos”. Além da escassez de recursos ou da impossibilidade técnica de recuperar corpos d’água altamente impactados, somam-se questões de ordem política e social. Trata-se de visão de futuro que pode ser atingida em horizonte de tempo aceitável, por exemplo, 10/20 anos, à custa de grande esforço técnico-financeiro.”

(ANA, 2009)

Assim como os dispositivos legais preconizam a metodologia tem de ser utilizada para o processo decisório (BRASIL, 2009), que passa pela classificação /enquadramento da água, destacando-se também a resolução CONAMA n.º 357/2005 que estabelece as classes de enquadramento para as águas doces, salinas e salobras (BRASIL, 2005)

As águas doces são aquelas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰, águas salobras apresentam salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰, e águas salinas possuem salinidade igual ou superior a 30 ‰. Os métodos e tolerâncias para enquadramento nas categorias são definidos na CONAMA n.º 274 de 2000.

O quadro 01 demonstra o custo do tratamento da água cresce de acordo com a elevação da classe, e a “importância” ecológica da água segue o caminho oposto.

Classes	Salina (> 30‰)	Salobra (entre 0,5 e 30‰)	Doce (< 0,5‰)
Especial			
I			
II			
III			
IV	Somente para água doce.		

Quadro 01: Classificação conforme CONAMA 274/00.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Variando dos usos mais nobres, tais como, fornecimento para consumo humano e manutenção de ecossistemas aquáticos a usos mais corriqueiros, tais como navegação e paisagismo.

Os rios são importantes recursos de alimento e renda, e no decorrer do processo de colonização do território brasileiro foram às principais vias de transporte de produção agrícola. Dentre as cidades que se desenvolveram devido à presença de rios, podemos citar Silva Jardim e Casimiro de Abreu, que são cidades do interior do Estado do Rio de

Janeiro que tiveram sua fundação as margens do rio (SILVA JARDIM, 2010) que é objeto deste trabalho (mais específico o baixo curso), o rio São João. O Rio São João, no período de colonização do território foi utilizado como meio de acesso à região, e ao longo dos anos tem acompanhado o desenvolvimento da cidade. Entretanto a atividade antrópica sob ele tem sido muito intensa, políticas governamentais, uso intensivo da agricultura (figura 03), ocupação não planejada de suas margens (figura 04), descartes de efluente (figura 05) e outras formas de contaminação estão entre os impactos recebidos por este rio.



Figura 03: Uso das margens para agricultura.

Fonte: Fotos tiradas pelo autor.



Figura 04: Ocupação das margens.

Fonte: Foto tirada pelo autor.



Figura 05: Descarte de efluente.

Fonte: Foto tirada pelo autor.

Ao longo dos anos, 03 estações foram instaladas neste rio e hoje nenhuma está em operação (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), todas as estações instaladas são a montante da área de estudo (montante do reservatório de Juturnaiba) que tem sua margem altamente ocupada seja por áreas agricultáveis seja por ocupação humana desordenada. Existe produção agrícola margeando o rio (na área de interesse), que não tem idéia dos

parâmetros de qualidade da água retirada para irrigação, o rio fornece alimentos (pescado), porém não se sabe a qualidade deste pescado (figura 06), esforços como o da Associação Livre de Aquinocultura – ALA que desde 2001 tem tentado implantar sistema de monitoramento da qualidade da água não tem gerado muitos resultados. Em 2009 foi tentado o manejo da área para marinocultura de bivalves na foz do rio São João, entretanto no momento da colheita foi constatado a mortandade das espécies, infelizmente devido à insuficiência de dados não foi possível determinar com certeza o motivo da mortandade. Os bivalves são seres filtradores (ODUM, 2003), e podem ser considerados como bio-indicadores, para poluição hídrica, o fato de estes terem morrido durante o ciclo desenvolvimento é um indicador de que a área sofreu ou tem sofrido impactos relevantes, entretanto não pode ser descartado o manejo inadequado com fato relevante para a mortandade.



Figura 06: Barcos de pesca utilizados no rio São João.

Fonte: Foto tirada pelo autor.

A carência de indústria, quase inexpressividade da agricultura e pequena participação no pescado são alguns dos problemas enfrentados pela sociedade, que pode ver no sistema do rio São João, alternativa de geração de renda, para tentar promover qualidade de vida. A região tem o aporte financeiro devido a verbas governamentais (royalties). A proposição de alternativas locais que tenham o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável é o desafio para este século, segundo a agenda 21. Logo o perfeito conhecimento das condições ambientais deste corpo hídrico/Sistema ambiental será ferramenta primordial para as proposições de projetos que tenham como escopo a promoção desta forma de desenvolvimento.

Este estudo pretende avaliar alguns destes impactos sofridos pelo rio e os reflexos gerados na população de entorno, que tem o rio como fonte de água e lazer.

Conforme a observação da ANA, o presente estudo não tem o objetivo de dar a resposta exata do rio que podemos ter, e sim propor métodos/meios para que este rio que pretendermos ter seja possível, avaliar os usos atuais deste corpo hídrico, verificar se o rio é condição limitante para os usos das terras adjacentes ou se o uso das terras adjacentes é limitante para a existência deste rio.

2 .MODELAGEM MATEMÁTICA.

A modelagem matemática é o conceito de procurar escrever com o rigor matemático fenômenos da natureza, prescrevendo comportamentos possíveis dentro de uma determinada condição de contorno. Isto pode ser feito de maneira determinística ou estocástica (ZAMBRONI DE SOUZA, 2008), e ainda de uma forma bem recente por meio de problemas inversos (LIMA,2009).

Alguns fenômenos são de extrema dificuldade de serem descritos e por consequência serem modelados, outros são de fácil descrição e de complexa modelagem e ainda há aqueles de difícil descrição e fácil modelagem, com são os fenômenos relativos a absorção de nutrientes pelas plantas ou processo de respiração e queda de um corpo no vácuo.

Para nosso trabalho estaremos, na área da mecânica que trata de fluidos e sistemas de partículas, que tem características bem peculiares ao serem modelados, pois os mesmos dependem das características reológicas do fluido, pois a combinação de soluto com solvente pode ocasionar em um fluido com características reológicas bem distintas (ROSA, et al, 2006) (MACHADO, 2002). Das equações modeladas, as mais simples são as de fluxo newtoniano e em geral são aplicadas aos mais diversos fins (sempre tendo em vista a característica geral do tamanho do sistema de partículas em questão) as mais complexas como as de fluxo de fluido não newtoniano, tais como:

- Dilatante: a viscosidade aumenta com o aumento da tensão;
- Pseudoplástico: a viscosidade diminui com o aumento da tensão;
- Binghamianos: estes fluidos requerem a aplicação de uma tensão para que seja causada uma deformação. Quando submetidos a pequenas tensões se comportam como sólidos;
- Newtonianos: a tensão cisalhante é proporcional ao gradiente de velocidade e o coeficiente angular da reta é a viscosidade dinâmica.

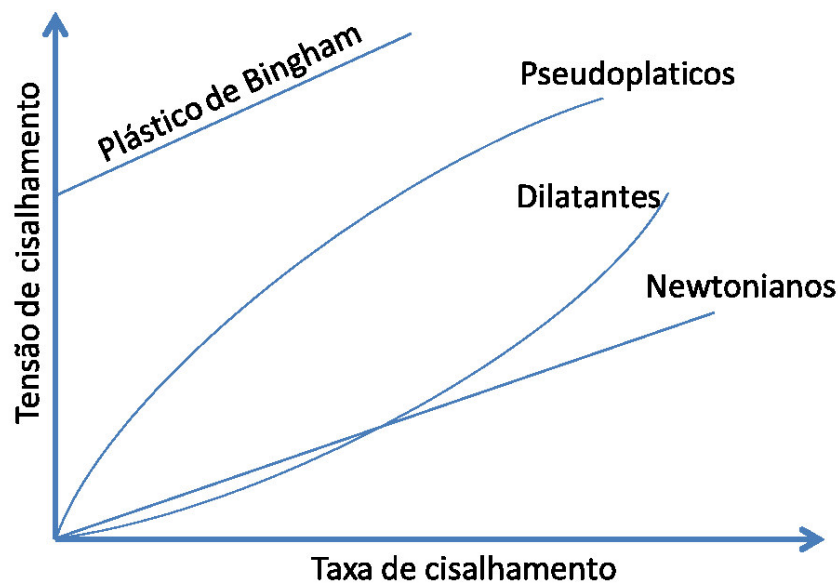


Figura 07: Comportamento dos tipos de fluidos de acordo com sua natureza.

Fonte: adaptado pelo autor.

Na modelagem ambiental, em geral, quando tratamos de modelos hidrológicos (ROSMAN, 2011; MOHID, 2011) consideramos os fluxos de fluidos newtonianos, e variamos as características do fluido de acordo com a aplicação para esta adequação de parâmetros em geral variamos a viscosidade, densidade e temperatura e que são as variáveis que maior relevância tem para os fluidos Newtonianos, caso estivéssemos trabalhando com fluidos não newtonianos deveríamos ainda considerar as variáveis, tensão de superfície, adsorção, regime de fluxo e velocidade do fluido (MACHADO, 2002) além do desdobramento da viscosidade em aparente, absoluta e cinemática. Uma importante condição que devemos impor a modelagem é o sistema de referência adotado, este em geral, é Cartesiano ou Sigma, onde no primeiro decomparamos os movimentos em componentes cartesianas, é no segundo realizamos transformação coordenadas para coordenadas sigma (MEDEIROS, 2003). O que definirá o sistema de coordenadas utilizado será sua adequação do objeto de análise e metodologia adotada, lembrando que a adoção de sistema Sigma pode implicar maior demanda de recurso computacional (ROSMAN, 2011).

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA AO MEIO AMBIENTE.

A modelagem matemática é uma ferramenta fundamental para estudos gerais e ambientais (EIGER, 1989), pois com base nos resultados de um modelo bem calibrado e

ajustado é possível realizar prognósticos e relacionar causa e efeito de alguns impactos ambientais (MEDEIROS, 2003) é também servir de ferramenta para a gestão ambiental (LIMA, 2010), pois a legislação brasileira define a necessidade de gestão tais ações (SERLA et al, 2001; ANA, 2009). Vários estudos vêm consolidando a metodologia da modelagem matemática ambiental com grande área de pesquisa (DYER 1986), de onde é possível extrair informações preciosas com respeito ao ambiente em estudo com um baixo custo pessoal (aspecto social) e financeiro (aspecto econômico), entretanto os custos computacionais podem ser extremos (LIMA, 2010; GODY, 2009) forçando a realização de algumas simplificações e criação de cenários extremos, como o apresentado nos trabalhos de Godoy (2009) e Medeiros (2003) ou a adoção de técnicas diversas como apresentado por Lima (2010), porém nada comparado com os custos de uma expedição de campo (no caso de uma abordagem estocástica do trabalho), que seriam bem maiores, desta forma os métodos determinísticos apresentam grande vantagem frente os métodos estocásticos, que utilizam uma massa imensa de dados de campo para a avaliação de um único cenário.

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 inclusão de cunha salina no rio Macaé, utilizando dados pretéritos de Rosman (2002), fazendo uso do Software de modelagem SisBahia e Medeiros (2003), que avaliou o quanto à batimetria (topografia do leito do rio) e a influencia da inclusão de cunha salina, Macuiane (2003), que avaliou o impacto que era a intrusão salina no rio Incomáti em Moçambique e como tal intrusão, afetava toda a população que margeia este rio e dificultava a atividade agrícola da região, em uma região que demanda de alimentos (o impacto social na população de entorno), Alegria (2006) que avaliou a dispersão de poluentes em um trecho do rio Caxipó (MT), onde esgoto doméstico é despejado quase sem nenhum ou sem nenhum tratamento e para tanto criou um programa em ambiente MATHLAB, Sarmiento (1997) que no métodos de modelagem matemática procurou determinar a capacidade de assimilação dos corpos d'água para efluentes domésticos e industriais, no 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, pode criar a hipsometria da região garantindo assim os reais potenciais de pressão hidrostática atuantes nesse corpo hídrico, e associando esta técnica ao software de modelagem MOHID (também utilizado neste

trabalho) foi capaz de realizar o balanço hídrico do objeto de estudo, fazendo uso dos método das Curvas Número.

É possível em uma busca rápida pela *internet* ter acesso a, pelo menos, 1400 resultados de modelagem em diversos rios/estuários, porém o modelo adequado a cada realidade deve ser proposto, testado e ajustado com dados de campo para partir daí, gerar resultados (LIMA, 2009) (GODOY, 2009).

São diversas as considerações a serem feitas para um modelo, ajustes de coeficientes tais como o fator de atrito (k), e o coeficiente de dispersão transversal (Kv), rugosidade, os quais devem ser testados. Condições de contorno devem ser impostas, e as condições iniciais devem ser conhecidas, para a elaboração de cenários bem fundamentados.

3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.

Conforme política nacional de recursos hídricos a gestão de recursos hídricos destes deve ser feita (ANA, 2009), e a região hidrográfica é a célula de unidade e gestão ambiental (SERLA, 2001) e o rio São João (baixo curso) carece de estudos e monitoramento de seus parâmetros (vasão, temperatura, regime de fluxo, biota, qualidade da água). Ao longo dos anos este corpo hídrico tem sofrido inúmeros impactos, e provavelmente já comprometendo a sua capacidade de resiliência, a carência de dados e estudos sistemáticos do rio o torna muito mais frágil a impactos antrópicos ou naturais. Dentre os diversos impactos antrópicos já sofridos pelo rio São João podemos citar a sua retilização na década de 70, devido a obras do extinto DNOS (CUNHA, 1994), o desmatamento das margens, despejos de esgoto sem tratamento, desenquadramento das águas da Lagoa de Juturnaiba, agricultura e pecuária nas margens, dos impactos ambientais podemos citar as fortes chuvas de verão (geram inundações e lixiviação do solo), o vento Sul (potencialmente salino), elevada exposição a radiação solar (que associada ao solo desnudo) causa empobrecimento do solo, spray salino (RIBEIRO, 2007), entre outros, cada impacto destes tem reflexos distintos no ecossistema do rio, a tabela 01, sintetiza estas informações.

Impacto	Fonte	Modo detecção	Consequências
Retilinização	Antrópica – Políticas públicas	Visual	Alteração de todo ecossistema, devido a alteração dos fluxos hidrológicos
Despejo de esgoto - sistemático	antrópicas – Falta de políticas públicas	Visual e ensaios laboratoriais	Alteração da qualidade da água e influencia direta no ecossistema
Despejo de efluentes - aleatório	Antrópica – Fiscalização insuficiente, manejo inadequado.	Visual e ensaios laboratoriais	Alteração da qualidade da água.
Carga de efluente fluvial	Antrópica e natural	Ensaio laboratoriais	Alteração da qualidade da água.
Spray marinho	Natural	Ensaio laboratoriais	Alteração do ecossistema

Tabela 01: Impactos possíveis no objeto de estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfeito conhecimento deste recurso é ferramenta fundamental para o seu manejo (CARDOSO, 2000), entretanto é impossível ao completo e perfeito conhecimento de um recurso natural, pois não basta conhecer a condição atual e

pretéritas do ecossistema deveram prever qual será o prognóstico deste sistema, a que ele esta interligado, quais são as interfaces, entre outros. Limitar o estudo a avaliação hidrodinâmica é uma técnica de dividir o problema maior em partes pequenas capazes de gerarem resultados (FIGUEIREDO, 2010), e de posse das possibilidades de ocorrência na região, tais como, regime de ventos, chuvas, comportamento da maré, altimetria, batimetria do leito do corpo hídrico, possibilidades de pressões antrópicas e grau das pressões antrópicas que seu sistema pode sofrer. São informações importantes que devem ter para a concepção do modelo hidrodinâmico. O modelo determinístico não deve fazer inferências intangíveis dos possíveis cenários, tem de ter elevado grau de certeza de ocorrência, e as variáveis devem estar bem claras (MACHADO, 2006), infelizmente a região é pobre de dados, fato que faz com que o objeto de estudo seja trabalhado de forma mais ampla, alternando os métodos estocásticos e determinísticos, para a geração de informação para o modelo computacional.

A relevância da proposta é fundamentada na afirmação de que não estamos apenas tratando de ÁGUA e sim um sistema completo, onde a água é parte importante deste sistema, entretanto os demais constituintes não devem ser desprezados, talvez método de observar a região deixe um pouco fora de foco partes de menores resolução, contudo em estudos futuros estas nuvens de incertezas poderão ser melhor avaliadas e solucionadas.

4 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é propor cenários e aplicar a modelagem matemática para ter resultados consistentes, de posse destes cenários e os resultados rodados da modelagem.

4.1 OBJETIVO GERAL

Obter informações acerca da região da bacia hidrográfica do rio São João, de forma a conhecer a região de estudo e criar cenários prováveis de impactos da região.

4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Utilizando o software livre, MOHID, rodar cenários do baixo curso do rio São João, com foco na intrusão salina, com a simulação de 36h em um período de maré de sizígia, onde o alcance da cunha salina seja mais intenso semelhante com os resultados apresentados por Medeiros (2004) no rio Macaé.

4.3 REGIÃO DE ESTUDO

A caracterização da área de estudo é importante para que sejam elaborados cenários coerentes com os aspectos observados na região (a verificação da região de forma ampla é fundamental para que em um estudo de modelagem matemática)

A região de interesse para este estudo fica situada na baixada litorânea, região de bioma predominante de Mata Atlântica, entre as cidades de Casemiro de Abreu, Silva Jardim e Cabo Frio é uma área de baixas altitudes (entre 0 a 10 m) e é o principal extravasor das águas do reservatório de Juturnaiba (SERLA, 2001), que concentra todo o escoamento hídrico da bacia do rio São João (com aproximadamente 2.160 km²), conhecida como bacia hidrográfica do Rio São João, a figura 08 delimita a região hidrográfica, nela é possível ver que 08 municípios compõem esta região hidrográfica.

	Área Total do município	Área do município na Bacia	Importância (%) Relação entre as áreas		S0
			Bacia	Município	
	km2				
Araruama	633,8	351	16,26	5,38	17,33
Cabo Frio	403	188	8,7	46,65	3,09
Cachoeiras de Macacu	950,3	53	2,46	5,58	4,15
Casemiro de Abreu	462,9	352	16,3	76,04	5,79
Rio Bonito	462,1	258	11,94	55,83	19,09
Rio das Ostras	230,3	10	0,44	4,34	0,02
São Pedro da Aldeia	358	8	0,38	2,23	0,29
Silva Jardim	940	940	43,52	100,00	50,25

Tabela02: Macro informações da bacia hidrográfica.

Fonte: elaborada pelo Autor.

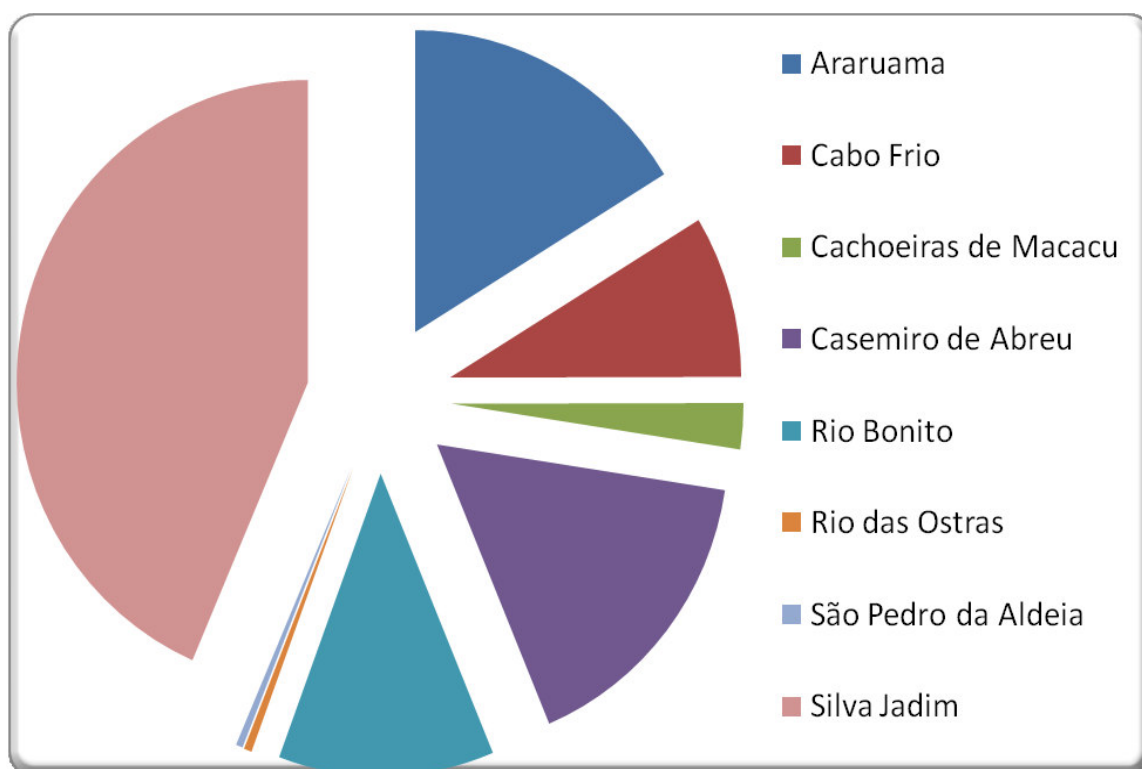


Gráfico 01: Importância do município para a bacia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

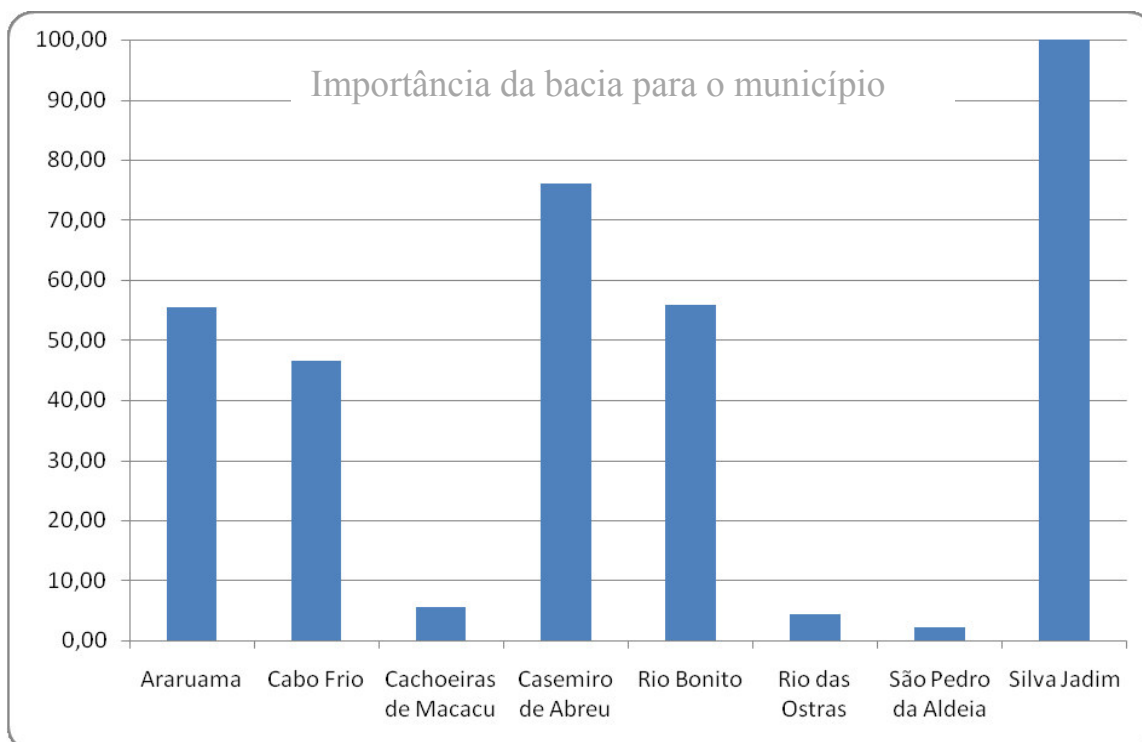


Gráfico 02: Importância da bacia para o município.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico 01 e 02, representam respectivamente a importância do município para a bacia e da bacia para o município, respectivamente, em termos geoespaciais.

Com o reatamento do fator geo-espacial, é possível ter uma noção melhor de como os atores sociais/município se comportam na bacia hidrográfica e como as suas ações podem ser reatadas na mesma.



Figura 09: Reatamento da bacia de drenagem sobre o espigão principal.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando os fatores de ponderação é possível estimar o impacto de cada município na bacia de drenagem conforme a tabela 02.

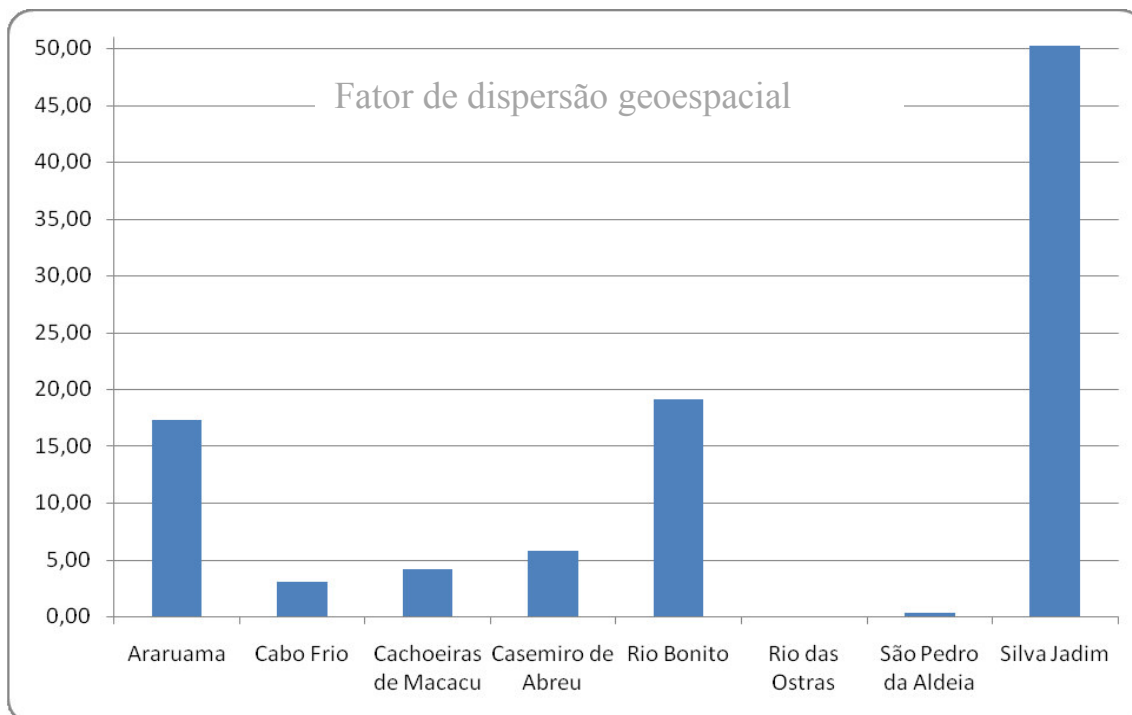


Gráfico 03: Fator de dispersão geo-espacial.

Fonte: Elaborado pelo autor.

É preciso ter em mente que, o impacto, seja ele qual for é cumulativo ao longo da bacia, isto é um conceito inicial, pois a proposta da modelagem matemática é verificar o comportamento deste impacto ao longo da bacia hidrográfica, o peso de cada município é dados de entrada para o modelo.

Da premissa acima é feita também a simplificação que os impacto (por mais genéricos que sejam) são aleatórios e podem ocorrer em qualquer ponto da bacia.

Os fatores climáticos são importantes para a elaboração de cenários de características naturais.

Conforme já dito a região é carente de séries históricas de dados ambientais, alguns estudos podem ser resgatados para caracterizar a região, dentre eles o levantamento do Consórcio Intermunicipal Lagos São João realizado em conjunto com a SERLA e FEEMA, publicado em 2001 que foi a publicação com mais dados da região, os dados climáticos, podem ser obtidos a partir de estações próximas (figura 10) do período entre agosto a outubro de 2011. O gráfico 04, 05 e 06 representam a distribuição do vento na região e irradiação na região.



Figura 10: Estações próximo a região de interesse, fonte: http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php, acessado em 17/10/2011.
Fonte: Adaptado pelo autor do site do INMET.

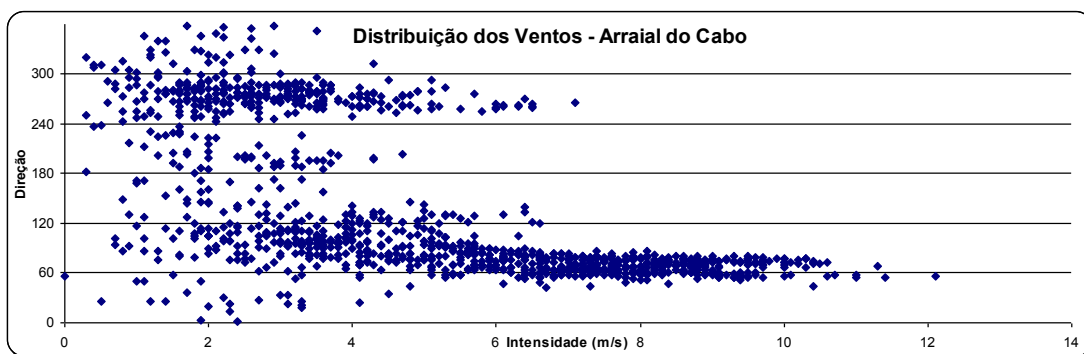


Gráfico 04: Distribuição dos ventos em Arraial do Cabo.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

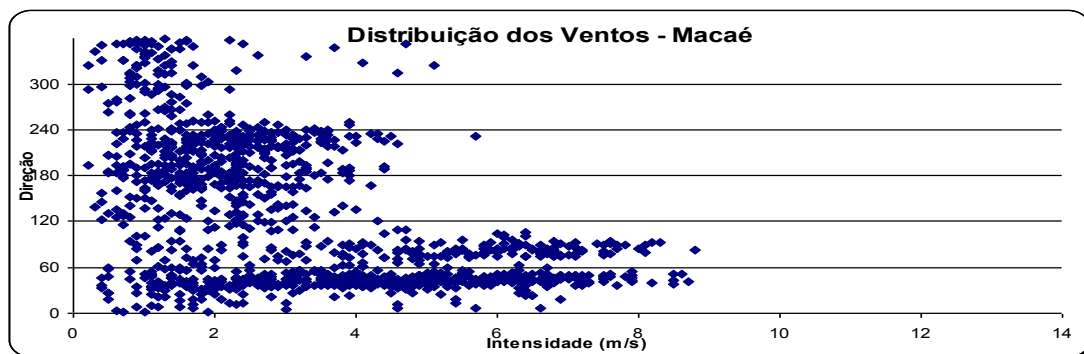


Gráfico 05: Distribuição dos ventos em Macaé.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

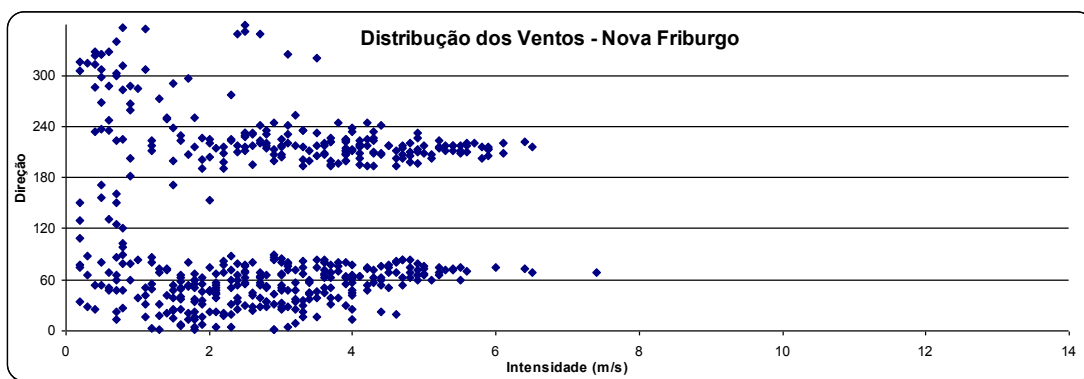


Gráfico 06: Distribuição dos ventos em Nova Friburgo.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

De forma geral os ventos tendem a serem mais concentrados entre ângulos de 60 (NE) e 240 (SO) graus, verificando uma defazagem entre eles de 180 graus, e também tendem a serem mais intensos com angulos entre 60 que os de ângulo 240, as duas estações mais próximas do mar comprovaram a tendencia de ventos NE mais intensos que SO, fato já não verificado na estação de Nova Friburgo, não será objeto deste estudo os motivos deste comportamento, só os fatos relevantes ao regime de ventos que será levado em consideração.

Os gráficos 07, 08 e 09, exprimem outras características climáticas da região.

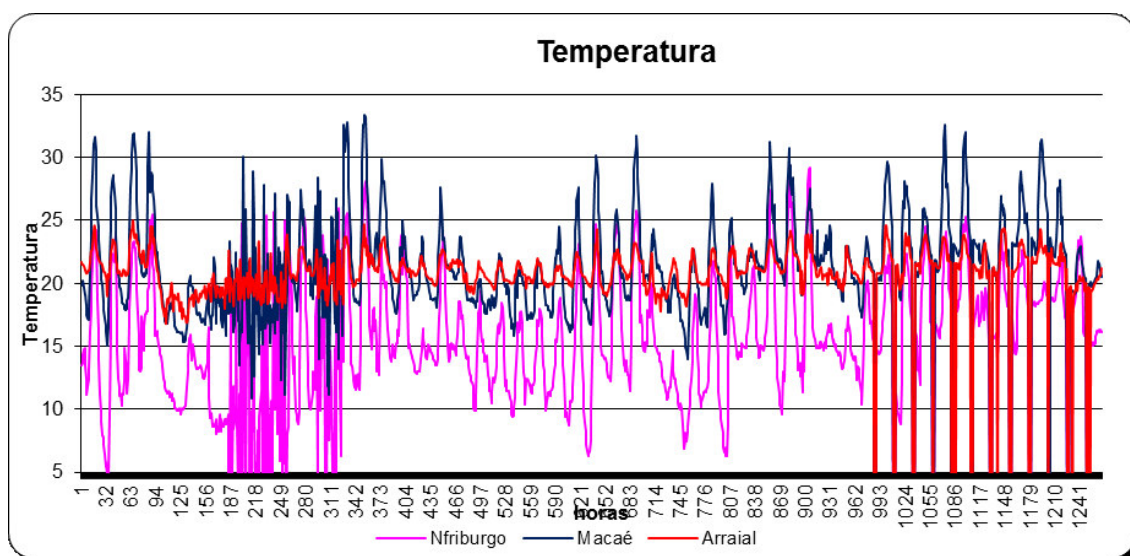


Gráfico 07: Temperatura característica do região no periodo entre agosto – outubro.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

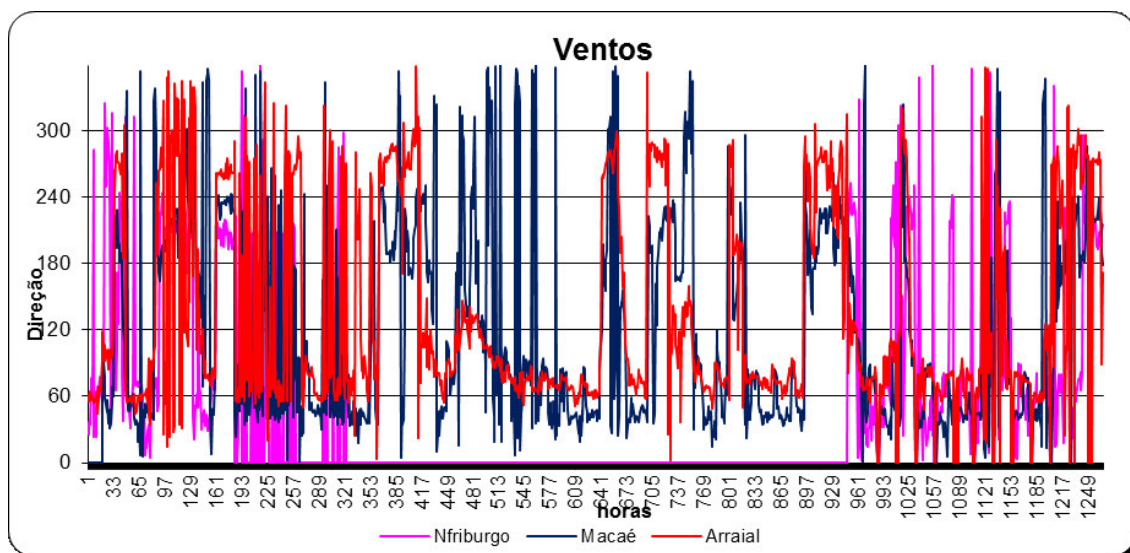


Gráfico 08: Direção do vento característica do região no período entre agosto – outubro.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

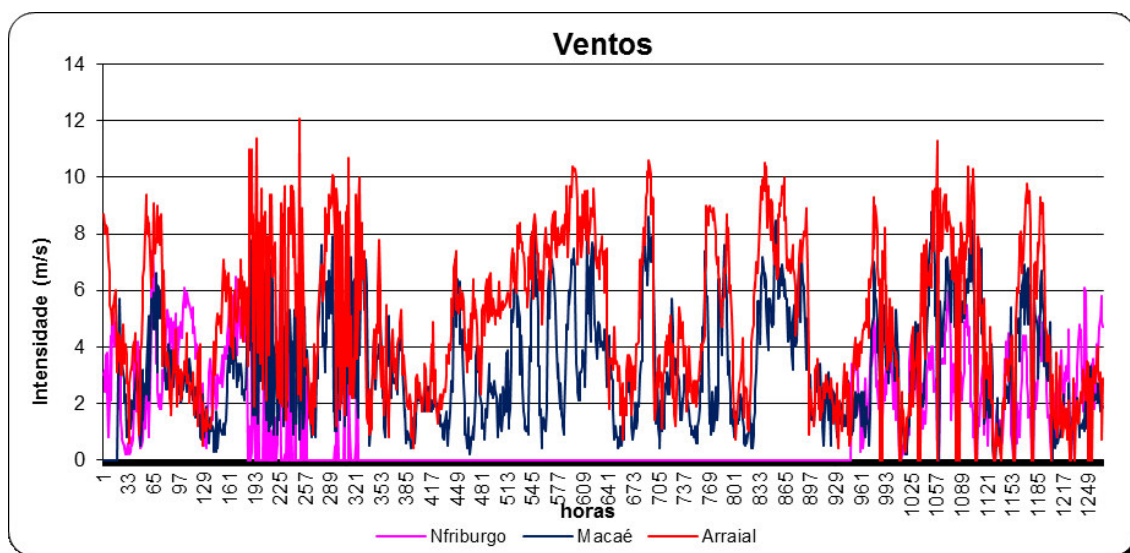


Gráfico 09: Intensidade do vento característica do região no período entre agosto – outubro.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do INMET.

Dos gráficos acima verificamos que a temperatura de Arraial do Cabo é a de menor amplitude dentre as demais e as temperaturas entre Nova Friburgo e Macaé estão praticamente em fase, com amplitudes diferentes.

O regime de ventos apresenta variação periódicas constantes não inferiores a 30 horas (descaracterizando uma mudança radical na direção dos ventos entre o regime diurno e noturno) e a intensidade também tem características periodicas semelhantes, porém com períodos bem maiores.

A caracterização da região quanto aos dados climatológicos além de ser importante para a caracterização da região, também é ferramenta para a modelagem

matemática, pois para a elaboração do modelo hidrodinâmico variáveis como direção e intensidade do vento são importante pois afetam o tempo de residência da água no corpo hídrico e conforme cita Alegria (2006) este é um fator importante quando estamos avaliando a dispersão de poluentes em suspensão em um corpo hídrico, a temperatura é importante condição de fronteira para a construção da densidade da água para o modelo (MEDEIROS, 2003), entretanto dependendo da metodologia (Volumes Finitos e Elementos Finitos) que é determinada pelo programa utilizado adotado é possível verificar diferentes equações para a construção da densidade, conforme as equações 02 e 03.

$$\rho = (5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S) / ((1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)) \quad (2)$$

Onde

S é a salinidade;

T é a temperatura.

Densidade da água em função da salinidade e temperatura (método de volumes finitos).

Fonte : Mohid Descriptions, 2011.

Onde

ρ_0 é a densidade de referencia;

ρ é a densidade média;

s é a salinidade;

α e β coeficientes da equação de estado.

Equação de estado, para solução da densidade (método de elementos finitos).

Fonte: Medeiros, 2006.

O regime de chuvas também é importante quando tratamos de um corpo hídrico, pois dele retiramos as contribuições do lençol freático além das contribuições provenientes do escoamento de superfície (GODDY, 2009), outros problemas podem estar relacionados com a contribuição fluvial, tais como a contaminação do corpo hídrico devido a chuva carrear adubos/defensivos agrícolas para os corpos hídricos, aumento a DBO, Fósforo, MO entre outros fatores que contribuirão para a cultura de algas e outros micro organismos (FONSECA et al, 2002), entre tanto para o completo

entendimento seria necessário o mapeamento de uso do solo, que não será objetivo deste trabalho. A figura 10 mostra a distribuição de chuva na região, para a elaboração do modelo, esta informação poderá ser utilizado para o balanço hidrico, utilizando o método das curvas números (GODOY, 2010).

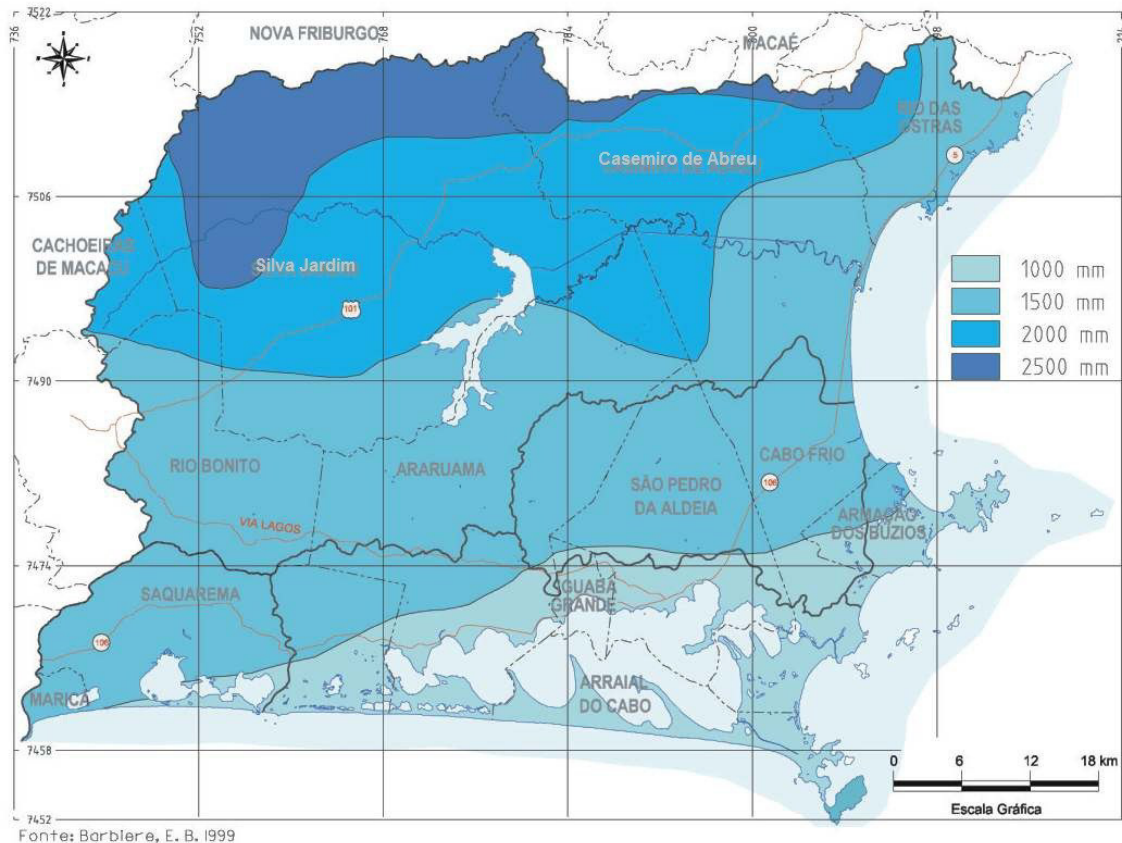


Figura 11: Distribuição das chuvas ao longo da Bacia Hidrográfica 06,
Fonte: Adaptado pelo autor do trabalho de Barbieri, E. B 1999 apud SERLA et al, 2001).

A distribuição das chuvas na bacia do Rio São João exhibe fortes variações. Esta variação é devido à ação combinada das mudanças das massas de ar sobre a região ao longo do ano com as diversificadas características do meio ambiente das bacias e da zona costeira, em especial o relevo, é possível relacionar as mudanças dos adensamentos pluviométricos com a altitude.

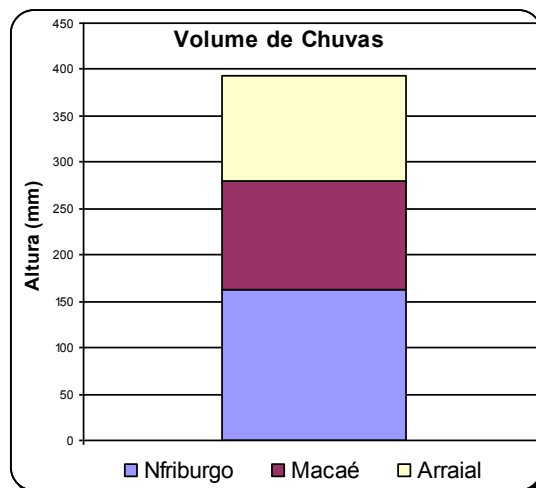


Gráfico 10: Altura acumula das chuvas nos meses de agosto até outubro.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

As estações são representativas para 3 das 4 faixa de volume de chuva. Conforme já dito do conhecimento do volume de chuva é importante para a caracterização da região.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos estudos semelhantes realizados, nas mais variadas áreas têm encontrado resultados bem expressivos para corpos hídricos, dentre esses podemos destacar:

Yunnes: que vem estudando a lago dos patos no Rio Grande do Sul, em suas pesquisas investigou o aparecimento de cianobactérias do gênero *microcysti*. Em um de seus artigos faz uma revisão de 20 anos de observações onde pode verificar que a salinidade é um fator limitante para tal cultura, entretanto nos meses de verão, devido à baixa pluviosidade e à diferença significativa da salinidade, faz com que a água salgada do mar, mais densa, entre por baixo fazendo com que os nutrientes re-fluam favorecendo a floração das algas azuis;

Ribeiro: que de forma sistemática, avaliou a influencia do *spray* marinho como fator limitante das culturas estuarinas. Em sua pesquisa no estuário do rio Massaguaçu em Caraguatatuba, SP, observou que o pH e a temperatura, não influenciam a composição florística das margens do estuário e mas sim o *spray* marinho. Em sua pesquisa bibliográfica cita Sideris (1955), que demonstrou que o *spray* marinho pode ser percebido até 2 km, e que de distância e seus efeitos vão além da simples salinização do solo, mais também este é depositado no tecido das plantas.

Fausto: verificava o comportamento do *Farantepenaeus-paulensisi*, (camarão rosa), na laguna de Tramandai RS concluindo que a salinidade não é fator limitante para tal espécie. Entretanto a entrada da cunha salina no corpo hídrico favorecia a entrada da espécie, pois nesta condição o gradiente de deslocamento lhe era favorável.

Amaral (2004): propõe a modelagem matemática como instrumento para gerenciamento integrado de recurso hídrico. Estudando o caso do rio Macaé propõem modelos eulerianos de transporte advectivo difusivo, utilizando o software SisBAHIA, de elaboração da COOPE/UFRJ, propõem as condições de inclusão de cunha salina no rio Macaé, para diversas situações de maré cheia vazante em condições de sizígia e quadratura. Com tal estudo é possível observar que em condições de maré de sizígia com condições de estiagem, era possível que a inclusão de cunha salina de atinja até 11 km.

Pinheiro: propõem o uso de imagens orbitais para o monitoramento da turbidez em rios. Estudou o rio Itajai-Açu e utilizou imagens do sensor TM do satélite LandSat-5. Ele ressalta que em pequenos corpos hídricos (de até 150m), em geral não são avaliados por esta técnica. Seu experimento utiliza o produto do satélite e gerando correlação ente os dados observados pelo satélite e observados por ele em coletas realizadas *in loco*, na data da passagem do satélite. Tais dados podem ser relacionados e gerarem equação de regressão capaz de predizer o comportamento para uma determinada condição observada pelo satélite. Entretanto ele chama a atenção citando Kondratiev *et al.* (1998), que cada corpo hídrico tem seus coeficientes específicos, e alerta para o erro que pode ser cometido quando se generaliza o modelo para diversas situações.

Paula: em 2007, apresentou artigo com a análise e salinidade e MPS, obtidas no estuário das Contas, localizada no município de Itacaé/BA, Avaliando salinidade e material particulado em suspensão (MPS) durante período de maré sizígia, coincidentemente com períodos de baixa vazão, a união destes fatores favorecem a inclusão salina no corpo hídrico. Como resultado foi observado que durante a inclusão da cunha salina pode ocorrer a até 5 km a montante da foz do rio, sendo esta mais percebida no fundo que na superfície. Valores mais expressivos foram encontrados para períodos de maré de cheia. As variáveis foram tratadas por métodos estocásticos (estatísticas de valor central) tendo sido verificado, a inexistência de correlação linear entre elas, porém existe covariação entre as amostras coletadas ao longo do estuário no

período de maré vazante. Diante de tal resultado, o autor afirma ser um indício de que existe uma zona de alta turbidez associada ao encontro das massas d'água.

Cardoso da Silva: procurou estabelecer critério ambiental para a classificação de estuários. Autora procura rever os atuais critérios de classificação de estuários, os quais são baseados na morfologia, hidrodinâmico e na salinidade provável da coluna d'água, propondo estética, sanitária, quanto ao estado trófico e a poluição por substâncias. Afirma que a dependência das classificações ambientais, físicas e o conhecimento epistemológico são ferramentas fundamentais que balizam sistema de gestão adequado ao estuário. Resultado que confirma a hipótese de que o tratamento de ações ambientais como projeto segundo preceitos do PMI (VARGAS, 2009).

Godoy: avalia a qualidade da água na lagoa da Conceição em Santa Catarina, utilizando o MOHID para a geração dos seus resultados e o Spring para a solução do espaço GIS. Ele chama a atenção para a utilização de tempos de integração pequenos e o esforço computacional envolvido para tal demanda. A dispersão e alteração das concentrações são realizadas a partir de um modelo lagrangeano

Pereira Filho (2003), mostra o resultado de 16 meses de campanha de análise de nutrientes inorgânicos e salinidade, cujos dados foram coletados quinzenalmente. As estações de coleta localizavam-se, uma a montante de uma região portuária e outra a jusante desta mesma região portuária, o objetivo desta campanha era avaliar a influencia da atividade portuária na dinâmica dos nutrientes inorgânicos (NH_4^+ , NO_2^- , NH_4^+ , Si, PO_4^{-3}). Observou que o regime de vazão do rio determinava a concentração destes nutrientes e a concentração de nutrientes no fundo era bem inferior que na superfície, caracterizando uma estratificação na coluna d'água, criada pela intrusão da cunha salina. Além disto, as médias dos nutrientes eram muito similares para ambas estações, porém maior concentração de nutrientes foi encontrada na estação a montante do porto, fato que pode ser relacionado com a inclusão de água marinha, pobre em nutrientes. Para o cátion amônio, foi verificado aumento em sua concentração, fato que pode ser explicado pela atividade antrópica na região, não somente relacionada ao porto, mas também ao despejo de efluentes domésticos no rio a montante das estações de medição.

Santiago (2005), sobre o estuário do rio Pisa Sal em Galinhos, RN. No qual realizou análise fatorial dos dados ambientais separando estes em dois grupos, maré vazante e enchente e ponderou os resultados. Com este trabalho foi possível verificar que a análise multivariada é ferramenta importante para a análise de fatores ambientais (lembrando

que trata-se de um método estocástico), pois ele partindo de métodos fatorais e ponderados, pode convergir para resultados comuns na literatura a ainda afirmar que apesar dos impactos antrópicos, este ambiente se renova devido a influencia da maré.

Labomar, o Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará em 2003 realizou estudo, para caracterizar as condições físico-químicas dos estuários cearenses. Isto demonstra a preocupação estatal com o conhecimento das condições ambientais e dos fatores que mais influenciam estas condições. Um dos motivadores deste projeto foram à avaliação preliminar das condições destes corpos hídricos, Com base nestas condições projetos, planos de ação voltados à solução de possíveis impactos possam ser elaborados e planos de ação sejam elaborados para casos de maior demanda. O estudo cita dados de *Geophysics Study Committee* de 1977 que afirmam que 60% da população mundial desenvolveram em torno de estuários, e propõe que estes dados sejam extrapolados para o Brasil, confirmando a importância histórica e econômica destes sistemas. Estes dados são alinhados a nossa realidade de estudo, pois as cidades de Casimiro de Abreu e Silva Jardim, também desenvolvem ao redor do rio São João.

Lima, em sua pesquisa de doutorado tem trabalhado com o *software* Mohid, para avaliação de seus resultados para a modelagem da qualidade da água em rios e estuários.

Entre diversos outros trabalhos que foram consultados e serviram de base bibliográfica para esta pesquisa.

6 ARTIGO CIENTIFICO: OBTENÇÃO DAS INFORMAÇÕES DE ENTRADA PARA A MODELAGEM DA INTRUSÃO SALINA NO BAIXO CURSO DO RIO SÃO JOÃO

Gabriel Lima de Souza ¹
Jader Lugon Jr. ².

1. INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / NUPERN – Mestrando em Engenharia Ambiental.

2. INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / *Campus Macaé* / NUPERN – Prof. Dr. em Modelagem Computacional. Mestre em Modelagem computacional.

6.1 RESUMO

O trabalho proposto tem o objetivo de gerar informações de entrada para o modelo utilizado no baixo curso do rio São João, a fim de avaliar o comportamento da intrusão salina neste corpo hídrico.

A região apresenta diversas utilizações dos recursos naturais e historicamente tem sido utilizada para a agricultura. Recentemente, com o declínio da atividade agrícola na região (devido a diversos fatores internos e externos), as aspirações do uso deste recurso para atividades que promovam o desenvolvimento (infelizmente em muitos casos a subsistência) têm levantado diversas dúvidas quanto ao manejo adequado.

Para a proposição de manejo adequado, as aspirações de uso são um conjunto de ações coordenadas que podem dar conta da dimensão proposta. Este estudo tem o objetivo de poder compor a carteira de subsídios necessária a este processo decisório.

6.2 ABSTRACT

This Paper show the process that was used to make the information that must be used to the model for baixo curso do rio São João about the salt intrusion in this river.

The region has diverse uses of natural resources and has historically been used for agriculture. Recently, with the decline of agriculture in the region (due to various internal and external factors), the aspirations of the use of this resource for activities that promote development (unfortunately in many cases subsistence) has raised several

questions regarding the appropriate management. To the proposition of appropriate management, the aspirations of use are a set of coordinated actions that can handle the size proposed. This study aims to be able to compose a portfolio of grants needed for this decision making process.

6.3 INTRODUÇÃO

As informações de entrada do modelo hidrodinâmico devem ser a mais acurada possível, visando minimizar os erros relativos a escalas e variações geométricas. O sistema proposto para ser utilizado é o MOHID, que é um software livre fornecido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, que, dentre outros, tem dois grandes módulos, o GIS e o GUI. O tratamento adequado das informações é dado de entrada para estes módulos. Portanto, este trabalho tem a finalidade de expor a forma que as informações a respeito do comportamento dos regimes das marés e eólico e aspectos morfológicos foram tratados, de forma a gerar dados de entrada do modelo.

6.4 REVISÃO DA LITERATURA

A elaboração de modelagem matemática ambiental tem necessidade que as informações sobre a morfologia do objeto de estudo (ROSMAN, 2011) e fenômeno de interesse são importantes para a escolha do método de discretização do objeto, a opção pela metodologia de solução das equações fica a cargo do software a ser utilizado, como por exemplo, o SisBahia utiliza o método de elementos finitos (ROSMAN, 2011) e o Mohid que utiliza o método de volumes finitos (MOHID, 2011) e ainda os programas escritos em softwares de solução matemática como foi o caso de Alegria (2006) que utilizou o Matlab para escrever instruções para solucionar o problema de dispersão de poluentes em um trecho de rio, para tanto utilizou método de diferenças finitas a partir da equação de águas rasas.

O método de Volumes Finitos é bem similar ao método das Diferenças Finitas, isso porque, em vários casos, as equações discretizadas obtidas por ambos os métodos são semelhantes. Entretanto, os dois métodos têm bases de formulação diferentes. O método de Diferenças Finitas tem uma dedução puramente matemática, por aproximações de derivadas usando séries de Taylor, a formulação do método de

Volumes Finitos tem base física, pela observação dos fenômenos e proposição das equações a partir de fenômenos conhecidos (MACHADO, 2006).

Portanto, como visto, o método utilizado é de opção do profissional que estiver elaborando o estudo.

Dentre os diversos estudos semelhantes ao nosso, destacamos os trabalhos de Macuiane (2003) que estudou a intrusão salina no estuário de um rio de seu país, e, com base nesta ação da natureza, levantou toda a problemática envolvida com a escassez de recursos naturais; o trabalho de Medeiros (2003), que verificou a influencia da batimetria no avanço da intrusão salina; Paula *et al*(2007) que verificou os valores da coluna de água para a avaliação da sua extratificação quanto a salinidade (trabalho de campo) e Amaral (2004) que utiliza a Modelagem Matemática como ferramenta de gestão e faz uma aplicação de caso no estuário do rio Macaé em Macaé/RJ,

6.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O baixo curso do rio São João não possui estação de coleta de dados. Muitos destes dados foram coletados em campo e outros por meio de pesquisa bibliográfica, artigos/informações disponíveis na internet, bases de dados do IFF, Petrobras, Consórcio Lagos São João e Pró-lagos.

6.5.1 Batimetria

Em pesquisa bibliográfica não foi possível obter a batimetria do Rio São João com a resolução requerida, logo se fez necessária coleta de campo.

De acordo com Medeiros (2006), a batimetria é um fator muito importante para avaliar a inclusão salina. Godoy (2009), que apesar de tratar de outros parâmetros (qualidade da água), também reafirma a importância da batimetria para a proposição do regime de fluxo do corpo hídrico.

A coleta de dados batimétricos foi realizada em 03 campanhas utilizando sonar portátil ao longo do rio. Em geral, foram medidos em pontos onde a geografia do rio sofria mudanças drásticas ou permaneciam constantes por um longo trecho. Tal método não é capaz de identificar pontos de ação pontual severa. Ou seja, caso haja uma região pequena que sofra acentuada modificação, essa provavelmente não será investigada. Entretanto, tal região não deve trazer prejuízo ao modelo como um todo.

Este método para coleta de dados foi o mais adequado à realidade da pesquisa, e, baseado nos trabalhos que afirmam que a cunha salina é verificada a pelo menos 05 km a montante da foz (PAULA 2007; AMARAL 2004), observou no nosso caso de estudo a influencia salina até 11 km.

6.5.2 Altimétrico

As informações altimétricas são importantes para o cruzamento entre planos de informação dos dados batimétricos (medidos) e altimétricos (obtidos dos SRTM), o cruzamento destes planos de informação cria a topografia do leito do corpo hídrico.

A figura 12 é a representação dos dados altimétricos (SRTM) e a cena do Satélite CBERS2.

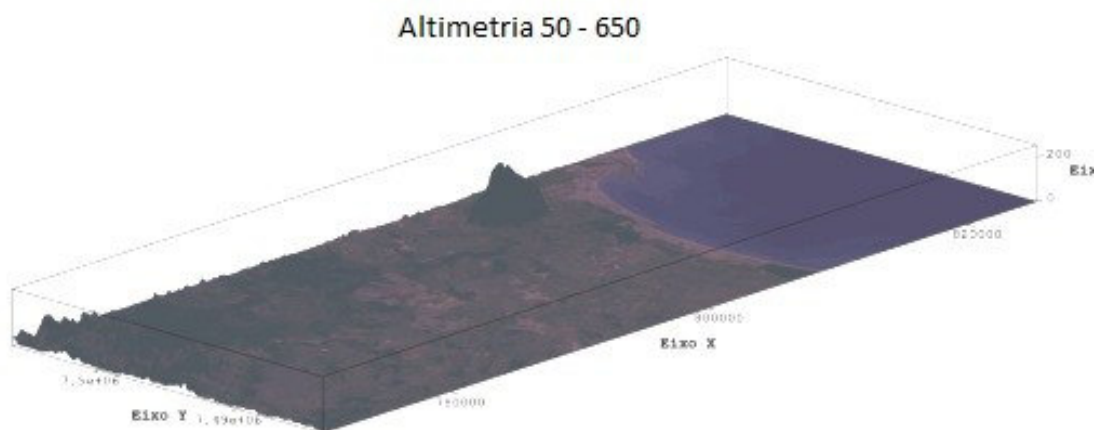


Figura 12: Imagem 3D criada com os dados altimétricos do projeto SRTM e a imagem sintética do satélite CBERS 2.

Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software Springs.

Os principais dados obtidos o tratamento dos modelos numéricos as altitudes similares a do oceano e a baixa velocidade do rio, favorecendo assim a baixa da taxa de renovação de água. A altitude observada pode favorecer a intrusão salina. Menor velocidade e conseqüente elevada evaporação (devido a um maior tempo de residência) aumentando a concentração de sal na coluna d'água nesta área ou outro material precipitável e/ou pesado.

Utilizando o Spring foi possível elaborar a figura 13, mapa que limita o corpo hídrico, através da qual é possível ter uma visão geral de toda área de interesse.

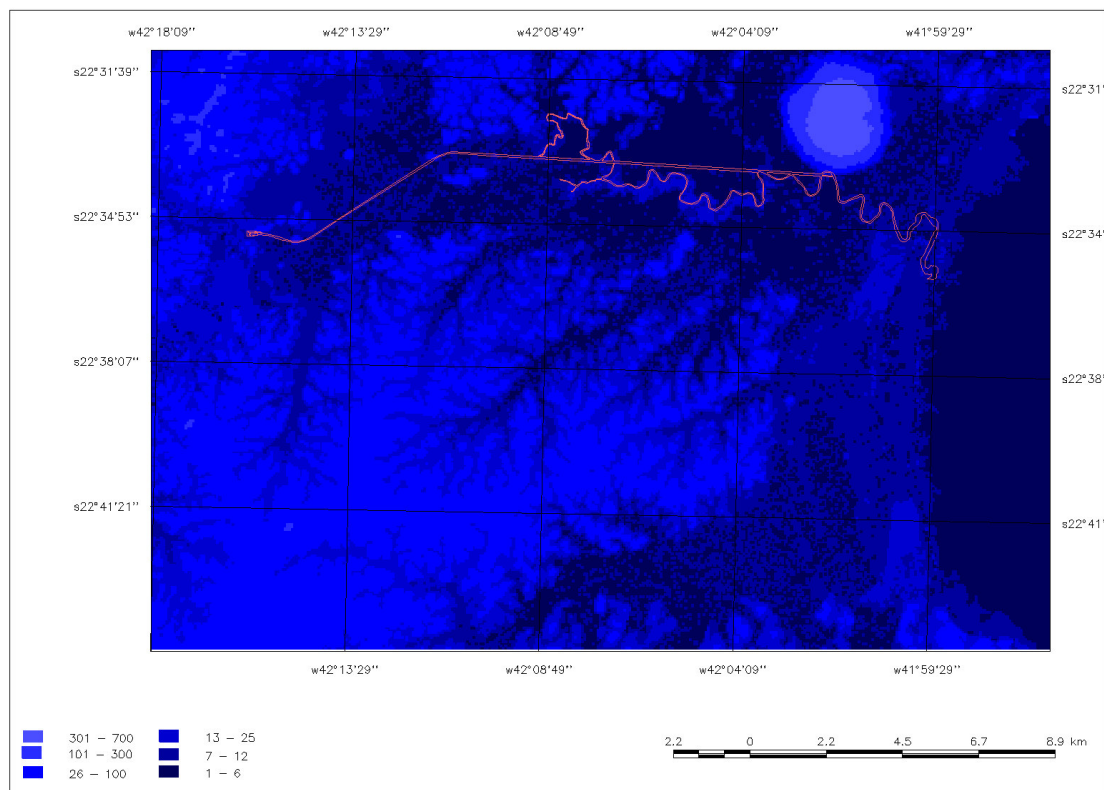


Figura 13: Mapa da região de interesse.

Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software Springs.

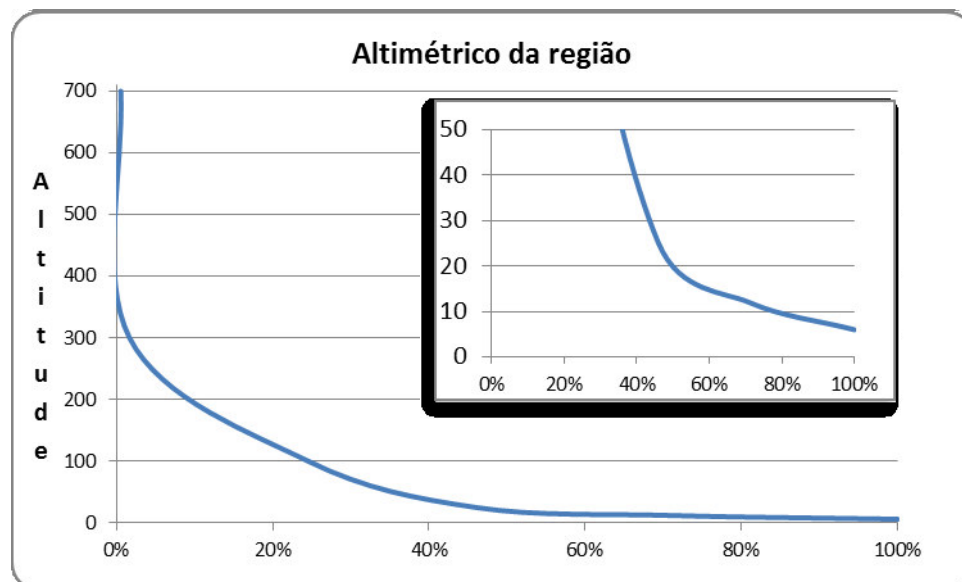


Gráfico 11: Curva hipsométrica da região.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De posse das informações obtidas com os mapas, foi possível ter uma visão melhor da área de estudo e já começar a ter alguma expectativa do terreno digital dos prováveis depósitos de precipitáveis, fontes de contaminação externa. O conhecimento prévio da área de estudo é de elevada importância para a criação de mapas (ANDRADE, 2007) e este conceito pode ser estendido para modelagem matemática.

6.5.3 Marés

A condição de maré a jusante da foz do rio é informação de contorno, pois esta determina a inclusão da cunha salina, conforme trabalho de Paula *et al* (2007). A sua maior influência é observada na maré de sizígia, em períodos de baixa vazão do rio.

Entretanto, estes dados não estão disponíveis para a região de nosso estudo. A proposta é obter os dados de previsão de maré das estações do porto de Imbetiba em Macaé/RJ e do porto do Forno em Arraial do Cabo/RJ. Tais dados estão disponíveis em <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/mares.html>, foram acessados em 18/06/2010 e coletados por um período de 18 meses, de janeiro de 2009 até junho de 2010, para as duas estações e 01/08/2011 até 30/09/2011, período de 02 meses para aferir o marégrafo modelado utilizado.

Não foi criado um marégrafo para a região da foz do rio São João, os valores das componentes orbitais foram às utilizadas por Lima (2010). É possível realizar comparação entre os valores gerados a partir do marégrafo modelado (modelo astronômico) e os valores do marégrafo do IBGE, localizado no porto de Imbetiba em Macaé e do Marégrafo do IEAPM no porto do Forno em Arraial do Cabo (**Latitude:** 22°58,3'S **Longitude:** 042°00,8'W **Fuso:** +03.0 **Ano:** 2011). Os valores de amplitude e frequência tem elevada similaridade, divergindo apenas de algumas horas (componente fase). No entanto, isto não é considerado problema, pois basta a correção de horário (fase) do dia de avaliação. Os gráficos 12 e 13 demonstram a correspondência.

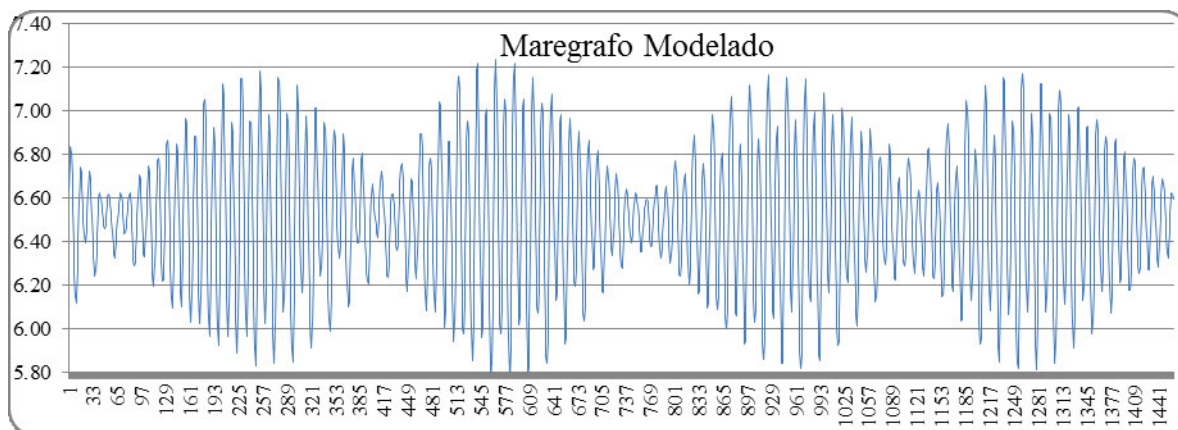


Gráfico 12: Marégrafo modelado.

Fonte: Elaborado pelo autor, informações das tábuas de marés.

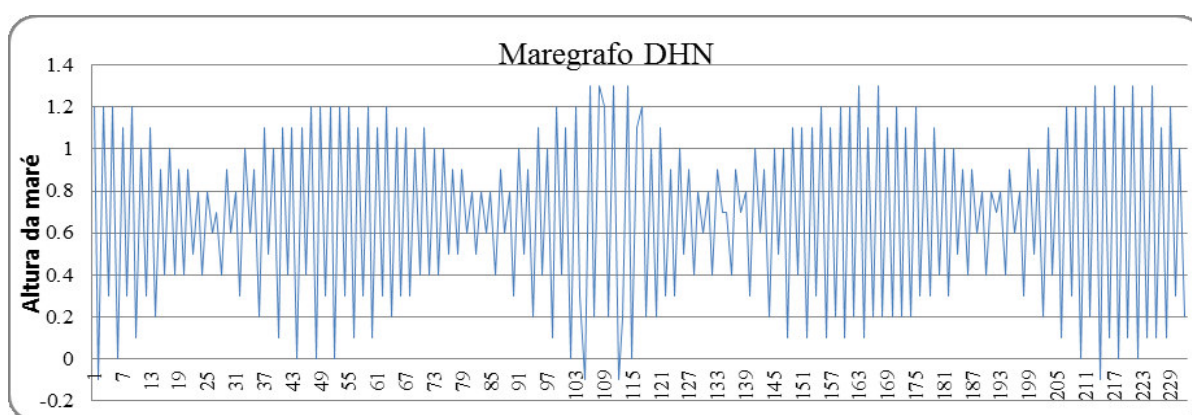


Gráfico 13: Marégrafo DHN

Fonte: Elaborado pelo autor, informações das tábuas de marés.

6.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.6.1 Batimetria

Com as campanhas realizadas de acordo com a metodologia adotada foi possível gerar um mapa preliminar da batimetria do rio (Figura 14).

A figura, contém apenas os valores medidos nas campanhas de campo corrigidos (dados brutos), não fazendo referência aos valores ajustados ao nível de referência adotada para batimetria local. O ajuste dos dados para o nível de referência é feito a partir da topografia da área.

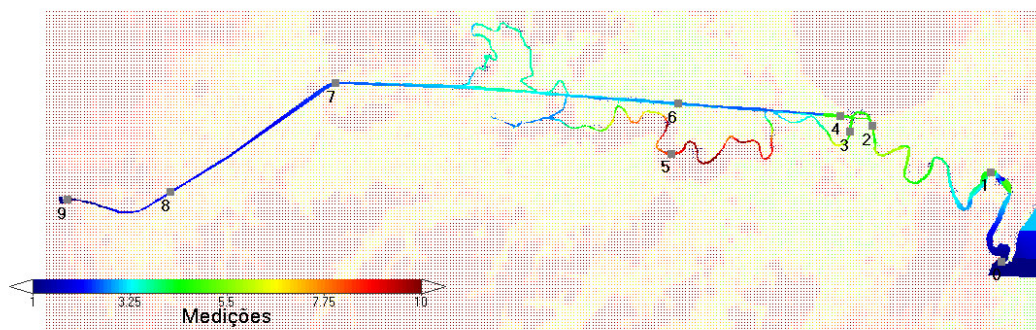


Figura 14: Imagem das informações lamina de agua medida.

Fonte: Elaborado pelo Autor utilizando o MOHID.

O cruzamento entre os Planos de Informações Altimétricos (figura 15) X Batimétricos medidos, gerou o plano de informação da figura 16, que representa a declividade esperada do rio.

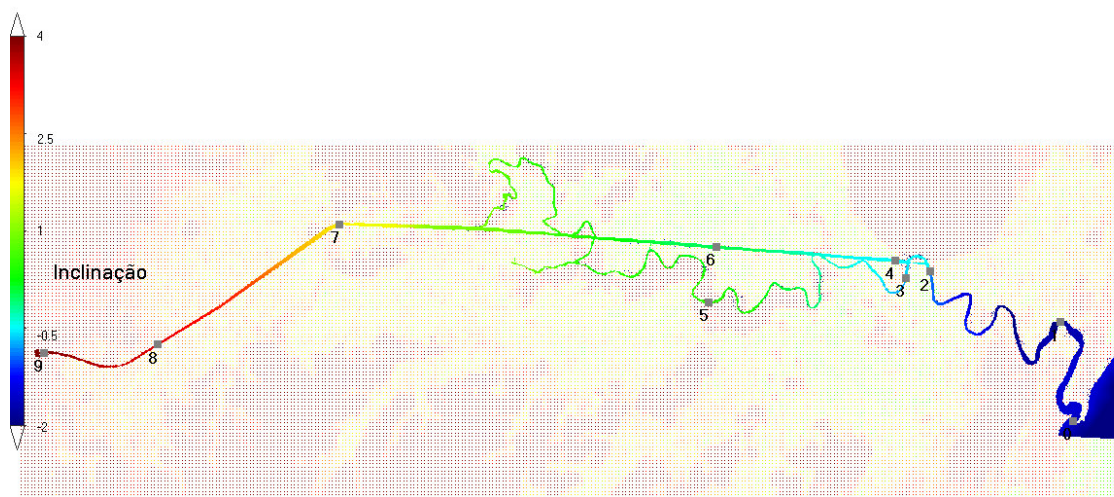


Figura 15: Plano de informação que representa a inclinação do Rio.

Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software MOHID.

O plano de informação da figura 16 foi elaborado a partir dos dados medidos X altimétricos, ajustados pelo plano de informação Inclinação figura 15.

Detalhe do grid e discretização do terreno é demonstrado na figura 17.



Figura 16: Terreno digital criado no MOHID.
 Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software MOHID.



Figura 17: Detalhe do terreno digital criado no MOHID.
 Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software MOHID.

A escala a esquerda representa a profundidade e os números ao longo do curso do rio, as estações criadas. Este plano de informação foi utilizando como terreno digital no módulo GUI do MOHID, ajuste ao nível de referente para corroborar com a batimetria pode ser feito no arquivo do marégrafo, incrementando a altura de maré que você quiser.

A criação de um modelo digital para o terreno serve de *Grid* batimétrico para nosso modelo de entrada de dados

6.6.2 Altimétricos

Os resultados Altimétrico obtidos podem ser observados na figura 18 e no gráfico 14, onde é possível perceber que a avaliação dos valores altimétricos compreendidos até 10m representam cerca de 50% da área de estudo.

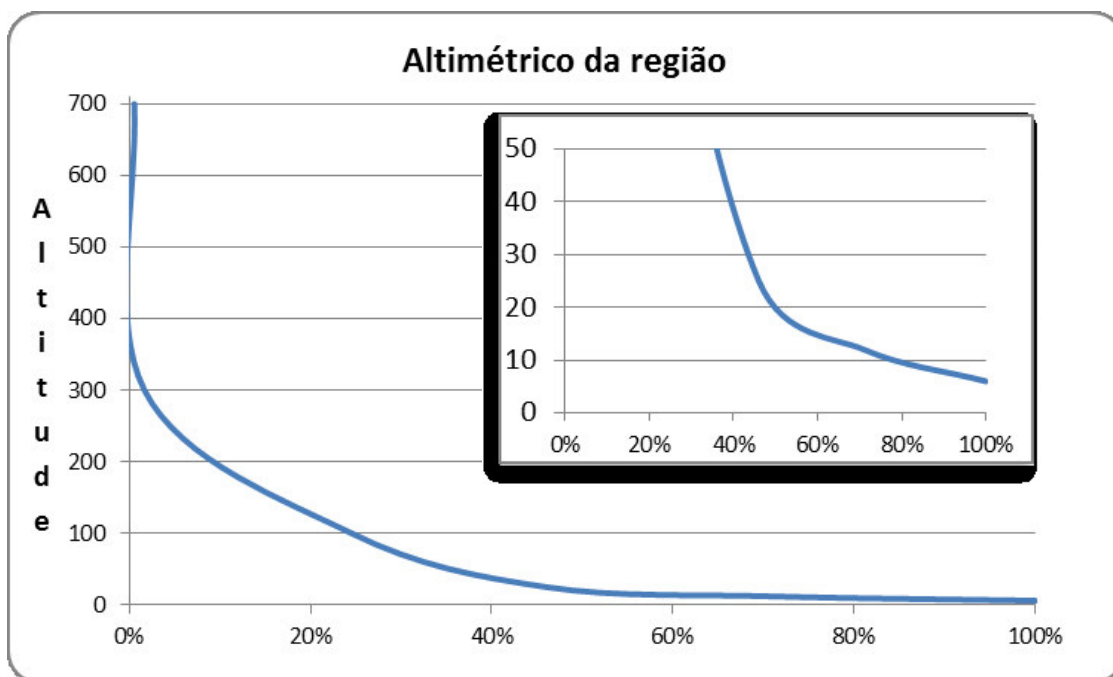


Gráfico 14: Curva hipsométrica da região.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Utilizando o Spring foi possível elaborar a figura 18, mapa que limita o corpo hídrico, possibilitando ter uma visão geral de toda área de interesse.

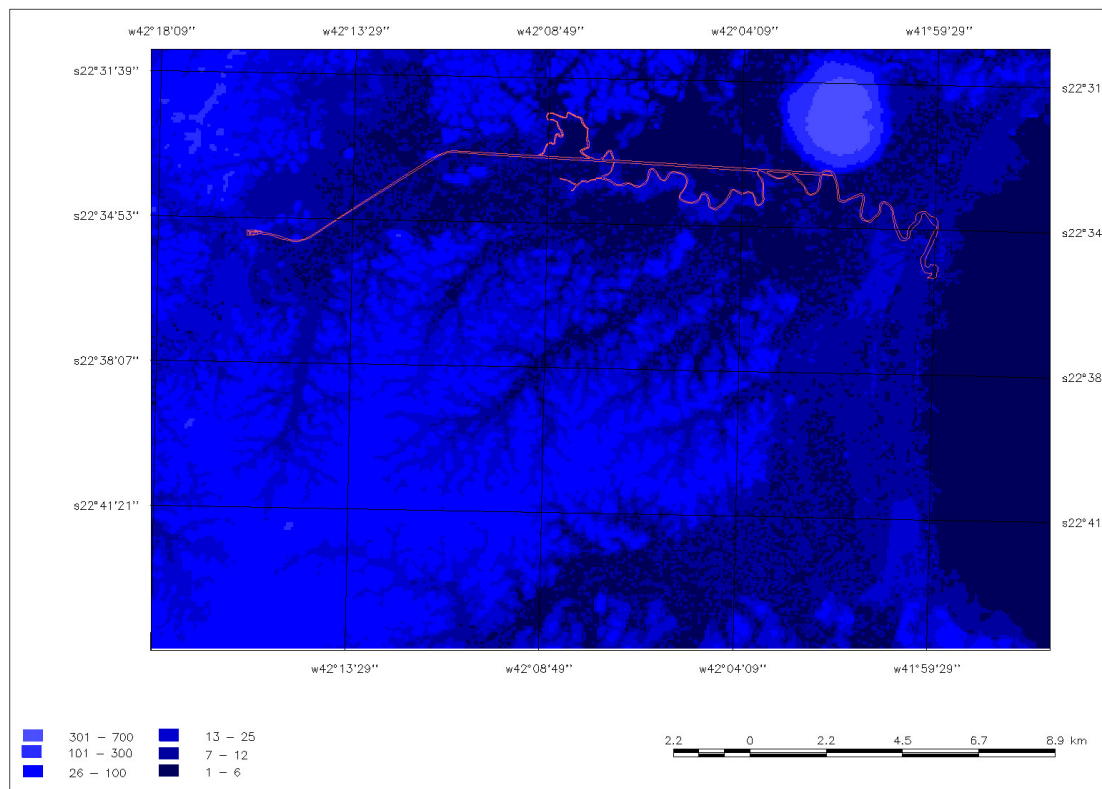


Figura 18: Mapa da região de interesse.

Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software Springs.

O mapa da figura 18 foi o plano de informação utilizado para a construção do terreno digital no Mohid.

6.6.2 Marés

O local de interesse não dispõe de dados históricos de maré, apesar de em 2008 um projeto voltado para a medição da variação da maré na região ter sido implantado. Infelizmente, estes dados não foram consolidados e não foram obtidos.

Existem estações oceanográficas localizadas em duas cidades próximas a região de interesse, Macaé e Arraial do Cabo, que dispõem de dados de previsão de marés através da tábua de marés, que são modelos astronômicos de previsão oceanográfica (GODOY, 2009). Para ambas, foram colhidos dados de 01 de janeiro de 2009 e 30 de julho de 2010. O resumo destes dados é mostrado na Tabela 3.

Avaliação mensal das marés										
Mês	Forno				Imbetiba				Amplitude	
	Mínimo	Médio	Máxima	Desvio	Mínimo	Médio	Máxima	Desvio	Forno	Imbetiba
jan/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.1	0.7	1.3	0.4	1.4	1.4
fev/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.2	0.7	1.4	0.5	1.4	1.6
mar/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.1	0.7	1.4	0.5	1.4	1.5
abr/09	0.0	0.7	1.3	0.4	0.1	0.8	1.5	0.4	1.3	1.4
mai/09	0.0	0.7	1.2	0.4	0.2	0.9	1.5	0.4	1.2	1.3
jun/09	-0.1	0.7	1.2	0.4	0.1	0.9	1.5	0.4	1.3	1.4
jul/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.1	0.8	1.4	0.4	1.4	1.5
ago/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.2	0.7	1.4	0.4	1.4	1.6
set/09	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.2	0.6	1.3	0.5	1.4	1.5
out/09	0.0	0.7	1.3	0.4	-0.1	0.6	1.2	0.4	1.3	1.3
nov/09	0.1	0.7	1.3	0.4	0.0	0.6	1.2	0.4	1.2	1.2
dez/09	-0.1	0.7	1.2	0.4	-0.1	0.7	1.3	0.4	1.3	1.4
jan/10	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.2	0.7	1.4	0.5	1.4	1.6
fev/10	-0.1	0.7	1.3	0.4	-0.2	0.7	1.4	0.4	1.4	1.6
mar/10	0.0	0.7	1.3	0.4	-0.1	0.7	1.5	0.5	1.3	1.6
abr/10	0.1	0.7	1.3	0.4	0.1	0.8	1.5	0.4	1.2	1.4
mai/10	0.0	0.7	1.2	0.4	0.2	0.9	1.4	0.4	1.2	1.2
jun/10	0.0	0.7	1.2	0.4	0.2	0.9	1.5	0.4	1.2	1.3

Tabela 3: Valores paramétricos para as variações de maré nos portos de Imbetiba e Forno.

Fonte: Tábua de mares DHN.

Como se verifica acima, as variações mensais têm comportamentos muito semelhantes. Inclusive, entre os portos, os dados são muito bem correlacionados, conforme pode ser visto no quadro 02. Esse fato pode garantir a existência de uma equação, que, a partir de seus dados, possibilite predizer o esperado para a outra estação.

Dados entre as estações	
Pearson	0.97
Mínimos quadrados	
F = 0.854I + 0.047	
Onde	
F	Forno
I	Imbetiba

Quadro 02: Correlação e regressão dos dados entre as estações do Forno e Imbetiba.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de maré seguem os períodos lunares, apresentando variações significativas para estes períodos. Dentre todo o período avaliado, separamos dois meses como representativo para o estudo: março e fevereiro de 2010, cujos dados são apresentados os gráficos 12 e 13.



Gráfico 15: Variação da maré no porto de Imbetiba durante os meses de fev e mar de 2010.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

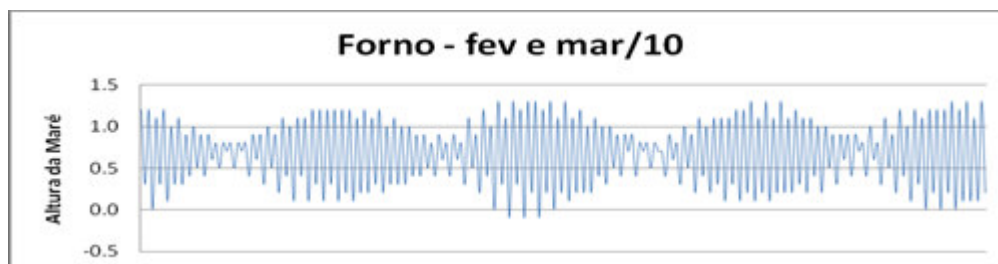


Gráfico 16: Variação da maré no porto do Forno durante os meses de fev e mar de 2010.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os gráficos acima demonstram muito bem o comportamento periódico das marés, seguindo o comportamento das fases da lua.

O gráfico 15 mostra o intervalo entre os picos de marés. Podemos perceber que a periodicidade agora não segue os períodos de quartos lunares, e sim os períodos de máxima e mínima proximidade lunar, lua cheia e lua nova.

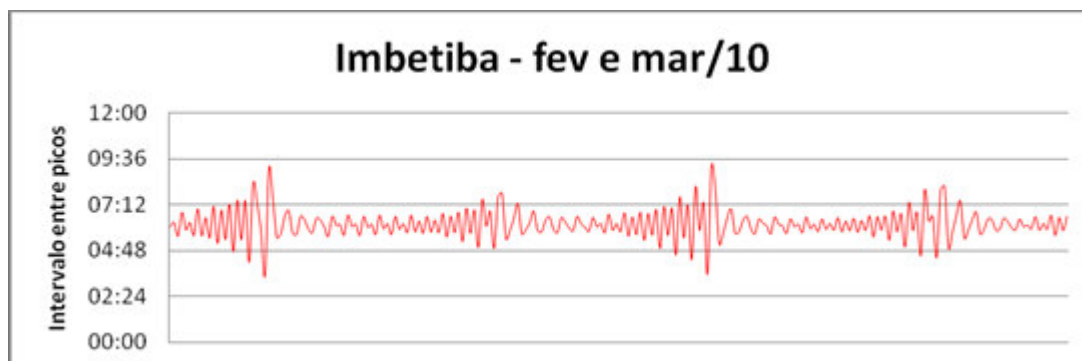


Gráfico 17: Variação da duração das marés no porto de Imbetiba durante os meses de fev e mar de 2010.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outro fator importante, observando os dados, é que existe uma diferença horária entre os períodos picos de maré (considerando picos os pontos de máxima e mínima), em torno de 00:14 h, de Imbetiba para o Forno (diferença de fase). Este resultado pode ser relativo à diferença de longitude, já que as estações tem cerca de 25' de diferença.

Esta diferença também pode ser devida ao método utilizado, pois cada estação é operada por instituições diferentes: a de Imbetiba pelo IBGE e a do Forno pelo IEAPM.

Esta diferença temporal não será avaliada neste estudo, pois não foram consideradas significativas, uma vez que a amplitude entre os valores é bem similar, cujo parâmetro periódico de maior relevância é a amplitude.

Um ajuste importante que foi proposto para a modelagem é a alteração do nível de referência, feito no arquivo do marégrafo. Visto que com a alteração desta informação é possível simular diversas condições de nível de água na calha do rio.

6.7 CONCLUSÕES

Do ponto de vista dos dados de entrada, para o processo de modelagem matemática estas informações são necessárias para a estruturação do modelo (MOHID, 2011), no módulo GUI do MOHID, para a criação das simulações. As nossas simulações são focadas na solução hidrodinâmica, para o objeto de estudo e teste das condições de fronteiras, que são o objetivo do estudo, a intrusão salina no baixo curso do rio São João.

Outros fatores também tem que ser levados em consideração, tais como regime de chuva e vento, assim como a ocupação/característica do solo ao longo do corpo hídrico. Porém, estas informações não serão utilizadas neste estudo.

6.8 BIBLIOGRAFIA

AMARAL, J. K.; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, J. P. S. 2004. Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para gerenciamento integrado de recursos hídricos ENIEF 2004. *In: Mecânica Computacional Vol. XXIII*, G. Buscaglia, E. Dari, O. Zamonsky (Eds.) Bariloche, Argentina, Novembro 2004 pp. 1167-1185.

BRONAUT, R. P. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Avaliação do uso de imagens CBERS- 2/CCD na identificação e monitoramento das áreas de preservação permanente ao longo dos corpos hídricos. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 799 – 806.

BERTOLOTO, M. A.; MELLO, A. J. H. Uso de técnicas de geoprocessamento para avaliação de áreas com classes de declive que permita tráfego de colheita mecânica na região de Eloi Mendes-MG. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 2323 – 2329.

GODOY, Fabio Bertini, Modelagem Hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. 2009 Dissertação de Msc. Universidade Federal de Santa Cararina/UFSC. Florianópolis, SC, Brasil

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. (Brasil). Introdução ao SPRING – versão 5. São Jose dos Campos/SP – 2008.

LIMA, E. B. Problemas inversos em modelos de qualidade de água de rios e estuários. 2009. Tese de Dsc. (exame oral). Instituto Politécnico/ UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

MACHADO, M. B. 2006. Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios. Tese de Dsc. Unicamp, Campina, SP, Brasil.

MACUIANE, M. A. 2003. Intrusão salina no estuário do rio Incomáti. Trabalho de conclusão de curso em licenciatura em Física. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo, Moçambique.

MEDEIROS, A. D., 2003 Influencia da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. KJERFVE, B. 2002 Princípios da Oceanografia de Estuários. EDUSP. 414p.

PAULA, F.C.F.; OVALLE, A.R.C.; BERNARDES, M.C.; MEDEIROS, P.R.P.; PEDROSA, P.; SOUZA, W.F.L.; LACERDA, L.D. Estratificação da coluna d'água e penetração da cunha salina no estuário do rio de Contas, ao longo de um ciclo de maré de sizígia. *In: XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar - XII COLACMAR* Florianópolis, 15 a 19 de abril de 2007.

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

Acessado 10/10/2011

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

7 ARTIGO CIENTIFICO: MODELO DO BAIXO CURSO DO RIO SÃO JOÃO, COM FOCO NA INTRUSÃO SALINA, POR UM PERÍODO DE 24H EM MARÉ DE SIZIGIA

Gabriel Lima de Souza ¹
Jader Lugon Jr. ²
Haydda Manolla Chaves da Hora ³
Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues ⁴

¹. INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / NUPERN – Mestrando em Engenharia Ambiental.

². INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / *Campus Macaé* / NUPERN – Prof. Dr. em Modelagem Computacional. Mestre em Modelagem computacional.

³. INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE / *Campus Macaé* / NUPERN – Graduanda em Engenharia de Controle e Automação Industrial. Bolsista de Iniciação Científica CNPq/PIBIC.

⁴. UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO / *Instituto Politécnico* / IPRJ – Prof. Ph. D. Oceanografia. Mestre em Geoquímica.

7.1 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.

7.2 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.

7.3 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 possível realizar prognósticos e relacionar causa e efeito de alguns impactos ambientais (MEDEIROS, 2003) é também servir de ferramenta para a gestão ambiental (LIMA, 2010), a legislação brasileira define a necessidade de gestão tais ações (SERLA et al, 2001; ANA, 2009).

As informações de entrada do modelo hidrodinâmico devem ser o mais precisas possíveis, visando minimizar os erros relativos a escalas e variações geométricas. O programa proposto para ser utilizado é o MOHID, que é um software livre fornecido pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, que, dentre outros, tem dois grandes módulos, o GIS e o GUI. O tratamento adequado das informações é dado de entrada para estes módulos.

Os resultados obtidos são da simulação de um período de 24 horas em um período de maré de sizígia, 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.

7.4 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 inclusão de cunha salina no rio Macaé, utilizando dados pretéritos de Rosman (2002) fazendo uso do Software de modelagem SisBahia e Medeiros (2003), que avaliou o quanto à batimetria (topografia do leito do rio) e a influencia da inclusão de cunha salina - Macuiane (2003), que avaliou o impacto que era a intrusão salina no rio Incomáti em Moçambique e como tal intrusão, afetava toda a população que margeia este rio e dificultava a atividade agrícola da região, em uma região que demanda de alimentos (o impacto social na população de entorno), Alegria (2006) que avaliou a dispersão de poluentes em um trecho do rio Caxipó (MT), onde esgoto doméstico é despejado quase sem nenhum ou sem nenhum tratamento e para tanto criou um programa em ambiente MATHLAB, Sarmiento (1997) que no métodos de modelagem matemática procurou determinar a capacidade de assimilação dos corpos d'água para efluentes domésticos e industriais, no 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 garantindo assim os reais potenciais de pressão hidrostática atuantes nesse corpo hídrico, e associando esta técnica ao software de modelagem MOHID (também utilizado neste trabalho) foi capaz de realizar o balanço hídrico do objeto de estudo, para tanto utilizou a técnica da Curva Número.

7.5 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem matemática é o conceito de procurar escrever com o rigor matemático fenômenos da natureza, prescrevendo comportamentos possíveis dentro de uma determinada condição de contorno. Isto pode ser feito de maneira determinística ou estocástica (ZAMBRONI DE SOUZA, 2008), e ainda de uma forma bem recente por meio de problemas inversos (LIMA, 2009).

Na modelagem ambiental, em geral, quando tratamos de modelos hidrológicos (ROSMAN, 2011; MOHID, 2011) consideramos os fluxos de fluidos newtonianos, e variamos as características do fluido de acordo com a aplicação para esta adequação de parâmetros em geral variamos a viscosidade, densidade e temperatura e que são as variáveis que maior relevância tem para os fluidos Newtonianos.

O método de Volumes Finitos é bem similar ao método das Diferenças Finitas, isso porque, em vários casos, as equações discretizadas obtidas por ambos os métodos são semelhantes. Entretanto, os dois métodos têm bases de formulação diferentes. O método de Diferenças Finitas tem uma dedução puramente matemática, por aproximações de derivadas usando séries de Taylor, a formulação do método de Volumes Finitos tem base física, pela observação dos fenômenos e proposição das equações a partir de fenômenos conhecidos (MACHADO, 2006).

De posse das informações a respeito da região bem tratadas, é possível elaborar cenários para avaliar a intrusão salina no estuário do rio São João, e como é o comportamento dos parâmetros hidrológicos do rio.

Utilizando o Spring foi possível elaborar a figura 19, mapa que limita o corpo hídrico, é possível ter uma visão geral de toda área de interesse.

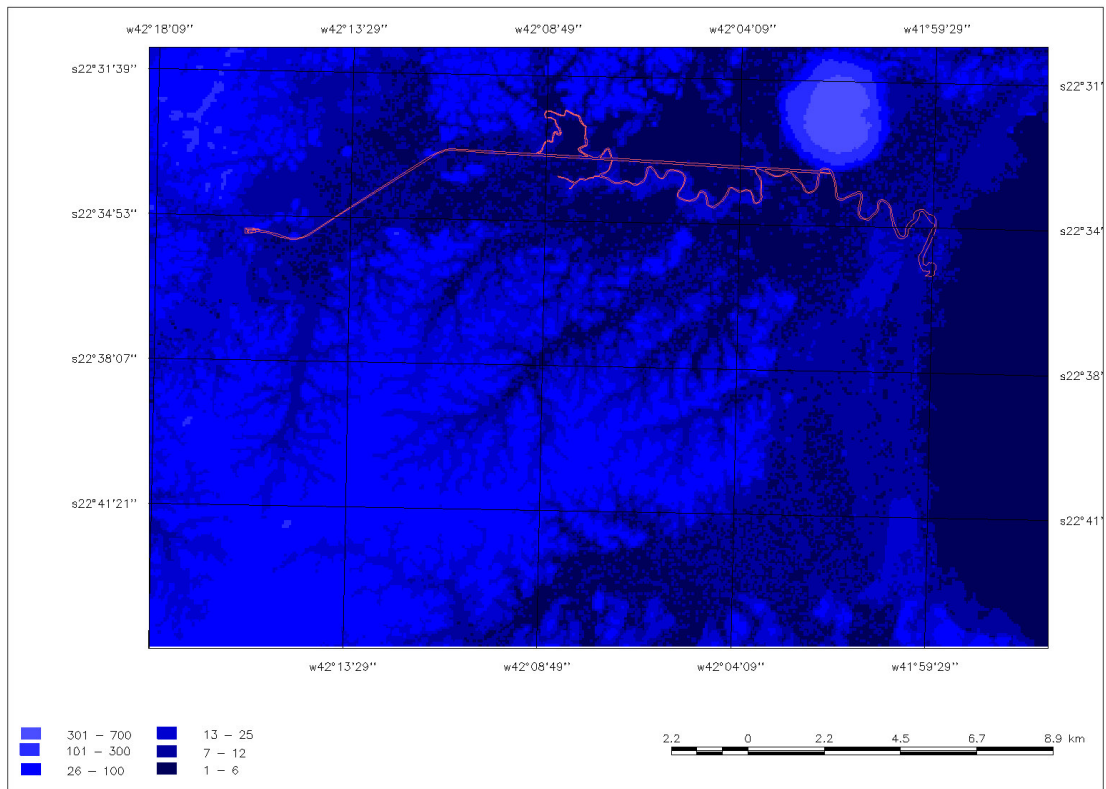


Figura 19: Mapa da região de interesse.
Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software Springs.

O gráfico 18, representa a característica hipsométrica da região.

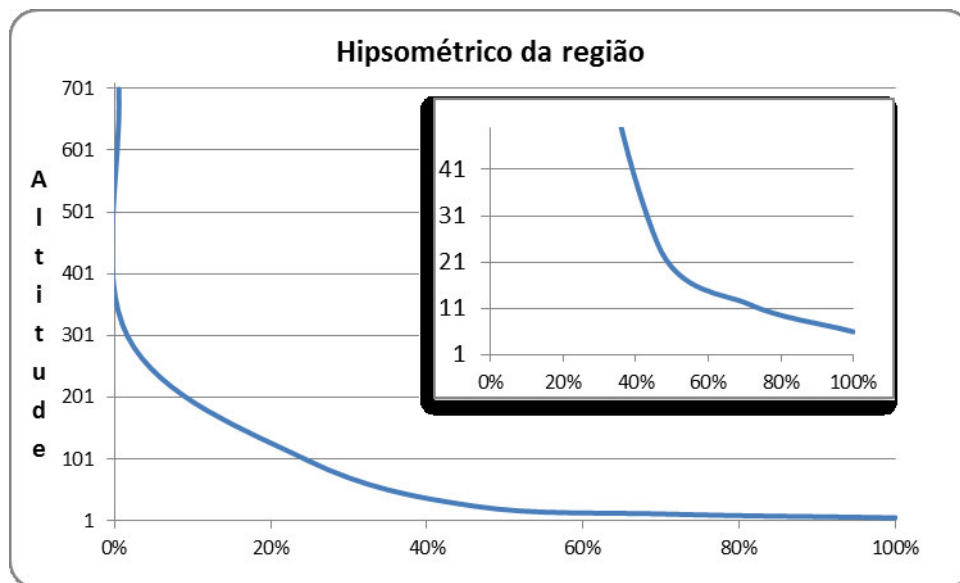


Gráfico 18: Curva hipsométrica da região.
Fonte: Elaborado pelo Auto.

Deste gráfico é possível verificar que cerca de 50% da região encontra-se abaixo de 10m de altitude.

O conhecimento prévio da área de estudo é de elevada importância para a criação de mapas (ANDRADE, 2007) e este conceito pode ser estendido para modelagem matemática.

7.5.1 Mohid GIS

Com o cruzamento dos planos de informação Batimétrico e Altimétrico (e mais algumas interpolações) foi possível à criação do terreno digital da figura 20.

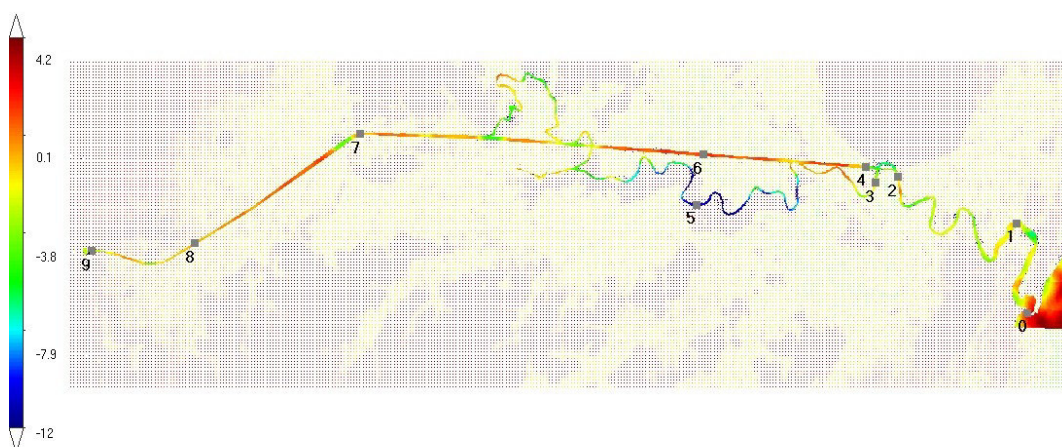


Figura 20: Terreno digital criado no MOHID.
Fonte: Elaborado pelo Autor, com o software MOHID.

A escala a esquerda é a profundidade e os números ao longo do curso do rio são as estações criadas.

A criação de um modelo digital para o terreno serve de *Grid* batimétrico para nosso modelo de entrada de dados

7.5.2 Mohid GUI

Como foi verificado ao longo do trabalho houve esforço elevado para cercar todas as possibilidades de cenário, as informações sociais, relevância das políticas públicas expectativas de desenvolvimento, grau e regime de ocupação do solo, informações quando ao comportamento pluviométrico e regime de ventos da região, associado a um refinado trabalho de caracterização da área de interesse, o baixo São João (BIDEGAIN, 2006) é uma região que já sofreu modificações, os cenários propostos tem o objetivo de avaliar as ações no cenário atual, os cenários propostos para a região os apresentados no quadro 03, não são todos os cenários possíveis para a

região, porém são os cenários que são possíveis de avaliação por um modelo hidrológico.

Codigo	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 as margens.	1.1. Serviços sugro-alcooleiro; 1.2. Políticas de desenvolvimento local; 1.3. Livre iniciativa como estratégia de contornar as dificuldades estatais; 2.1. descarte de defensivos agrícolas.
A3	Aquicultura	1. Uso das águas para proposta de aquicultura; 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 especializadas 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 carreamento de sedimentos para o rio; 2. Lixiviação do solo.	1.1 áreas desnudas; 2.2 matéria orgânica despejada diretamente no solo

Quadro 03: Cenários possíveis de avaliação hidrológica.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

7.6 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 acima foi proposta a simulação do cenário A1, pois para a avaliação dos demais cenários é necessário maior refino do modelo (trabalho futuro) e também os cenários acima o cenário A1 dá conta de responder o principal

questionamento proposto por este trabalho que é a avaliação da salinidade para propor alternativas de manejo do recurso ambiental baseado neste parâmetro, como é o caso de aquinocultura, que pode ser alternativa de ocupação e renda da região.

Com a simulação da vazão em 100m³/s, foram obtidos os valores do quadro 04, onde é possível verificar que em ciclo de sizígia a intrusão salina no estuário intensa, comprometendo até 50% do rio (baixo São João) com traços salinos.

Os grifos vermelho e amarelo são relativos aos valores limites encontrados.

	Quadro Resumo			Salinidade	
	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Estação 0	0.273	0.021	0.140	30.84	22.01
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

Quadro 04: Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão máxima.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A comparação com a maré modelada de nosso marégrafo apresentou os seguintes resultados quando comparado entre as estações. Os gráficos 19, 20 e 21, resumem as informações.

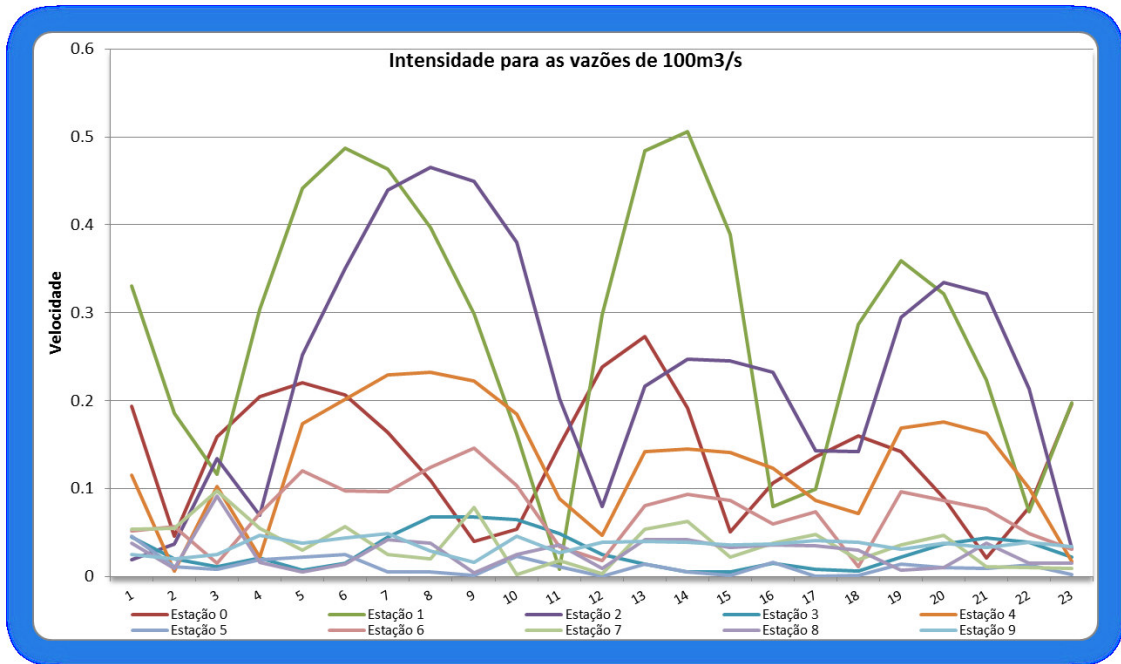


Gráfico 19: Velocidade em função do tempo

Fonte: Elaborado pelo Autor.



Gráfico 20: Resultados dos valores máximos de velocidade em m/s por estações
Fonte: Elaborado pelo Autor.



Gráfico 21: Concentração salina nas estações, em PSU.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A avaliação de fluxo de 30m³/s é relativa a um cenário de capacidade hídrica reduzida, em tal situação teríamos os resultados constantes no quadro 04, em que podemos perceber a considerável elevação dos níveis de concentração salina nas estações, entretanto não foi observado avanço da salinidade, fato corrobora com os resultados, pois uma menor vazão esta associada somente dissolução do sal na coluna de água, e não com o potencial de avanço da mesma. O quadro 04 resume as principais variações do cenário.

	Quadro Resumo Velocidade			Cota do Fundo nas <i>Time Series</i>	Salinidade	
	Máxima	Mínima	Média		Máxima	Mínima
Estação 0	0.185	0.004	0.107	-1.590	33.44	24.16
Estação 1	0.332	0.011	0.172	-2.000	29.31	18.25
Estação 2	0.287	0.005	0.134	-0.839	26.79	16.87
Estação 3	0.048	0.002	0.021	-0.707	28.34	19.38
Estação 4	0.135	0.013	0.074	-0.484	25.87	18.44
Estação 5	0.039	0.0004	0.009	0.500	29.17	18.30
Estação 6	0.076	0.003	0.042	0.000	22.87	13.35
Estação 7	0.083	0.002	0.023	1.845	5.58	0.00
Estação 8	0.081	0.006	0.027	3.420	0.00	0.00
Estação 9	0.050	0.017	0.035	3.992	0.00	0.00

Quadro 05: Quadro resumo da simulação do cenário A1 em situação de sizígia com vazão menor.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os gráficos 22, 23 e 24, traduzem o comportamento do corpo hídrico, dada as variações das condições impostas pelo cenário.

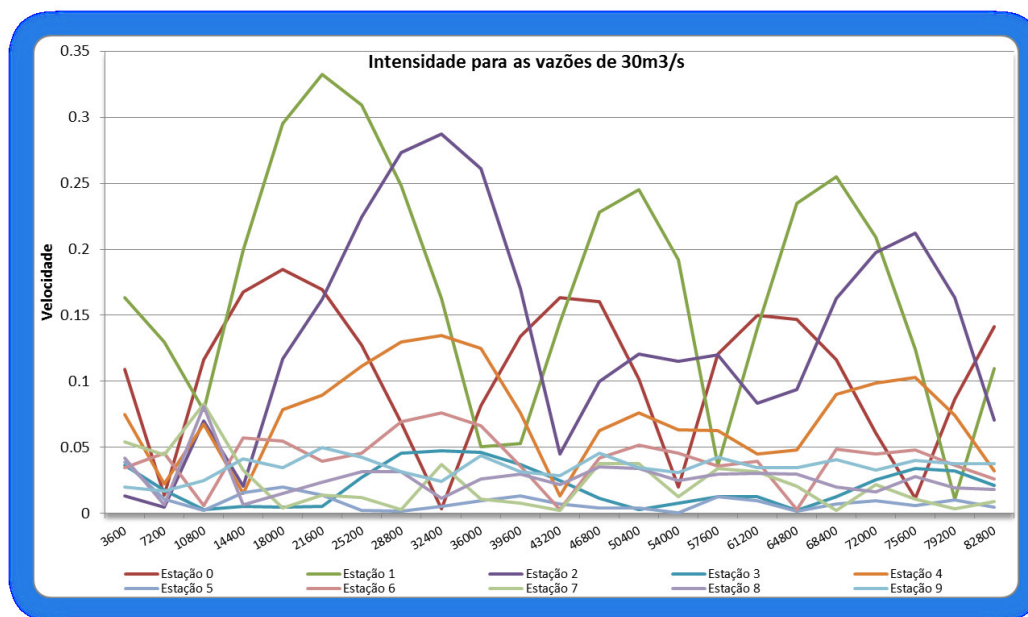


Gráfico 22: Velocidade em função do tempo, em m/s.

Fonte: Elaborado pelo Autor.



Gráfico 23: Resultados dos valores máximos por estações, em m/s.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

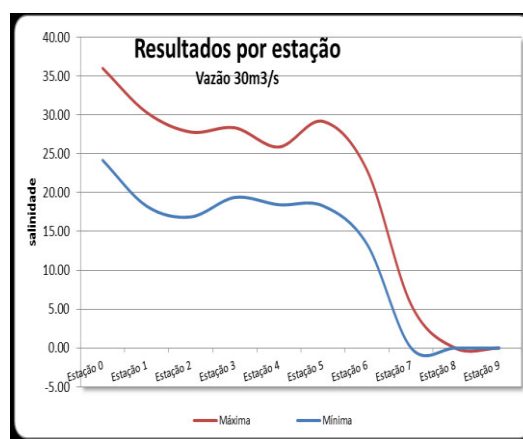


Gráfico 24: Concentração salina nas estações, em PSU.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os resultados foram obtidos das rodadas no sistema MOHID, verificando a coerência dos resultados de velocidade nas estações ao longo do rio. Não foram estudados os aspectos relativos à correlação entre os dados de condutividade medida nas campanhas de campo e os valores de salinidades obtidos. O gráfico 25 mostra uma referencia a condutividade medida no campo, durante a segunda campanha de tomada de dados no campo.

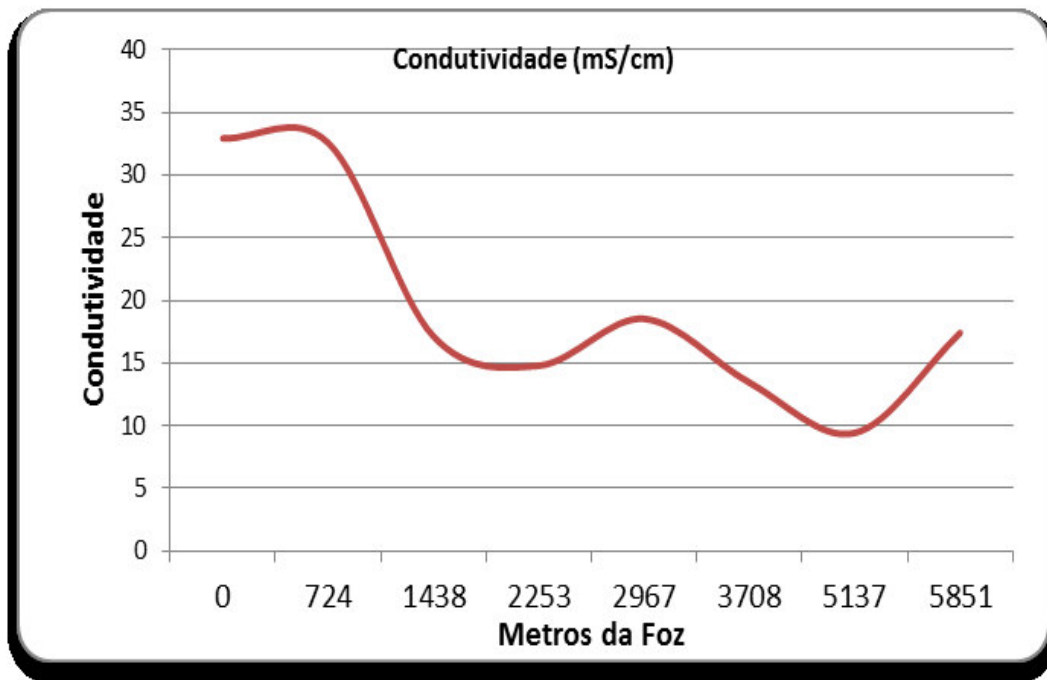


Gráfico 25: Condutividade em função da distancia da Foz.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como a concentração de sais alteram o PH de substâncias aquosas tornando-a mais condutiva, sendo assim a condutividade é um bom parâmetro para análise, entretanto por ser um sistema de elevada pressões antrópicas a concentração de sais de origem marinha não deve ser considerada a única substancia presente, ou seja, outros sais e/ou outras substâncias podem estar atuando na condutividade das águas, portanto não foram utilizadas.

As simulações tiveram o mesmo *timing* do marégrafo, simulando situação de sizígia (situação de maior amplitude de maré), o gráfico 23 exprime o comportamento do marégrafo utilizado.



Gráfico 26: Comportamento da maré proposta pelo maregrafo utilizado.
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Comparando o gráfico 23 com os gráficos 23 ou 20 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 estófo de maré. O importante na avaliação do gráfico é a amplitude da mesma.

7.7 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 baixa velocidade neste trecho desenvolvidas, associada a baixa altitude deste do sistema como um todo. Mesmo que fosse o aspecto social e ambiental fosse de sobre maneira relevante, a volta do rio ao curso original, não garantiria a este grandes variações dos seus parâmetros originais, uma vez que os impactos já se acumularam no sistema comprometendo talvez sua capacidade de resiliência. Tal afirmação não pode ser feita com total segurança com as informações disponíveis até o momento.

7.8 BIBLIOGRAFIA

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. 2000. Estuários – Critérios para uma classificação ambiental. Revista Brasileira de Recursos Hídricos V. 5, p. 25 – 35.

CUNHA, Sandra Batista. Impactos Ambientais das Obras de Engenharia sobre o ambiente biofísico da bacia do Rio São João.1994. UFRJ, Prefeitura de Silva Jardim;

FIGUEIREDO, Nélia Maria Almeida de. Método e metodologia na pesquisa científica. Rio de Janeiro: Yendis, 2010 3ªed. 237p.

GODOY, Fabio Bertini, Modelagem Hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. 2009 Dissertação de Msc. 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 de Dsc. Unicamp, Campina, SP, Brasil.

MACUIANE, M. A. 2003. Intrusão salina no estuário do rio Incomáti. Trabalho de conclusão de curso em licenciatura em Física. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo, Moçambique.

MEDEIROS, A. D., 2003 Influencia da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. KJERFVE, B. 2002 Princípios da Oceanografia de Estuários. EDUSP. 414p.

PEREIRA FLHO, J.; SPILLEERE, L. C.; SCHETTINI, C. A. F. 2003. Dinâmica de nutrientes na região portuária do estuário do rio Itajaí-Açu, SC. Atlântica, Rio Grande, p. 11 – 20.

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 Acessado 10/10/2011

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações Edgard Blucher, 1998.

SANTIAGO, M. F.; PASSAVANTE, J. Z. de O.; SILVA-CUNHA, M. da G. G. da ; NEUMANN-LEITAO, S.; Pena, O. M. de L. 3; Nunes, A. A. 2005. Estuário do rio Pisa Sal (Galinhas, Rio Grande do Norte, Brasil): análise multivariada na perspectiva ecológica para a distribuição nictemeral da biomassa microfitoplanctônica. II Congresso brasileiro de Oceanografia, 9 a 12 de outubro, 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:* 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, setembro de 1997, Foz do Iguaçu, 2044 – 2052p.

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 Ambiental⁵. 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.

8. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A modelagem matemática como instrumento de gestão de Ambiental (LIMA, 2010) é uma prática muito difundida, e tem se mostrado cada vez mais eficiente para estudo de cenários que auxiliam na tomada de decisão. Como ferramenta, de proposta de sustentabilidade, ao trabalho coube a de pesquisar os cenários possíveis de forma a realizar prognósticos de maior interesse. É perfeitamente compreensível que um único trabalho não consiga mesmo de maneira holística perceber todos os cenários envolvidos, entretanto cada trabalho é capaz de ampliar o horizonte dos sistemas ambientais envolvidos. A ampliação dos horizontes dos sistemas ambientais serve para dar a nós esta percepção de funcionamento e toda nossa pesquisa serve para que o nosso impacto a estes sistemas já implantados sejam os mínimos viáveis.

Do cenário avaliado no trabalho, A1, é possível verificar que cerca de 11km 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 este associado à baixa velocidade desenvolvida neste trecho, associada a baixa altitude deste do sistema como um todo. Mesmo que o aspecto social e ambiental fosse de sobre maneira relevante, a volta do rio ao curso original, não garante a este grandes variações dos seus parâmetros originais, uma vez que os impactos já se acumularam no sistema comprometendo talvez sua capacidade de resiliência. Tal afirmação ainda não é definitiva, cabendo ainda mais estudos a cerca do assunto.

Como proposta de trabalhos futuros, são as elaborações dos demais cenários, tais como avaliação do spray marinho para a região, testar o tempo de residência no corpo hídrico (com a verificação do regime de ventos), vazão sanitária do mesmo (com estudo de tempo de residência) e testes de sensibilidade do modelo (avaliando o decaimento de um determinado contaminante).

A falta de pesquisa na região deixa a sociedade em estado de alerta quanto ao uso que se tem dado à água captada, pois como foi possível verificar nas informações do satélite, a existência de áreas agrícolas ao longo do corpo hídrico e é razoável acreditar que esta água seja utilizada na agricultura. Caso a água não apresente valores compatíveis com o uso destinado, pode-se ter um problema de saúde pública, devido à ingestão dos alimentos contaminados ou um problema

econômico, pois a área talvez não atinja a produtividade esperada em função da qualidade da água ser fator limitante, ainda o aspecto social, pois um potencial gerador de entretenimento e lazer não pode ser usufruído em sua totalidade. Isso reforça a premissa inicial do trabalho que afirmava de que um projeto nesta área não tem apenas dimensões ambientais, no sentido ecológico, mas além desta, sociais e econômicas conforme abaixo (semelhante à figura 01).

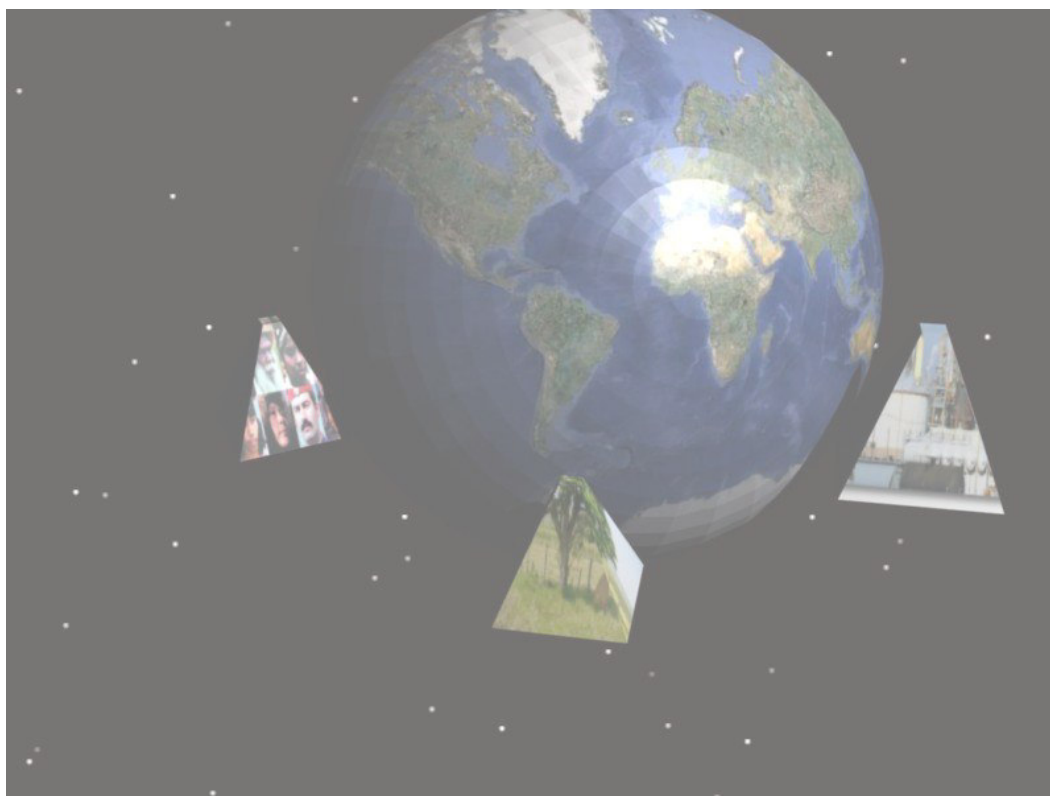


Figura 21: Atores de um projeto ambiental orbitando pelo ambiente.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto a proposta de estação/sistemática de verificação de qualidade da água para a região é de fundamental importância, mesmo porque a foz do corpo hídrico é uma região de adensamento populacional (2º maior do município de Casemiro de Abreu) região conhecida como Barra de São João.

No campo da modelagem, este é um dos primeiros trabalhos sobre a região e certamente uma revisão completa deste trabalho deve ser feita, de forma a consolidar os resultados verificados por ele e avançar um pouco mais na proposta de métodos alternativos para avaliação dos parâmetros hidrológicos deste corpo hídricos sejam eles estocásticos, determinísticos (por outros modeladores a exemplo de Medeiros (2003)) ou métodos indiretos (LIMA, 2009). Propostas de

refinamentos maiores (resolução), elaboração de um modelo de sensibilidade a derramamento de óleo (pois se trata de uma região costeira, petro-rentista), cenários de alagamentos da região provocados pelo rompimento/extra-vazão do reservatório de Juturnaiba, são propostas de trabalhos futuros a bem curto prazo.

Outro trabalho futuro é o teste de robustez do software MOHID, testando a capacidade de processamento e grau de incerteza dos modelos, com ensaios de cenários bem resolvidos de conhecido.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil); Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos; Superintendência de Gestão da Informação. Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos – Snirh no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica / Agência Nacional de Águas.-- Brasília: ANA, 2009.

AMARAL, J. K.; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, J. P. S. 2004. Estuário do rio Macaé: modelagem computacional como ferramenta para gerenciamento integrado de recursos hídricos ENIEF 2004. *In: Mecânica Computacional Vol. XXIII*, G.Buscaglia, E.Dari, O.Zamonsky (Eds.) Bariloche, Argentina, Novembro 2004 pp. 1167-1185.

ANDRADE, J. B.; BRITO SILVA, F., OLIVEIRA, R. A. Uso de imagens CBERS 2B na delimitação das áreas de ocupação dos solos no município de Tarso Fragoso – MA. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 721 – 727.

ANJOS, C. S.; EPIPHANIO J. C. N.; FONSECA, L. M. G.; Saturação radiométrica da banda 4 da CCD/CBERS-2. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 6307 – 6314.

BARBIERE, E.B. Spatial and Temporal Variation of Rainfall of the East Fluminense Coast and Atlantic. Serra do Mar, State of Rio de Janeiro. *In: NOPPERS, B., BIDONE, B. and ABRÃO, J.J. (ed) Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems of Rio de Janeiro, Brazil*. Niterói, Universidade Federal Fluminense, Série Geoquímica Ambiental, 6: 11-23, 1999.

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

BRONAUT, R. P. M.; PARANHOS FILHO, A. C. Avaliação do uso de imagens CBERS- 2/CCD na identificação e monitoramento das áreas de preservação permanente ao longo dos corpos hídricos. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 799 – 806.

BERTOLOTO, M. A.; MELLO, A. J. H. Uso de técnicas de geoprocessamento para avaliação de áreas com classes de declive que permita tráfego de colheita mecânica na região de Eloi Mendes-MG. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007, p. 2323 – 2329.

CABRAL, A. P.; GHERARDI, D. F. M.; BAPTISTA, E.; MUEHE, D.; NICOLODI, J. L.; CARVALHO, L. R. Cartas de sensibilidade ambiental à poluição por óleo: bacias de Sergipe-Alagoas e Pernambuco-Paraíba. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil 21 – 26 abril 2007*, p. 2323 – 2329.

CARDOSO DA SILVA. 2000. Estuários – Critérios para uma classificação ambiental. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos V. 5*, p. 25 – 35.

CUNHA, Sandra Batista. Impactos Ambientais das Obras de Engenharia sobre o ambiente biofísico da bacia do Rio São João. 1994. UFRJ, Prefeitura de Silva Jardim;

Dyer, K.R., 1986, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics, J.Wiley & Sons, U.K., 342 pp.

Eiger, S. “Modelos de Escoamentos Turbulentos”, *In: Silva, R.V. da (ed.), Métodos Numéricos em Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.*

FAUSTO, I. da. V.; FONTOURA, N. F.; WÜRDIG N. L. Recrutamento sazonal da pós-larva do camarão rosa, *farfanteppenaus-paulensis* no estuário de Tramandai, sul do Brasil, RS. *In: Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 23 a 28 de Setembro de 2007, Caxambu – MG.*

FERREIRA. A. H. F.; MINILLO A; MELLO SILVA L.; YUNES, J. A. 2004. Ocorrência de *Anabaena-spiroides* (cianobactéria) no estuário da lagoas do Patos (RS, Brasil) no verão-outono de 1998. *Atlântica, Rio Grande 26*. p. 17 – 26

FIGUEIREDO, Divino. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005. Disponível em http://72.14.205.104/search?q=cache:r9r3jyI5bKsJ:www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf+divino+figueiredo,+conceitod+basicos+sensoriamento+remoto&hl=pt-BR&ct=clnk&cd=1&gl=br Acesso em 20 de maio. 2010.

FIGUEIREDO, Nébia Maria Almeida de. Método e metodologia na pesquisa científica. Rio de Janeiro: Yendis, 2010 3^oed. 237p.

FIGUEIREDO, Thayse N.; ROSSETE, A. N. Análise do uso e cobertura da terra na microbacia hidrográfica do Córrego Capim Branco, Torixoréu-MT. *In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil 21 – 26 de abril 2007*, p. 5225 – 5231.

GODOY, Fabio Bertini, Modelagem Hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. 2009 Dissertação de Msc. 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.

INSTITUTO DE CIENCIAS DO MAR – LABOMAR (Ceará), Superintendência Estadual do Meio Ambiente, Secretaria da Ouvidoria-Geral e do Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Governo do Ceará. Caracterização Físico-Química dos Estuários do Ceará. Fortaleza: LABOMAR, 2005 30 p..

LIMA, E. B. Parameter estimation in model of estuarine hydrodynamic based on genetic algorithms *in*: 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil 15-20 novembro, 2009.

LIMA, E. B. Problemas inversos em modelos de qualidade de água de rios e estuários. 2009. Tese de Dsc. (exame oral). Instituto Politécnico/ UERJ, Nova Friburgo, RJ, Brasil.

MANKIW, N. Gregory. Macroeconomia. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MACHADO, M. B. 2006. Modelagem tridimensional da dispersão de poluentes em rios. Tese de Dsc. Unicamp, Campina, SP, Brasil.

MACUIANE, M. A. 2003. Intrusão salina no estuário do rio Incomáti. Trabalho de conclusão de curso em licenciatura em Física. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo, Moçambique.

MEDEIROS, A. D., 2003 Influencia da maré e da batimetria sobre a intrusão salina no estuário do rio Itajaí-Açu. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; FLORENZANO, G. T.; SOUZA, I. M. O uso de imagens CBERS no monitoramento do desflorestamento da Amazônia Brasileira, (2005) Disponível em <<
http://www.obt.inpe.br/cbers/cbers_XIISBSR/82_SBSR_CBERS_AMAZONIA.pdf>> acessado em 20/07/2010.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. KJERFVE, B. 2002 Princípios da Oceanografia de Estuários. EDUSP. 414p.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto, Princípios e Aplicações Edgard Blucher, 1998.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil), Plano Nacional de Recursos Hídricos. Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil . – V. 1, 2006.

PAULA, F.C.F.; OVALLE, A.R.C.; BERNARDES, M.C.; MEDEIROS, P.R.P.; PEDROSA, P.; SOUZA, W.F.L.; LACERDA, L.D. Estratificação da coluna d'água e penetração da cunha salina no estuário do rio de Contas, ao longo de um ciclo de maré de sizígia. *In*: XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar - XII COLACMAR Florianópolis, 15 a 19 de abril de 2007.

PEREIRA FLHO, J.; SPILLEERE, L. C.; SCHETTINI, C. A. F. 2003. Dinâmica de nutrientes na região portuária do estuário do rio Itajaí-Açu, SC. *Atlântica*, Rio Grande, p. 11 – 20.

PINHEIRO, Eduardo da Silva. Avaliação de Imagens Quickbird na Análise Geográfica de um Setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado - INPE. São José dos Campos, 2003. Disponível em www.obt.inpe.br/pgsere/Pinheiro-E-S-2003/publicacao.pdf. Acesso em: 10 de maio 2010.

PNUD, Relatório de Desenvolvimento Humano de 2010, Disponível em: <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010/chapters/pt/>. Acessado em 11/09/2011

PREFEITURA MUNICIPAL DE SILVA JARDIM. Histórico. Disponível em :http://www.silvajardim.rj.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=56. Acessado em 01/07/2010.

REINICK, J. F. Modelando personagens com o Blender 3D. São Paulo: Novatec, 2008. 265p.

ROSA, Adalberto José; CARVALHO, Renato de Souza, XAVIER, Jose Augusto Daniel. Engenharia de Reservatório de Petróleo. Rio de Janeiro. Interciencia, 2006. 808p

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 Acessado 10/10/2011

MACHADO, Jose Carlos V. Reologia e Escoamento de Fluidos. São Paulo. Interciencia , 2002. 257p.

RIBEIRO, J. P. N.; URBANETZ, C.; LIMA, M. I. S. Influencia do spray marinho e das características da água do estuário do rio Massaguaçu (Caraguatatuba, SP) sobre a vegetação adjacente. *In: Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil*, 23 a 28 de Setembro de 2007, Caxambu – MG.

SANTIAGO, M. F.; PASSAVANTE, J. Z. de O.; SILVA-CUNHA, M. da G. G. da ; NEUMANN-LEITAO, S.; Pena, O. M. de L. 3; Nunes, A. A. 2005. Estuário do rio Pisa Sal (Galinhas, Rio Grande do Norte, Brasil): análise multivariada na perspectiva ecológica para a distribuição nictemeral da biomassa microfitoplancônica. II Congresso brasileiro de Oceanografia, 9 a 12 de outubro, 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: 19o Congresso Brasileiro de*

Engenharia Sanitária e Ambiental, setembro de 1997, Foz do Iguaçu, 2044 – 2052p.

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

SERRA, R.;TERRA, D.; PONTES, C. Os municípios petro-rentistas fluminenses: gênese e ameaças. Revista Rio de Janeiro, n. 18-19, jan.-dez.2006, Rio de Janeiro RJ, 59 – 85p.

LUZ DA SILVA, Cristian; SOUZA-LIMA, Jose Edmilson. Políticas públicas e indicadores para o desenvolvimento sustentável. São Paulo, Saraiva, 2010. 177p.

VARGAS, R. V, Manual Prático do Plano do Projeto. 4ª Ed. São Paulo, SP: Brasport, 2009. 232p.

XAVIER DA SILVA, Jorge; ZAIDAN, Ricardo Tavares. Geoprocessamento & Análise Ambiental5. Ed.. Rio de Janeiro. Bertand Brasil, 2011. 363p.

YUNNE, João S. 2009. Floração de *Microcystis* na lagoa dos Patos e o seu estuário: 20 anos de estudo. O ecos. Bras. 12, 313 – 318 p.

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

ANEXO A : MODELOS MATEMÁTICOS E APLICAÇÃO DO MOHID AO SISTEMA EM ESTUDO

Modelos matemáticos e numéricos aplicados ao comportamento de rios e lagos.

O conhecimento das condições de contorno é fundamental para a proposição da metodologia e avaliação dos resultados. Dentre os fatores Geomorfológico e ambiental é importante salientar a condição de contato do estuário com a fronteira marinha (MIRANDA, 2002). Estes dados são importantes para o ajuste do modelo e determinação da classificação do estuário quanto à intrusão salina, pois conforme Pritchard e Cameron (1955) *apud* Macuiani (2003) os estuários podem ser de 4 tipos:

- Fiord: de elevada profundidade e elevada vazão fluvial, fator que garante pouca intrusão salina, salinidade pode ser encontrada em “reservatórios” próximos a foz;

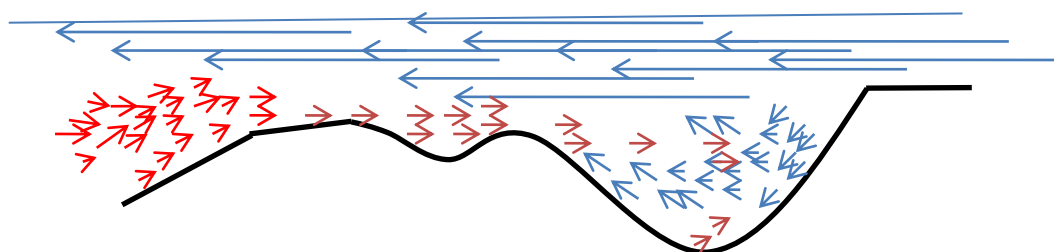


Figura 01: Tipo de intrusão salina – Fiord

Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Parcialmente misturado: ligeiramente estratificado, a salinidade aumenta do fundo até a superfície, neste tipo de estuário, segundo Dyer (1972) *apud* Macuiani (2003) é necessário uma pequena maré de mistura para que o estuário seja classificado deste tipo;

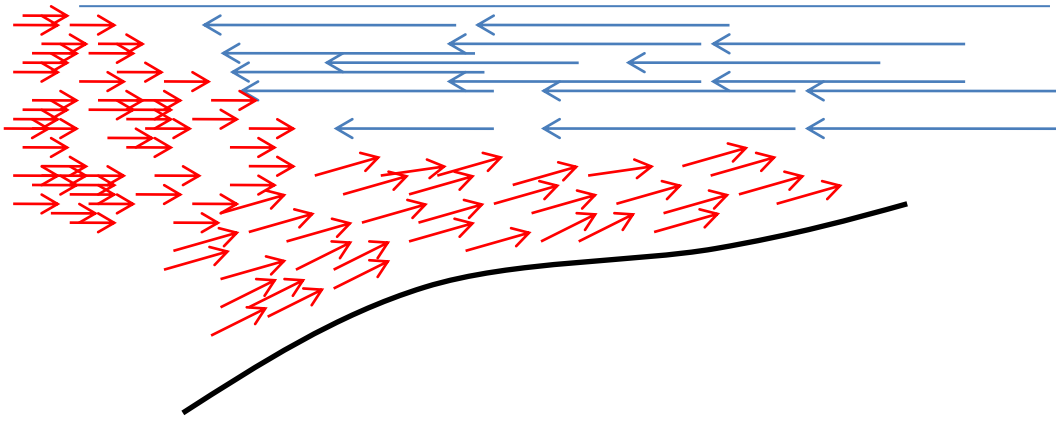


Figura 02: Tipo de intrusão salina – Parcialmente misturado.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Estuário bem misturado ou homogêneo: não existe variação visual da salinidade, existe uma fronteira bem definida da zona salina e doce;

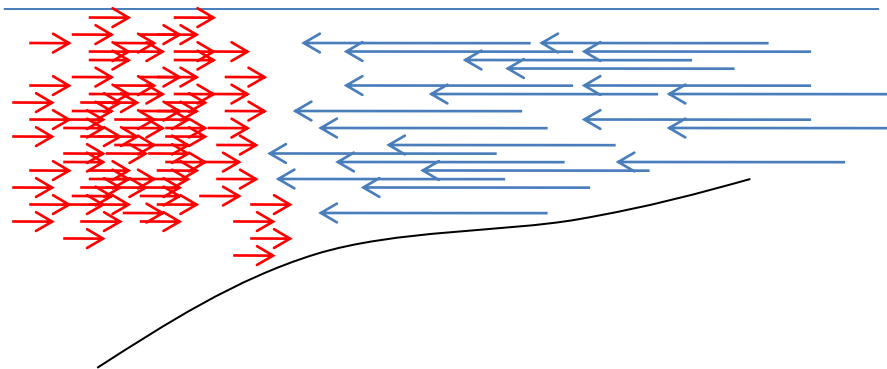


Figura 03: Tipo de intrusão salina – homogêneo.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Cunha Salina: onde o gradiente de salinidade é elevado, do fundo para a superfície, diferente do parcialmente misturado este tem como diferencial o gradiente de salinidade.

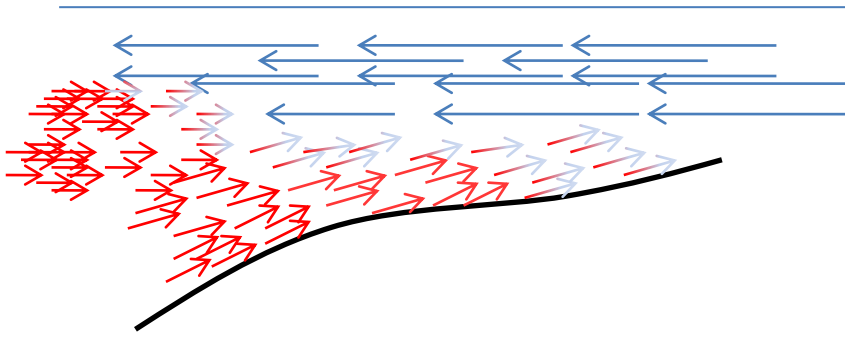


Figura 04: Tipo de intrusão salina – cunha salina.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A importância desta classificação está na determinação das condições de contorno das equações que irão reger o movimento da cunha ou frente salina.

Os dados de temperatura e pH, são importantes pois eles afetam as medições da salinidade, que é feita a partir da condutividade elétrica da água.

As equações hidrodinâmicas que governam o transporte de substâncias em rios e estuários são obtidas a partir da equação de Navier-Stokes (LIMA, 2009); (MIRANDA, 2006) que tem como princípio a conservação de massa, momento linear, energia e momento angular, e sua obtenção para transporte de sal em regime contínuo foi descrito por Paiva (1992) *apud* Medeiros (2006), em um sistema de coordenadas cartesianas

De um ponto de vista de elementos finitos as equações de continuidade para os eixos x e z podem ser descritas da forma (MEDEIROS, 2006).

$$\frac{\partial \bar{u}B}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}B}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Onde

B é a largura do estuário;
 u é a velocidade longitudinal;
 w velocidade vertical;
 x direção longitudinal;
 z cota do rio.

Conforme Medeiros (2006) a equação da quantidade de movimento na direção x pode ser descrita como:

$$\frac{\partial \bar{u}B}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}uB}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}wB}{\partial z} + gB \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} gB \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_z^0 \bar{\rho} dz \right) + k\bar{u}|\bar{u}| - \frac{\partial}{\partial x} \left(BA_H \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(BA_V \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

Quantidade de movimento.

Fonte: Medeiros, 2006.

Onde

B é a largura do estuário;
 u é a velocidade longitudinal;
 w velocidade vertical;
 x direção longitudinal;
 z cota do rio;
 t é o tempo;
 g aceleração da gravidade;
 ρ_0 densidade de referencia;

η elevação da superfície;
 k coeficiente de atrito do fundo e laterais;
 A_H coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal;
 A_V coeficiente de viscosidade turbulenta vertical.

E o transporte de sal, ao longo dos eixos x e z, pode ser descrito conforme apresentado na forma (MEDEIROS, 2006):

$$\frac{\partial \bar{s}B}{\partial t} + \frac{\partial \bar{s}uB}{\partial x} + \frac{\partial \bar{s}wB}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(BK_H \frac{\partial \bar{s}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(BK_V \frac{\partial \bar{s}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

Transporte de Sal.

Fonte: Medeiros, 2006.

Onde

B é a largura do estuário;
 u é a velocidade longitudinal;
 w velocidade vertical;
 x direção longitudinal;
 z cota do rio;

t é o tempo;
 s é a salinidade;
 K_H coeficiente de difusão turbulenta horizontal;
 K_V coeficiente de difusão turbulenta vertical.

Podemos observar que o transporte de sal nestas equações não leva em consideração o transporte na direção y ou seja na transversal do rio.

A equação de estado conforme Medeiros (2006) é:

$$\bar{\rho} = \rho_0 (\alpha + \beta s) \quad (4)$$

Equação de estado, para solução da densidade.

Fonte: Medeiros, 2006.

Onde

ρ_0 é a densidade de referencia;
 ρ é a densidade média;
 s é a salinidade;
 α e β coeficientes da equação de estado.

Neste ponto que as equações propostas por Medeiros (2006) divergem das utilizadas por Lima em 2009, pois Lima simplifica a equação de transporte levando em consideração que a viscosidade não varia e aproxima o coeficiente de difusão turbulenta K para:

$$K_x = A_x/\rho \quad K_z = A_z/\rho \quad (5)$$

Varição da Viscosidade.

Fonte: Medeiros, 2006.

Onde

ρ' é a densidade média;

K_x coeficiente de difusão turbulenta horizontal;

K_z coeficiente de difusão turbulenta vertical;

A_H coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal;

A_V coeficiente de viscosidade turbulenta vertical.

Esse fato que para Paiva (1992) *apud* Medeiros (2006), não apresenta muita alteração quando tratado para os valores ao longo do eixo x , longitudinal, entretanto para valores em z , verticais, estes não podem ser considerados constantes, pois o estuário apresenta estratificação vertical e tal fato afeta a tensão de cisalhamento em cada estrato, alterando assim o coeficiente de difusão K_v . Conforme Dyer (1997), *apud* Medeiros (2006) a relação que rege os coeficientes K_v e A_v é o número de Richardson (BLUMBERG, 1975 *apud* MEDEIROS, 2006).

$$R_i = \frac{-g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad (6)$$

Fonte: Medeiros, 2006 e Macuiani, 2003.

Onde

R_i número de Richardson;

$\partial\rho/\partial z$: derivada parcial da densidade em função da profundidade de referencia;

ρ : densidade;

g : aceleração da gravidade;

$\partial u/\partial z$: derivada parcial da velocidade em função da profundidade;

“Nesta formulação, se o número de Richardson local é menor que um número de Richardson crítico estabelecido, os coeficientes são calculados em função da profundidade local, do ponto de cálculo, do parâmetro de calibração k_1 e do cisalhamento local. Caso o número de Richardson local ultrapasse este valor crítico os coeficientes são considerados nulos, e não há mistura vertical”.

MEDEIROS, Adriana Dantas, 2006

$$\left. \begin{aligned}
 K_v &= \left\{ \left(k_1^2 z^2 \left(1 + \frac{z}{h} \right)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \right) \sqrt{1 - \frac{R_i}{R_{i_c}}} \right\} \\
 A_v &= K_v (1 + R_i)
 \end{aligned} \right\} R_i < R_{i_c}$$

$$\left. \begin{aligned}
 K_v &= 0 \\
 A_v &= 0
 \end{aligned} \right\} R_i \geq R_{i_c}$$

(Sistema 1)

Alguns trabalhos (VALLINO; HOPKINSON, 1997 *apud* LIMA, 2009) propõem que o coeficiente de dispersão vertical pode ser obtido estatisticamente.

Modelo matemático utilizado pelo sistema MOHID.

O MOHID inicialmente resolvia as equações de fluxo pelo método de diferenças finitas, entretanto devido à necessidade de solução dos modelos independente do sistema de coordenadas utilizado (seja ele cartesiano, sigma ou Isopicnal), o MOHID iniciou o uso do método de volumes finitos com Martim (1999) na discretização do objeto de estudo (MOHID, 2011). O procedimento para a resolução das equações independe da geometria de cada célula. Na de fato, cada célula pode ter qualquer geometria, tendo apenas poucas restrições se precisa conhecer o fluxo entre células. Assim, se consegue uma completa separação entre as variáveis físicas e a geometria (*Hirsch, 1988 apud MOHID 2011*). Como os volumes (devido à alteração de geometria) podem variar no transcorrer dos cálculos, a geometria é atualizada a cada passo de tempo em que as variáveis físicas são calculadas (deste modo aumentando o esforço computacional).

O elemento de volume utilizado no MOHID é mostrado na Figura 05.

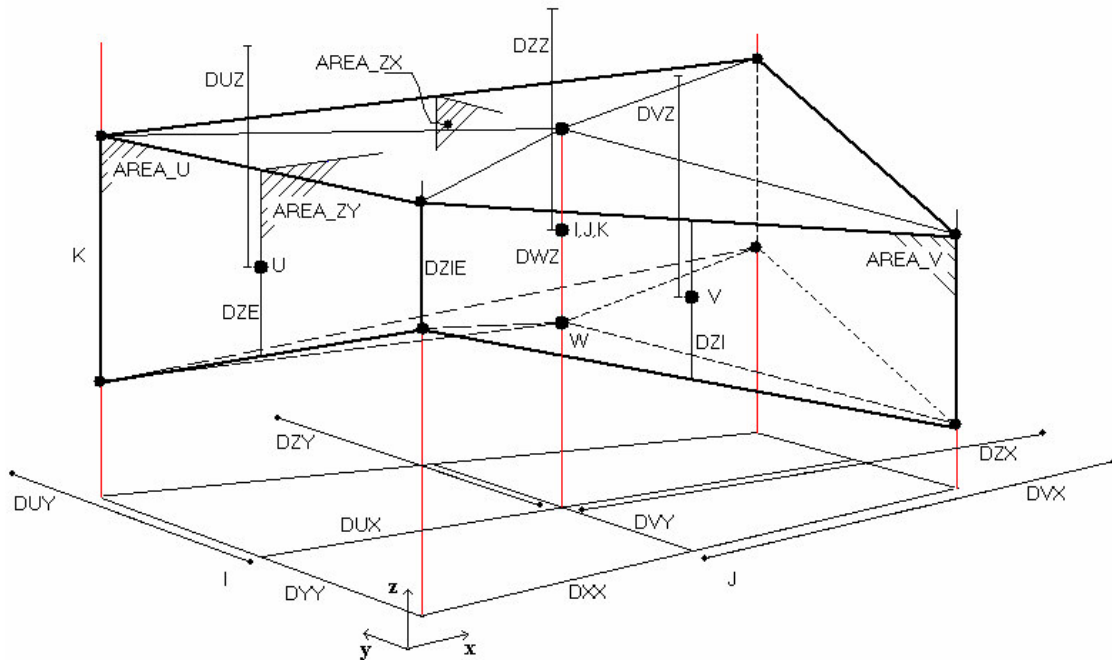


Figura 05: discretização dos volumes de controle utilizado pelo MOHID.

Fonte: Descrições do MOHID.

O MOHID resolve as equações primitivas que formulam o escoamento tridimensional incompressível (fluido newtoniano). Equilíbrio hidrostático e as aproximações de Boussinesq e Reynolds são assumidos. As Equações de momento para as velocidades médias horizontais, na forma Cartesiana (neste caso, porém outro sistema de coordenadas é possível), são dadas por:

$$\partial_t \mathbf{u} = -\partial_x (uu) - \partial_y (uv) - \partial_z (uw) + fv - 1/\rho_0 \partial_x p + \partial_x ((v_H + v) \partial_x u) + \partial_y ((v_H + v) \partial_y u) + \partial_z ((v_t + v) \partial_z u). \quad (7)$$

Aproximações para as equações de momento na direção u .

Fonte: Descrições do MOHID

$$\partial_t \mathbf{v} = -\partial_x (vu) - \partial_y (vv) - \partial_z (vw) + fu - 1/\rho_0 \partial_y p + \partial_z ((v_H + v) \partial_x v) + \partial_y ((v_H + v) \partial_y v) + \partial_z ((v_t + v) \partial_z v) \quad (8)$$

Aproximações para as equações de momento na direção v .

Fonte: Descrições do MOHID

onde u , v e w são as componentes do vetor velocidade nas direções x , y e z , respectivamente, f o parâmetro de Coriolis (varia com a latitude), v_H e v_t , a viscosidade turbulenta nos sentidos horizontal e vertical, v é a viscosidade cinemática molecular, p é a pressão no ponto de interesse. A evolução temporal das velocidades (termo do lado esquerdo) é o balanço de transporte advectivo (três primeiros termos do

lado direito), força de Coriolis (quarto termo), o gradiente de pressão (próximos três termos) e difusão turbulenta (últimos três termos).

A velocidade vertical é calculada a partir da equação de continuidade para fluido incompressível (equação de balanço de massa):

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (9)$$

Velocidade vertical.

Fonte: Descrições do MOHID

O transporte devido aos fluxos advectivo e difusivo, para uma dada propriedade A , é resolvido pela seguinte equação:

$$\partial_t A = -\partial_x (uA) - \partial_y (vA) - \partial_z (wA) + \partial_x (v'_H \partial_x A) + \partial_y (v'_H \partial_y A) + \partial_z ((v'_t + v'_A) \partial_z A) \quad (10)$$

Equação de transporte advectivo.

Fonte: Descrições do MOHID

onde v'_H e v'_t são os coeficientes de difusividade horizontal e vertical, e v'_A o coeficiente de difusividade molecular.

O conjunto de equações que compõem o modelo determinístico pode ser resolvido numericamente (método de solução da equação diferencial), gerando o que se chama de solução numérica. A base da solução numérica é o processo de discretização, que permite reduzir o problema físico, contínuo e com um infinito número de variáveis, para um problema discreto, com um número finito de variáveis, de modo que possa ser computacionalmente resolvido (WROBEL, 1989 apud MOHID 2011).

MOHID – Water modeling system.

MOHID é um software desenvolvido no Instituto Superior Técnico de Lisboa, de distribuição gratuita, ao longo de cerca de 20 anos de sua criação tem gerados diversos estudos ambientais conforme pode ser verificado no site: <http://www.mohid.com/>. Alguns estudos disponíveis no site, mostram a alta capacidade do sistema em prever situações reais como foi o vazamento de óleo do navio Prestige na costa da Espanha.

Nossa utilização do *software* ateuve-se a dois programas do pacote do Mohid (figura 06), sendo eles Mohid GIS (figura 07) e Mohid GUI (figura 08).

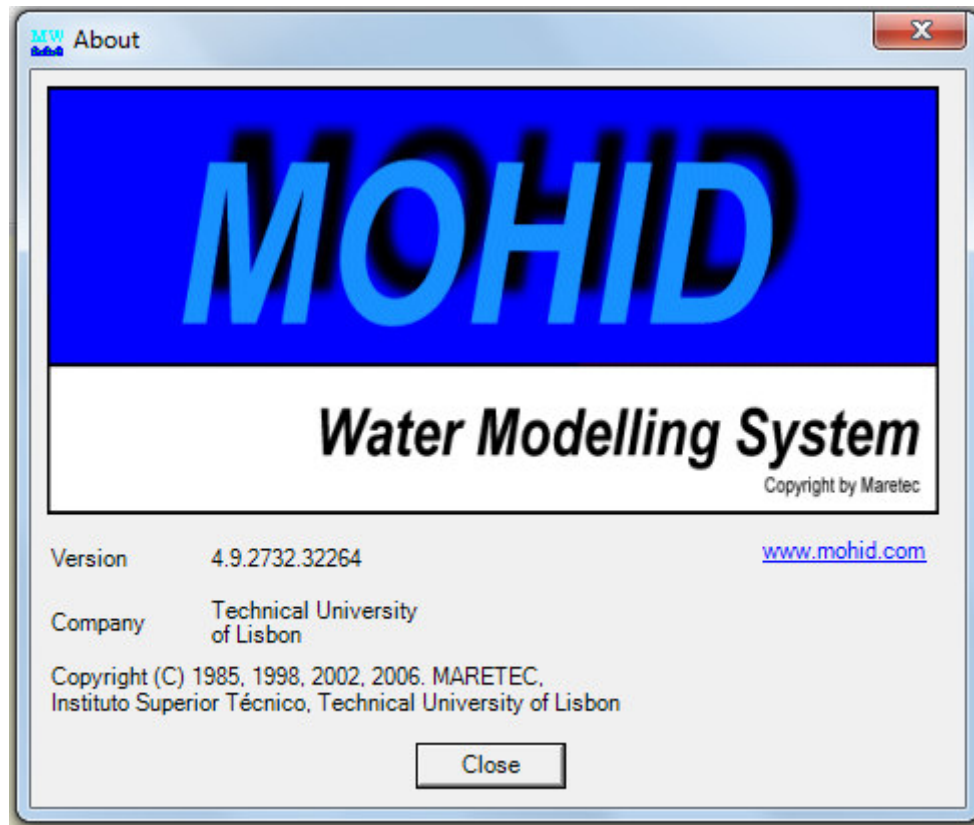


Figura 06: Sistema Mohid utilizado versão 4.9.2732.32264.

Fonte: Software MOHID.

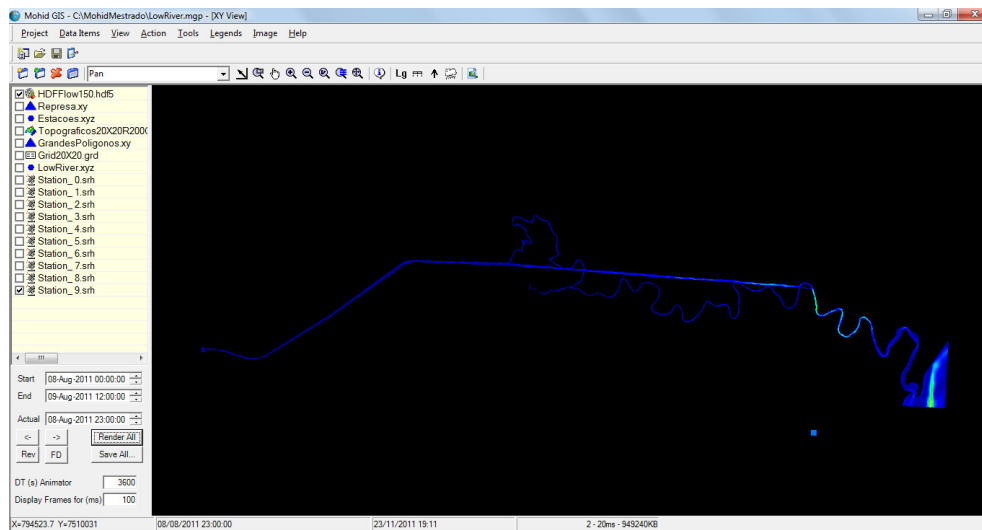


Figura 07: Mohid GIS.

Fonte: Modelos elaborados pelo autor no software MOHID.

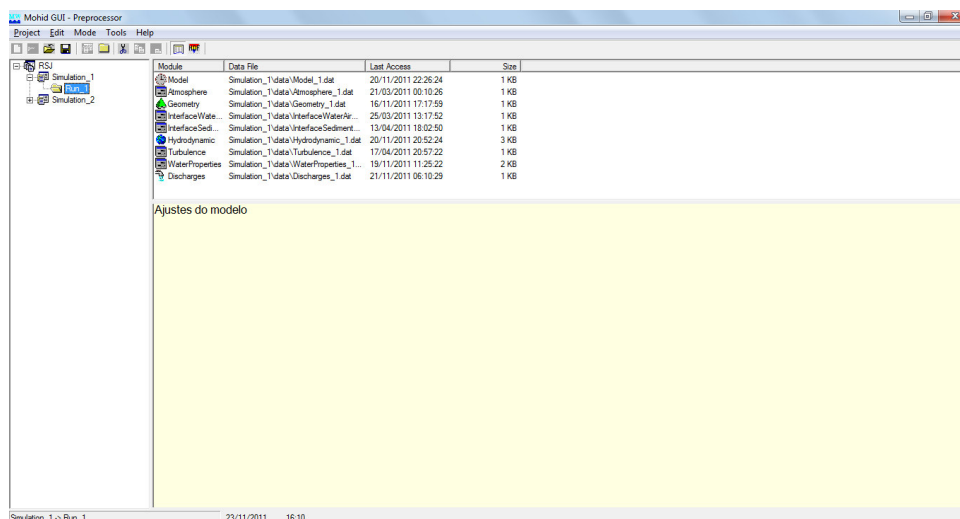


Figura 08: MOHID GUI.

Fonte: Modelos elaborados pelo autor no software MOHID.

Ferramentas utilizadas do Mohid GIS.

No Mohid GIS, foram elaborados os terrenos digitais e séries temporais, as principais ferramentas utilizadas foram:

Create Digital Terrain: responsável pela criação do terreno digital, associando os dados dos pontos (batimétricos) com os polígonos (fronteiras) e o grid (resolução desejada).

Create Grid Time Serie: Responsável pela criação das time series, utilizando para isto coleção de pontos onde o usuário define como apropriado para as estações.

Grid data operator: onde é possível realizar operação aritméticas com as coleções tipo Grid, no nosso caso foi utilizada para após a criação do terreno digital, corrigir para os valores da altimetria corrigindo pela batimetria medida no local.

Animator (View): onde é possível visualizar os resultados HDF de maneira mais amigável.

Módulos utilizados no Mohid GUI.

No Mohid GUI, é possível realizar as simulações, aplicando as condições hidrológicas e obter o resultado sob forma de arquivo HDF ou serie temporal (*Time Serie*) para um dado objeto (terreno digital). O Programa entende que as simulações podem ser distintas ou relacionadas (modelo pai e filho) entre tanto também é possível realizar para cada simulação alteração das informações hidrológicas, conhecidas como *run*.

Os módulos são relacionados com os *run* e neles ficam armazenados os dados de entrada. É uma boa prática que a cada modificação dos parâmetros hidrológicos seja

criado um novo *run*, isto evita que as informações se percam, ou que sejam avaliadas de forma errôneas. A figura 08, demonstra esta estrutura.

Módulos utilizados nas simulações de cenários

Hydrodynamic

Responsável pelas informações do escoamento. Utiliza as condições da fronteira aberta, (MOHID 2011) da superfície (InterfaceWaterAir), do fundo (InterfaceSedimentWater) e descargas (Discharges) para obter as condições de fronteira. Seja ele qual for dependendo apenas das condições do problema. Utiliza a densidade da água do módulo Waterproperties.

O módulo hydrodynamic resolve a forma primitiva tridimensional das equações do movimento (GODOY, 2010). As únicas aproximações admitidas são a de Boussinesq e a hidrostática (MOHID, 2011).

Módulo Waterproperties

O módulo Waterproperties trata da evolução das propriedades da água ao longo da coluna de água. A variação das propriedades depende dos tipo de transporte (advectivo e difusivo) e das condições de fronteira impostas pelo módulo hydrodynamic e das fontes e sumidouros do módulo da qualidade de água.

Este módulo utiliza a informações dos outros módulos para coordenar a evolução das propriedades de água, tais como (GODOY, 2010).

- módulo Hydrodynamic para obter informações sobre o fluxos, entre as células;
- módulo Turbulence para obter as viscosidades e difusividades;
- módulo InterfaceWaterAir para obter os fluxos entre a atmosfera e a superfície coluna de água;
- módulo InterfaceSedimentWater para obter os fluxos entre o fundo e a base da coluna de água;
- módulo WaterQuality para calcular as fontes e os sumidouros;
- módulo Geometry informações relativas ao sistema de coordenadas, camadas da coluna de água.

Este módulo trata das propriedades que expressam a qualidade de água (oxigênio dissolvido, nitrato, nitrito, etc.), o de acordo com Godoy (2010) o forçamento baroclínico do módulo hidrodinâmico (temperatura e salinidade) e propriedades genéricas (GODOY 2009) (idade, coliformes). Neste trabalho é utilizada apenas a densidade da água como propriedade a ser considerada.

Módulo Waterquality

O módulo Waterquality (da qualidade de água) trata da variação de uma propriedade em cada ponto da malha (formulação zero dimensional) baseado num modelo inicialmente desenvolvido pela Environmental Protection Agency (MOHID 2010). Este módulo não é utilizado neste trabalho.

Módulo de turbulência

O módulo de turbulência informa aos outros módulos a energia cinética turbulenta, o comprimento de mistura, as viscosidades horizontais e verticais e as difusividades. No nosso modelo utilizamos apenas as chaves: VISCOSITY_V e VISCOSITY_H.

Módulo Discharge

Responsável pelo controle das descargas de efluentes no modelo, podendo ser o regime das descargas de diversas formas, desde pontuais, em linhas ou em áreas. As descargas podem ter propriedades associadas e o seu regime de descarga pode ser realizado desde um fluxo contínuo a um acidental ou variável, controlado por uma série temporal (MOHID, 2010). No nosso modelo este módulo foi utilizado para simular a descarga da represa variando entre 100m³/s a 30m³/s.